

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

TATIANE BOVAROTI

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA SALOBRA EM
ESCALA PILOTO**

PONTA GROSSA

2018

TATIANE BOVAROTI

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA SALOBRA EM
ESCALA PILOTO**

Dissertação apresentada para a obtenção do título de Mestre na Universidade Estadual de Ponta Grossa, Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental, Área de Concentração em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Profa. Dra. Giovana Kátie Wiecheteck

Coorientador: Prof. Dr. Gabriel Carranza

PONTA GROSSA

2018

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

B783 Bovaroti, Tatiane
Avaliação de um sistema de
dessalinização de água salobra em escala
piloto/ Tatiane Bovaroti. Ponta Grossa,
2018.
74f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia
Sanitária e Ambiental - Área de
Concentração: Saneamento Ambiental e
Recursos Hídricos), Universidade Estadual
de Ponta Grossa.
Orientadora: Prof^a Dr^a Giovana Kátie
Wiecheteck.
Coorientador: Prof. Dr. Gabriel
Carranza.

1.Água salobra. 2.Dessalinização.
3.Ultrafiltração. 4.Osmose reversa.
5.Qualidade da água. I.Wiecheteck, Giovana
Kátie. II. Carranza, Gabriel. III.
Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Mestrado em Engenharia Sanitária e
Ambiental. IV. T.

CDD: 628.3



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: “**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO DE
ÁGUA SALOBRA EM ESCALA PILOTO**”

Nome: **TATIANE BOVAROTI**

Orientadora: **Profª Drª Giovana Kátie Wiecheteck**

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Profª Drª Giovana Kátie Wiecheteck
Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG

Profª Drª Ana Carolina Barbosa Kummer
Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG

Prof. Dr. Gustavo Rafael Collere Possetti
Companhia de Saneamento do Paraná - SANEPAR

Ponta Grossa, 12 de abril de 2018.

AGRADECIMENTOS

À Jeová Deus por me ajudar em todos os momentos de minha vida.

À professora Dra Giovana Kátie Wiecheteck, que foi mais do que minha orientadora, e ao professor Gabriel Carranza. Agradeço pela orientação, apoio e por terem me incluído neste projeto maravilhoso que abriu novos caminhos e conhecimentos.

Ao Institute of International Education (IIE) e ao British Council por meio do Global Innovation Initiative (GII) por financiarem o projeto e minha bolsa de estudos que foi fundamental.

Aos Professores Dr Miguel Acevedo da University of North Texas e a Dra Luiza Campos da University College London, que à pedido da Professora Dra Giovana Kátie Wiecheteck me deram a oportunidade de fazer parte do grupo de pesquisa e me deram diversas sugestões de melhoria ao trabalho.

À equipe de Pesquisa e Desenvolvimento da Sanepar pela parceria e por ceder espaço físico, equipamentos, treinamentos e técnicos para o desenvolvimento das pesquisas.

À professora Dra Ana Carolina Barbosa Kummer e ao Professor Dr Marcos Rogério Széliga pela contribuição de seus conhecimentos e sugestões.

Ao Engenheiro da Permution, Paulo Krieger e ao Juliano Penteadó de Almeida pela disponibilidade, assistência e esclarecimentos sobre o sistema de osmose reversa.

Agradeço à Ana Carolina Martins Rodrigues, à Universidade Estadual de Ponta Grossa, a todos os alunos, estagiários e envolvidos nos ensaios de laboratório desta pesquisa.

Aos queridos colaboradores da Sanepar de praia de Leste que me acolheram e me ajudaram na parte experimental deste trabalho.

Aos meus pais, minha irmã e meu cunhado por me apoiarem e me incentivarem nas minhas decisões e educação.

À Frísia Cooperativa Agroindustrial pela liberação às aulas.

À todos que direta ou indiretamente me ajudaram durante esta etapa de minha formação.

No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade.
(Albert Einstein)

RESUMO

Preocupados com a intrusão de água do mar, escassez e má qualidade das reservas de água doce no mundo, diversos países têm estudado e proposto sistemas de alta tecnologia que sejam viáveis para a dessalinização de água salobra ou salina. Este trabalho teve como objetivo principal avaliar a eficiência de um sistema de ultrafiltração (UF) como pré-tratamento, seguido de abrandamento e osmose reversa (OR) para a dessalinização de água salobra em escala piloto, instalado no balneário de Praia de Leste, litoral do estado do Paraná. Para a obtenção da água salobra foi realizada a mistura da água do rio das Pombas com a água do mar até a concentração de $1500 (\pm 100) \text{ mg. L}^{-1}$ de sólidos dissolvidos totais (SDT). O sistema foi projetado para a produção de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de água doce (permeado da OR) e operou por aproximadamente 3h por dia durante vinte dias não consecutivos. Analisaram-se amostras de nove pontos de coleta durante a primeira (A), segunda (B) e terceira (C) hora de operação. Para a avaliação da qualidade da água os parâmetros analisados foram: SDT, condutividade elétrica, pH, temperatura, cor aparente, turbidez, alcalinidade total, dureza total, cálcio, cloreto, sulfato, coliformes totais e E.coli. Para avaliação da eficiência do sistema, calculou-se a taxa de recuperação e o fluxo de filtração, bem como a leitura de outros parâmetros operacionais como a pressão osmótica. O sistema de UF apresentou remoção média de 95,1% de turbidez e de 98,6% de cor aparente na água salobra. Constatou-se ausência de coliformes totais e E.coli no permeado. Houve variação quanto à remoção de dureza total e cálcio pelo abrandador devido ao tempo de regeneração do sistema. O sistema de OR obteve remoção média de 99,4% de SDT e a maior taxa de recuperação global (UF e OR) foi de 57,4%.

Palavras-chave: Água salobra. Dessalinização. Ultrafiltração. Osmose reversa. Qualidade da água.

ABSTRACT

Concerned about the intrusion of sea water, scarcity and poor quality of freshwater reserves in the world, several countries have studied and proposed high technology systems that are feasible for the desalination of brackish or saline water. The main objective of this work was to evaluate the efficiency of an ultrafiltration (UF) system as a pretreatment, followed by softening and reverse osmosis (RO) for pilot scale saline water desalination, installed in Praia de Leste – coast of the state of Paraná. To obtain the brackish water, the water of the Pombas River was mixed with sea water up to the concentration of $1500 (\pm 100) \text{ mg. L}^{-1}$ total dissolved solids (TDS). The system was designed to produce $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ of freshwater (permeate from the RO) and was operated by approximately 3 hours per day during twenty non-consecutive days. Samples from nine collection points were analyzed during the first (A), second (B) and third (C) hours of operation. In order to evaluate the water quality, the parameters evaluated were: TDS, electric conductivity, pH, temperature, apparent color, turbidity, total alkalinity, total hardness, calcium, chloride, sulfate, total coliforms and E.coli. To evaluate the efficiency of the system, the recovery rate and the filtration flow were calculated, as well as the reading of other operational parameters such as osmotic pressure. It was found absence of total coliforms and E. coli in the permeate. There was variation regarding to the removal of total hardness and calcium by the softener due to the regeneration time of the system. The RO system obtained an average of 99.4% of the TDS removal and the highest overall (UF and RO) recovery rate was 57.4%.

Keywords: Brackish water. Desalination. Ultrafiltration. Reverse osmosis. Water quality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Capacidade de separação das membranas.....	19
Figura 2 – Diagrama de corte do módulo em espiral.....	20
Figura 3 – Localização da estação de tratamento de água da Sanepar e do rio das Pombas.....	33
Figura 4 – Instalação piloto de dessalinização.....	34
Figura 5 – Fluxograma das etapas do processo de dessalinização.....	35
Figura 6 – Sistema piloto de Ultrafiltração.....	36
Figura 7 – Sistema piloto de Osmose Reversa.....	39
Figura 8 – Diagrama global do sistema indicando os pontos de coleta de amostras e de leitura dos hidrômetros.....	40
Quadro 1 – Acurácia dos equipamentos utilizados.....	41
Quadro 2 – Pontos de coleta de amostra, parâmetros físico-químicos de monitoramento e frequência de amostragem.....	42
Gráfico 1 – pH de coagulação em função da dosagem de coagulante.....	45
Gráfico 2 – Concentrações médias, máximas e mínimas de cloreto.....	47
Gráfico 3 – Concentrações médias, máximas e mínimas de sulfato.....	49
Gráfico 4 – Média diária de condutividade elétrica.....	51
Gráfico 5 – Média diária de sólidos dissolvidos totais.....	52
Gráfico 6 – Concentrações médias, máximas e mínimas de dureza total.....	54
Gráfico 7 – Concentrações médias, máximas e mínimas de cálcio.....	55
Gráfico 8 – Concentrações médias, máximas e mínimas de alcalinidade total.....	57
Gráfico 9 – Valores médios, máximos e mínimos de pH.....	59
Gráfico 10 – Valores médios, máximos e mínimos de turbidez.....	61
Gráfico 11 – Valores médios, máximos e mínimos de cor aparente.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variação dos parâmetros da água do rio, da água do mar e da água salobra	44
Tabela 2 – Resultados dos ensaios microbiológicos.....	46
Tabela 3 – Dados estatísticos das concentrações de cloreto.....	48
Tabela 4 – Dados estatísticos das concentrações de sulfato.....	50
Tabela 5 – Dados estatísticos das concentrações de condutividade elétrica.....	53
Tabela 6 – Dados estatísticos das concentrações de sólidos dissolvidos totais	53
Tabela 7 – Dados estatísticos das concentrações de dureza total.....	55
Tabela 8 – Dados estatísticos das concentrações de cálcio	56
Tabela 9 – Dados estatísticos das concentrações de alcalinidade total.....	58
Tabela 10 – Dados estatísticos dos resultados de pH	60
Tabela 11 – Dados estatísticos dos resultados de turbidez	62
Tabela 12 – Dados estatísticos dos resultados de cor aparente	64
Tabela 13 – Comparativo da eficiência de remoção média do sistema de dessalinização com relação à qualidade da água.....	65
Tabela 14 – Resultados médios dos parâmetros operacionais durante os dias de operação	67

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AS	Água Salobra
CAMAR	Centro de Aquicultura Marinha e Repovoamento
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CIP	Clean in Place
COLIT	Conselho de Desenvolvimento Territorial do Litoral Paranaense
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONC	Concentrado salino
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CV	Coeficiente de Variação
DP	Desvio Padrão
ED	Eletrodíálise
ETA	Estação de Tratamento de Água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MÁX	Máximo
MED	Multi-Effect Distillation
MF	Microfiltração
MÍN	Mínimo
MSF	Multi-Stage Flash
NF	Nanofiltração
NMP	Número Mais Provável
NRC	National Research Council
NTU	Unidades Nefelométricas de Turbidez
OMS	Organização Mundial de Saúde
OR	Osiose Reversa
ORP	Potencial de Oxirredução
PAC	Cloreto de Polialumínio
pH	Potencial Hidrogeniônico
RAS	Razão de Adsorção de Sódio
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SI	Sistema Internacional de Unidades
THM	Trihalometano
TRS	Taxa de Recuperação de Sais
UCL	University College London
UEPG	Universidade Estadual de Ponta Grossa
UF	Ultrafiltração
uH	Unidade Hazen
UNRIC	Centro Regional de Informações das Nações Unidas
UNT	University of North Texas
UV	Ultravioleta
VC	Vapor Compression
WHO	World Health Organization

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	12
2- OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 DESSALINIZAÇÃO.....	16
3.2 PROCESSOS TÉRMICOS DE DESSALINIZAÇÃO	17
3.2.1 Destilação “Flash” de Múltiplo Estágio (“Multi-Stage Flash” – MSF).....	17
3.2.2 Destilação de Múltiplo Efeito (“Multi-Effect Distillation” – MED).....	17
3.2.3 Destilação por Compressão de Vapor (Vapor Compression – VC)	18
3.3 PROCESSOS POR MEMBRANAS	18
3.3.1 Osmose Reversa (OR)	20
3.3.2 Nanofiltração (NF).....	21
3.3.3 Eletrodialise (ED).....	21
3.4 PRÉ E PÓS-TRATAMENTO NA OSMOSE REVERSA.....	21
3.4.1 Ultrafiltração (UF) como pré-tratamento	22
3.4.2 Microfiltração (MF) como pré-tratamento.....	23
3.4.3 Sistemas de Abrandamento como pré-tratamento	23
3.4.4 Desinfecção por Radiação Ultravioleta (UV) como pós-tratamento.....	24
3.5 QUALIDADE DA ÁGUA	25
3.6 PRINCIPAIS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA.....	25
3.6.1 Cor	26
3.6.2 Turbidez.....	26
3.6.3 pH	26
3.6.4 Condutividade Elétrica	27
3.6.5 Alcalinidade	27
3.6.6 Sólidos Dissolvidos Totais (SDT).....	27
3.6.7 Dureza total	28
3.6.8 Cloreto e Sulfato	28
3.6.9 Coliformes Totais e Termotolerantes.....	29
3.7 PRINCIPAIS PARÂMETROS OPERACIONAIS NA DESSALINIZAÇÃO	29
3.7.1 Pressão Osmótica	29
3.7.2 Taxa de Filtração	30
3.7.3 Taxa de Recuperação.....	30

4- METODOLOGIA	32
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	32
4.2 LOCAL DE INSTALAÇÃO E DESCRIÇÃO DO SISTEMA PILOTO DE DESSALINIZAÇÃO.....	33
4.2.1 Ultrafiltração (UF).....	35
4.2.2 Osmose Reversa (OR)	37
4.3 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA.....	40
4.4 CONSIDERAÇÕES OPERACIONAIS	42
4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	43
5- RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
5.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO DO SISTEMA	44
5.2 DOSAGEM DE COAGULANTE E pH DE COAGULAÇÃO.....	45
5.3 ENSAIOS MICROBIOLÓGICOS	46
5.4 ENSAIOS QUÍMICOS.....	47
5.4.1 Cloreto	47
5.4.2 Sulfato.....	48
5.4.3 Condutividade Elétrica e Sólidos Dissolvidos Totais	50
5.4.4 Dureza Total e Cálcio	53
5.4.5 Alcalinidade total e pH	57
5.5 ENSAIOS FÍSICOS	60
5.5.1 Temperatura	60
5.5.2 Turbidez e Cor Aparente.....	61
5.6 EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO	65
5.7 PARÂMETROS OPERACIONAIS	66
6- CONCLUSÕES.....	69
7- REFERÊNCIAS	71

1- INTRODUÇÃO

O crescimento demográfico, econômico e a má gestão generalizada estão exercendo pressões intensas nas reservas cada vez menores de água do mundo (UNRIC, 2009; BARROS; AMIN, 2008).

Além da má gestão e da escassez de recursos hídricos, outro grande problema é a água de qualidade comprometida para fins de uso e consumo, causando problemas sociais e econômicos no Brasil e no mundo.

Aproximadamente 9% da população mundial não tem acesso à água potável e tampouco condições mínimas de saneamento básico (WHO, 2015).

Diversos países têm estudado processos de dessalinização para tratamento da água salobra, salina ou residuária visando obter água doce para fins de consumo humano, irrigação na agricultura e reutilização nas indústrias.

No Brasil, a dessalinização é muito comum no nordeste, em regiões semiáridas, visando principalmente o tratamento de águas salobras de poços para o abastecimento de pequenas comunidades, tornando importante para a melhoria da qualidade de vida de seus habitantes (SANTOS *et al.*, 2010; DIAS *et al.*, 2012).

O processo de dessalinização mais comum no Brasil e no mundo é o de filtração por membranas utilizando osmose reversa (OR), o qual necessita alto consumo de energia devido à pressão aplicada, que depende da concentração de sais da água bruta a ser tratada (CHARCOSSET, 2009).

Para uma boa eficiência no sistema de OR, é necessário um sistema de pré-tratamento da água salobra, como exemplo a utilização de um sistema de Ultrafiltração (UF). A membrana de UF tem porosidade de aproximadamente 0,10 mm que permite a retenção de partículas em suspensão e coloides. Um sistema de UF eficiente tem que apresentar um bom desempenho em termos de qualidade da água permeada e operação estável quanto à pressão (CHEN *et al.*, 2015).

A tecnologia de OR em comparação com o processo de destilação gera uma quantidade menor de resíduo, o concentrado salino. Dependendo do equipamento e das características da água salobra, a quantidade de resíduo gerado no processo será de 40 a 60% do total da água processada (PORTO *et al.*, 2001), apresentando concentração de sais minerais e contaminantes de 2 a 10 vezes mais elevada que na água bruta, dependendo da eficiência do sistema (WHO, 2007). Em geral, o solo

e os cursos d'água são os meios principais de deposição dos rejeitos salinos, acarretando em impactos negativos ao ambiente das comunidades que se beneficiam dessa tecnologia (REBOUÇAS *et al.*, 2013). Por esta razão é importante a caracterização desse resíduo, visando propor um sistema eficiente para seu tratamento e disposição adequada.

Visto que grande parte da população mundial vive em regiões costeiras, é de grande importância os estudos relacionados à qualidade da água nos corpos hídricos e nos aquíferos costeiros. Segundo Santos (2012), a diminuição da descarga de água doce ou o aumento de extração da mesma, assim como o aumento no fluxo de água do mar, causam um desequilíbrio dinâmico entre a água salina do mar e a água doce continental, aumentando a intrusão da cunha salina na água subterrânea e/ou superficial. Dependendo do grau de intrusão, pode prejudicar os sistemas de abastecimento doméstico e industrial, já que no tratamento convencional não é possível remover a salinidade da água.

Atualmente, o Balneário de Praia de Leste, no município de Pontal do Paraná, é abastecido com água proveniente do Rio das Pombas. Durante os períodos de maré alta, ocorrem intrusões de água salina no rio que, conforme a Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar), aumentam a concentração de sais na água bruta que chega à Estação de Tratamento de Água (ETA), prejudicando as unidades de tratamento.

A região possui população flutuante (FARIA *et al.*, 2015), o que reforça a necessidade de buscar novas alternativas e tecnologias de abastecimento de água visando a ampliação do sistema de tratamento.

Na busca por resolver estes problemas e antecipando tendências foi proposto a implantação de um sistema em escala piloto, para dessalinização de água salobra em Praia de Leste, utilizando UF seguida de abrandamento por troca iônica e filtração por OR. Este trabalho foi desenvolvido como parte de um projeto de pesquisa em parceria com a Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), a University of North Texas (UNT), University College London (UCL) e a Sanepar.

Este trabalho é uma extensão do trabalho realizado por Almeida (2017), que teve como objetivo principal avaliar a eficiência de um sistema de UF seguido de OR em Praia de Leste para a dessalinização de água salobra com as concentrações de 1000 e 1500 (± 100) mg.L⁻¹ de SDT. Os experimentos de Almeida (2017) foram

realizados durante 15 dias para cada concentração de SDT, totalizando 30 dias de operação durante os meses de setembro a dezembro de 2016 (primavera e verão), e os ensaios realizados nas amostras de água dos sistemas foram: condutividade elétrica, cálcio, magnésio, dureza total, alcalinidade total, pH, cloreto, sulfato, SDT, turbidez, cor aparente e temperatura. Também foram avaliados: o potencial de oxirredução (ORP), pressão osmótica, taxa de filtração e taxa de recuperação.

No presente trabalho o diferencial foi avaliar a qualidade microbiológica da água e a eficiência do sistema de abrandamento quanto à remoção de dureza total e cálcio. Além disso, os experimentos foram realizados durante os meses de maio a setembro de 2017 (outono, inverno e primavera).

2- OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência um sistema de pré-tratamento por ultrafiltração, seguido de abrandamento por troca iônica e filtração por osmose reversa para a dessalinização de água salobra em escala piloto instalado no balneário de Praia de Leste, litoral do Paraná.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Avaliar quantitativamente o sistema em escala piloto de dessalinização de água salobra em termos de produção de água doce e resíduo salino gerado;
- b) Monitorar a qualidade físico-química e microbiológica da água em diferentes pontos de amostragem do sistema;
- c) Verificar a eficiência do sistema de ultrafiltração, abrandamento e osmose reversa por meio do cálculo da taxa de recuperação e da qualidade da água.

3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 DESSALINIZAÇÃO

Dessalinização é o termo utilizado para o processo de separação de sais da água salina ou salobra, produzindo água doce. As alternativas de abastecimento de água para a dessalinização não estão sujeitas à estiagem, já que mais de três quartos do planeta são cobertos por água salgada. Fatores tais como clima, características geológicas, tipos de solos e distância em relação ao mar determinam o nível de salinidade das águas naturais que podem ser superficiais ou subterrâneas (SOUZA, 2006).

A classificação geral das águas define como água doce aquela que apresenta teor de sólidos dissolvidos totais (SDT) inferior a 1000 mg.L^{-1} . As águas com SDT entre 1000 e 10000 mg.L^{-1} são classificadas como salobras e as com mais de 10000 mg.L^{-1} são definidas como salinas ou salgadas (REBOUÇAS, 2006).

Segundo a Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) 357/2005, as águas superficiais do território brasileiro são definidas, em termos de salinidade, como:

- água doce: águas com salinidade igual ou inferior a $0,5 \text{ ‰}$;
- água salobra: águas com salinidade superior a $0,5 \text{ ‰}$ e inferior a 30 ‰ ;
- água salina: águas com salinidade igual ou superior a 30 ‰ .

Pelo Sistema Internacional de Unidades (SI), a salinidade da água é definida com maior precisão por meio dos SDT, pois os constituintes em solução na água não são necessariamente sais. Os valores percentuais citados na Resolução CONAMA 357/2005 são, respectivamente, inferior ou igual a 500 mg.L^{-1} , entre 500 e 30000 mg.L^{-1} e maiores que 30000 mg.L^{-1} (REBOUÇAS, 2006).

Os principais processos para dessalinização de água são os térmicos, como os que têm por princípio a destilação; e os processos de separação por membranas, como a eletrodialise e osmose reversa. Também existe a dessalinização por congelamento e destilação por energia solar, porém pouco utilizados.

3.2 PROCESSOS TÉRMICOS DE DESSALINIZAÇÃO

O conceito básico de destilação térmica consiste em aquecer uma solução de água salina até o ponto de ebulição para gerar vapor (vaporização). Se esse vapor for dirigido a uma superfície fria, pode ser condensado, produzindo água doce.

A água do mar contém alto teor de sólidos dissolvidos que podem prejudicar o processo de transferência de calor, visto que alguns destes sólidos se depositam na tubulação dependendo da temperatura de destilação empregada, formando uma crosta. Os microrganismos também podem se aglomerar, formando um biofilme que dificulta a troca de calor. É de grande importância o pré-tratamento da água salina antes da destilação. O pré-tratamento pode envolver a cloração, correção de pH e a descarbonatação (SOUZA, 2006).

3.2.1 Destilação “Flash” de Múltiplo Estágio (“Multi-Stage Flash” – MSF)

Esse processo envolve a utilização de destilação por meio de várias câmaras (multi-estágio). Nesse processo, cada estágio sucessivo do sistema opera a pressões progressivamente menores. O vapor gerado é convertido em água doce por ser condensado na tubulação do permutador de calor que percorre cada etapa. Os tubos são arrefecidos pela água de entrada do refrigerador. Geralmente, apenas uma pequena percentagem da água de alimentação é convertida em vapor e condensada. Os sistemas de MSF estão sujeitos à corrosão a menos que o aço inoxidável seja usado extensivamente. Também pode ocorrer erosão pela turbulência da água de alimentação na câmara, quando a água de alimentação passa de uma fase para outra. Essa tecnologia é utilizada principalmente no Oriente Médio (KRISHNA, 2004; SOUZA, 2006).

3.2.2 Destilação de Múltiplo Efeito (“Multi-Effect Distillation” – MED)

Como no processo MSF, a destilação de múltiplo efeito ocorre em uma série de recipientes (efeitos) e utiliza o princípio de redução de pressão interna nos vários efeitos. A água salina entra em ebulição a temperaturas mais baixas à medida que a pressão diminui, pois o primeiro recipiente ou efeito serve

como meio de aquecimento para o segundo, e assim sucessivamente. Quanto mais vasos ou efeitos, maior é a relação de desempenho (KRISHNA, 2004). Isto permite a ebulição múltipla da água salina sem suprimento de calor adicional após o primeiro efeito. O condensado do vapor é reciclado para reutilização. A água excedente é levada para o segundo efeito, onde é novamente aplicada a uma série de tubos. Esses tubos são por sua vez aquecidos pelos vapores criados no primeiro efeito. Esse vapor é condensado formando o produto água doce, enquanto libera calor para evaporar uma porção de água salina remanescente no próximo efeito. Isto continua pelos vários efeitos. Nos grandes sistemas, tipicamente são encontrados até 16 efeitos (SOUZA, 2006).

3.2.3 Destilação por Compressão de Vapor (Vapor Compression – VC)

O processo de destilação por Compressão de Vapor (VC) é utilizado em combinação ou por si só. O calor para evaporar a água vem do compressor de vapor, em vez da troca direta de calor do vapor produzido em uma caldeira. Geralmente, um compressor mecânico é usado para gerar o calor para a evaporação. As unidades de VC são geralmente de pequena capacidade (KRISHNA, 2004).

3.3 PROCESSOS POR MEMBRANAS

Envolvem a utilização de membranas sintéticas, porosas ou semipermeáveis. Para que o processo ocorra, é necessário um gradiente de pressão hidráulica ou um campo elétrico (MACÊDO, 2004).

Processos de tratamento de água empregam vários tipos de membranas que se diferenciam pelo tamanho do poro. Eles incluem microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), osmose reversa (OR) e nanofiltração (NF) (SAGLE; FREEMAN, 2004).

De modo geral, as membranas podem ser classificadas como densas ou porosas. A capacidade seletiva das membranas porosas (como as de microfiltração, ultrafiltração e nanofiltração) estão diretamente ligadas à relação entre o tamanho das espécies presentes e ao tamanho dos seus poros. Em processos que empregam membranas densas (como as de osmose reversa), a

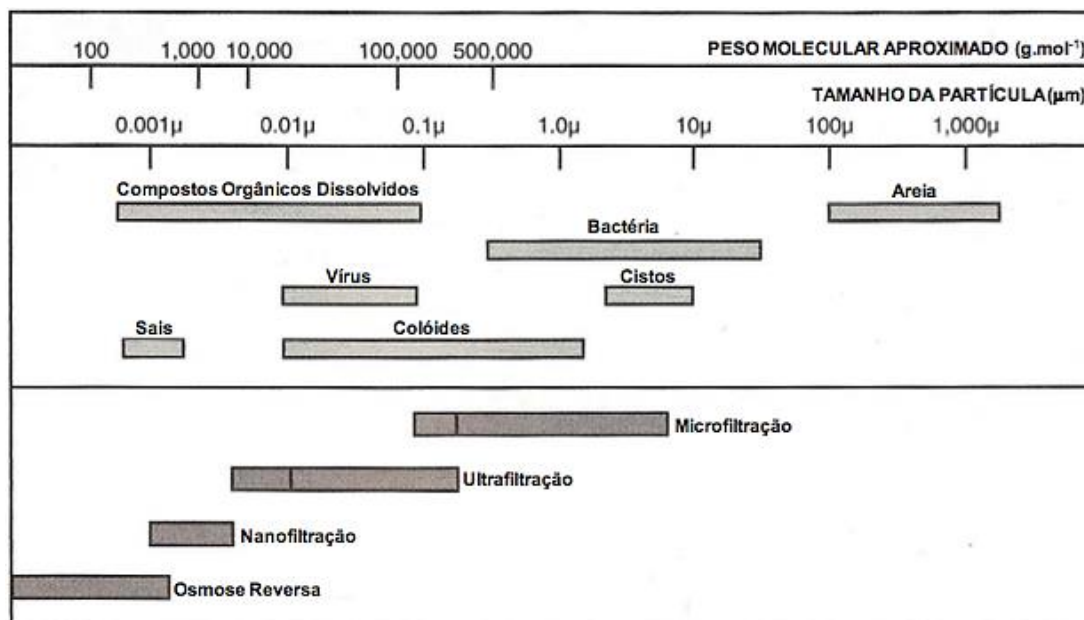
capacidade seletiva depende da afinidade das diferentes espécies com o material da membrana e da difusão das mesmas (HABERT, 2006).

Tecnologias por membranas podem ser utilizadas não só para dessalinizar fontes de água, mas também auxiliam no tratamento de águas residuais visando sua reutilização e reciclagem, devido à capacidade de remoção de contaminantes orgânicos, bactérias e vírus (NRC, 2008).

Na Figura 1 é apresentada a capacidade de separação dos principais tipos de membranas. As de poros maiores, como microfiltração e ultrafiltração geralmente são utilizadas como pré-tratamento para remover contaminantes particulados maiores e para reduzir as cargas sobre as membranas mais restritivas, como a osmose reversa, melhorando assim seu desempenho e sua durabilidade (WHO, 2007).

Os principais problemas são entupimento e a desestabilidade química da membrana. Reduzindo a incrustação, os custos e consumo de energia também diminuem. Melhorar a tolerância da membrana ao cloro, eliminaria etapas de decoloração no tratamento (SAGLE; FREEMAN, 2004).

Figura 1 – Capacidade de separação das membranas

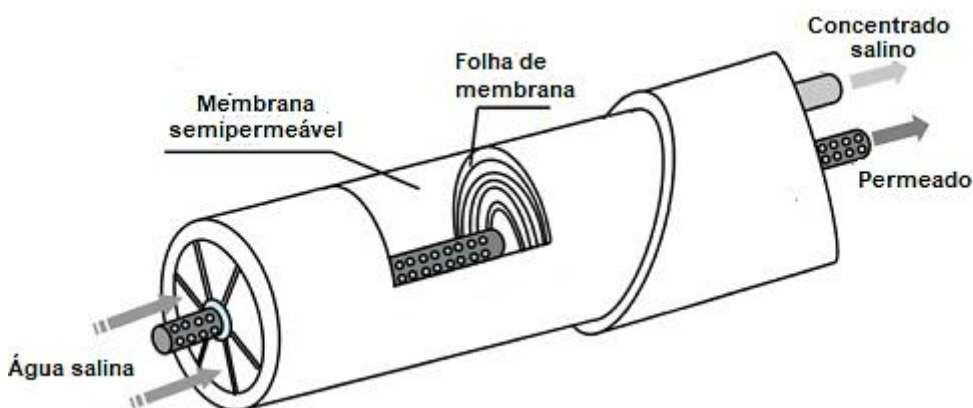


Fonte: OLIVEIRA, (2010); adaptado de MIERZWA *et al.* (2008)

3.3.1 Osmose Reversa (OR)

As membranas de OR são constituídas de acetato de celulose ou poliamida, em sua maioria. A membrana é um composto de película fina formada por três camadas, sendo uma camada suporte de poliéster, uma camada intermediária de polisulfona e uma camada ativa de poliamida. Para que possa operar adequadamente é enrolada em espiral e protegida por um encapsulamento de fibra de vidro (Figura 2). Existem dois tipos de membranas de OR para uso industrial. Uma é feita de acetato de celulose, resiste a produtos oxidantes e é utilizada na presença de cloro. A outra é fabricada de poliamida, mas apesar de ser resistente a uma faixa maior de pH, não resiste a oxidantes, como o cloro (REVISTA TAE, 2013).

Figura 2 - Diagrama de corte do módulo em espiral



Fonte: Adaptado de FANE, WANG, JIA; (2011)

O processo de OR utiliza a pressão como força motriz para passar a água salina através de uma membrana semi-permeável para um fluxo de água pura como produto e outro fluxo de salmoura como resíduo. Uma estação de dessalinização com OR consiste essencialmente em quatro sistemas principais: sistema de pré-tratamento, bombas de alta pressão, sistemas de membrana e pós-tratamento. A quantidade de água de alimentação que é descartada como concentrado, é cerca de 20% para a água salobra e de 50% para a água salina (KRISHNA, 2004).

O mecanismo de separação resulta da solubilização seguida de difusão das moléculas de água e da difusão do soluto pelas membranas, sendo que a

taxa de difusão da água é muito superior a dos solutos. A OR pode rejeitar íons monovalentes com tamanho aproximado de 0,1 nm (METCALF, 2016).

É um processo que permite remover contaminantes orgânicos e até 99% dos íons. Tem capacidade para remoção de 99,9% de vírus, bactérias e coloides em boas condições de operação. Na filtração convencional os contaminantes ficam retidos na superfície ou dentro do filtro, já na osmose reversa, o soluto e os sólidos são eliminados pelo fluxo transversal do rejeito (MACÊDO, 2004).

3.3.2 Nanofiltração (NF)

A nanofiltração é também um processo de filtração por membranas utilizado para a remoção de sais como cálcio, magnésio e sulfato (KRISHNA, 2004).

A NF é geralmente utilizada para o abrandamento de água, substituindo processos por precipitação química. Pode rejeitar substâncias com diâmetro de até 0,001 μm , incluindo moléculas orgânicas com baixa massa molar e íons bivalentes (METCALF, 2016).

3.3.3 Eletrodialise (ED)

É um processo de separação que utiliza a diferença de potencial elétrico como força motriz para mover íons através das membranas de troca iônica (MORILLO *et al.*, 2014).

As membranas devem permitir a passagem de cátions ou ânions (mas não de ambas), sendo colocadas entre um par de eletrodos. Essas membranas são acondicionadas alternadamente com uma membrana seletiva de ânions seguida de uma membrana seletiva de cátions. Um espaçador estabelece um canal que transporta água como produto, enquanto o próximo carrega água salobra. Produtos químicos podem ser adicionados aos fluxos no perfilado para evitar a formação de crostas (SOUZA, 2006).

3.4 PRÉ E PÓS-TRATAMENTO NA OSMOSE REVERSA

O pré-tratamento é geralmente necessário para todos os processos de dessalinização, pois garante que os constituintes da água não reduzam o

rendimento do sistema de dessalinização e que não corroam as tubulações. Na dessalinização por membranas, o pré-tratamento também é necessário para evitar a obstrução da membrana por sólidos suspensos e/ou coloidais, também evitando crescimento microbiano (NRC, 2008).

O pré-tratamento pode envolver métodos convencionais, tais como alimentação química seguida de coagulação/floculação/sedimentação e filtração com areia, ou o pré-tratamento pode ser por membranas com maior porosidade, tais como microfiltração (MF) e ultrafiltração (UF). A escolha de um determinado processo de pré-tratamento baseia-se em vários fatores, como a qualidade da água de alimentação, disponibilidade de espaço, requisitos da membrana de OR, dentre outros (KRISHNA, 2004).

De acordo com Huehmer (2009), o pré-tratamento inadequado e/ou ineficaz pode causar o aumento acelerado da pressão de condução líquida, redução do fluxo de permeado, aumento da frequência de limpeza e redução da vida da membrana da OR, ocasionando em impactos operacionais e, conseqüentemente, um aumento direto nos custos do sistema.

O pós-tratamento da água permeada após o processo de dessalinização inclui: estabilização por adição de alcalinizantes (como carbonato de cálcio e de magnésio), inibição de corrosão por químicos, remineralização, desinfecção e remoção de compostos específicos (WHO, 2007).

O cloro é geralmente utilizado para a desinfecção da água em várias formas (hipoclorito de sódio, cloro gasoso, hipoclorito de cálcio) por conta da sua eficiência comprovada. No entanto, outros desinfetantes finais tais como dióxido de cloro ou cloraminas, ozônio ou radiação Ultravioleta (UV), podem ser usados em combinação com cloração para controlar o crescimento microbiano, dependendo das condições específicas (WHO, 2007).

O forte poder oxidante do cloro o torna útil para outras finalidades, como o controle do sabor e odor da água, remoção de sulfeto de hidrogênio, remoção de ferro, cor e manganês, dentre outras (RICHTER; NETTO, 2002).

3.4.1 Ultrafiltração (UF) como pré-tratamento

A UF geralmente é usada para substituir a etapa de clarificação em uma ETA convencional, isto é, coagulação, floculação, decantação e filtração, e

pode ser definida como uma operação por membrana de clarificação e de remoção de alguns microrganismos patógenos. Dependendo da qualidade da água bruta, a UF pode ser operada unicamente ou combinada com outro processo (WENTEN, 2008).

As membranas UF têm poros menores do que as membranas MF e, portanto, além de partículas grandes e microrganismos, eles podem rejeitar bactérias e macromoléculas solúveis, tais como proteínas (SAGLE; FREEMAN, 2004). A membrana de UF não tem capacidade para remoção de sais.

A UF pode ser operada à baixa pressão (0,5 a 5 bars). A membrana pode ser construída a partir de componentes sintéticos, o que tem custo vantajoso e podem ser encontrados essencialmente em uma das duas formas: folha tubular ou plana (WENTEN, 2008).

3.4.2 Microfiltração (MF) como pré-tratamento

As membranas de MF tipicamente rejeitam partículas e vários microrganismos (SAGLE; FREEMAN, 2004).

Pode ser utilizada como pré-tratamento para a osmose reversa, porém, dependendo da água bruta, é menos eficiente do que a UF, pois o tamanho do poro é maior, fazendo com que comprometa a membrana por partículas de silte e argila (VOUCHKOV, 2010).

3.4.3 Sistemas de Abrandamento como pré-tratamento

O abrandamento é o processo que remove a dureza das águas. O excesso de íons minerais na água pode causar incrustações em tubulações de troca térmica e também diminuição do poder de formação de espuma na reação com sabões.

Existem diversas classificações quanto a dureza da água que diferenciam pelo seu uso ou consumo. A Portaria nº 2.914 (BRASIL, 2011), estabelece que o valor máximo permitido para dureza da água potável em termos de CaCO_3 seja de 500 mg.L^{-1} . Sendo considerado por SANTOS e MOHR (2013), os níveis de $0 - 75 \text{ mg.L}^{-1} \text{ CaCO}_3$, água mole; $75 - 150 \text{ mg.L}^{-1} \text{ CaCO}_3$, moderadamente dura; $150 - 300 \text{ mg.L}^{-1} \text{ CaCO}_3$, dura e; acima de $300 \text{ mg.L}^{-1} \text{ CaCO}_3$, muito dura.

Alguns dos processos usualmente adotados para o abrandamento são precipitação química (adição de cal e carbonato de sódio) e troca iônica (resina catiônica). No entanto, esses processos possuem desvantagens: a precipitação química utiliza produtos químicos, produz lodo e necessita de ajustes finais, pois a água abrandada ainda possui dureza (cálcio); a troca iônica requer um pré-tratamento da água, exige a regeneração da resina ao atingir a saturação e requer o tratamento do efluente da regeneração (SILVA; KULAY, 2006).

Em sistemas de troca iônica, o meio filtrante do abrandador é composto por resina catiônica que retém os íons de cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}), trocando-os por íons de sódio (Na^{+}) (solúvel) durante o processo de regeneração (PERMUTION, 2016).

3.4.4 Desinfecção por Radiação Ultravioleta (UV) como pós-tratamento

Dentre os métodos alternativos à cloração na água de abastecimento e água residuária, destaca-se a desinfecção por UV que minimiza a formação de trialometanos (THM) e outros subprodutos que apresentam risco cancerígeno à saúde.

A radiação UV tem ação física, promove reações fotoquímicas que inativam os microrganismos, atingindo principalmente os ácidos nucleicos dos mesmos. O comprimento de onda ideal para a inativação dos microrganismos é de 245 a 285 nm (DANIEL, 2001).

O método utiliza a energia elétrica ou solar para gerar radiação. Um problema que pode ocorrer é a recuperação de microrganismos inativados se a dose de radiação ou o tempo de contato não for adequado. A presença de sais e matéria orgânica em suspensão na água também pode comprometer a eficiência de desinfecção, pois os microrganismos se protegem na presença destes materiais particulados. O fato de a radiação UV não deixar residual na água é apontado como argumento para a utilização do cloro (DANIEL, 2001).

Wisbeck *et al.* (2011), avaliou o tratamento de água de chuva de regiões industriais de Joinville (SC), por radiação ultravioleta. Cada partícula permaneceu sob radiação por 60 segundos. As amostras de água foram analisadas em termos de coliformes totais e coliformes termotolerantes antes do tratamento por ultravioleta, após o tratamento e após tratadas e

armazenadas por 24, 48 e 72 horas. Verificou-se a eficiência da desinfecção por radiação ultravioleta com a inativação de 100% dos coliformes totais e dos coliformes termotolerantes e o não recrescimento desses microrganismos em amostras tratadas e estocadas por até 72 horas.

3.5 QUALIDADE DA ÁGUA

A característica existente na água é resultante de fenômenos naturais e antrópicos. Devido a sua propriedade de solvente e capacidade de transportar partículas, a água incorpora diversas impurezas. De maneira natural, a variação das características da água pode ser afetada devido às chuvas, por escoamento superficial e infiltração no solo; e de maneira antrópica, por despejos industriais, domésticos e aplicação de defensivos agrícolas (VON SPERLING, 2005).

A característica desejável da água, varia conforme seu tipo de uso. De acordo com Von Sperling (2005), os principais usos da água são: abastecimento doméstico e industrial, irrigação, dessedentação de animais, preservação da flora e fauna, recreação e lazer, criação de espécies, geração de energia elétrica, navegação, harmonia paisagística, diluição e transporte de despejos. O estudo da qualidade da água é fundamental para avaliar as consequências de uma determinada atividade, como para estabelecer os meios de tratamento ou não de uma determinada água para cada tipo de uso.

3.6 PRINCIPAIS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA

No Brasil, o Padrão de Potabilidade em vigor está descrito na Portaria nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011 do Ministério da Saúde e a Classificação dos Corpos d'água e Padrão de Lançamento de Efluentes é encontrado nas Resoluções CONAMA nº 357/2005 e nº 430/2011 do Ministério do Meio Ambiente, respectivamente.

Parâmetros de qualidade são os diversos compostos presentes na água que alteram sua pureza. Podem ser de origem química, física ou biológica.

3.6.1 Cor

É um parâmetro físico, atribuído por sólidos dissolvidos decorrentes da decomposição da matéria orgânica ou presença de ferro e manganês na água, além do despejo de resíduos industriais e domésticos no corpo receptor. A cloração da água com alto teor de cor, pode formar alguns subprodutos cancerígenos de risco à saúde humana (VON SPERLING, 2005).

No valor da cor aparente, pode estar incluída a turbidez. O ideal é que na detecção da cor real, a amostra passe por um processo de centrifugação ou filtração antes da análise (VON SPERLING, 2005).

3.6.2 Turbidez

Parâmetro para medição do grau de transparência e de partículas em suspensão na água. É medido por meio do turbidímetro, equipamento emissor de feixes de luz. Sua unidade fixada é em NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez) (H2LIFE BRASIL, 2015).

Os sólidos em suspensão podem servir de abrigo para microrganismos patógenos, prejudicando o tratamento da água de abastecimento. Em corpos d'água podem reduzir a penetração de luz, causando eutrofização (VON SPERLING, 2005).

3.6.3 pH

Representa a concentração de íons hidrogênio (H^+) dando a condição de acidez, neutralidade ou alcalinidade da água. A faixa de pH é de 0 a 14 em uma escala antilogarítmica. O pH ácido apresenta potencial de corrosividade, já o pH elevado representa potencial de incrustação nas tubulações de abastecimento. O pH ideal da água para a vida aquática e para consumo é próximo do neutro (7) (VON SPERLING, 2005).

Sabe-se que na dessalinização por membranas o pH do permeado é geralmente abaixo de 6. Isso ocorre porque o dióxido de carbono passa pelas membranas e o hidrogenocarbonato é rejeitado e vai para o concentrado salino. Uma vez que o pH é regido pelo logaritmo da proporção de hidrogenocarbonato para dióxido de carbono, o pH da água do permeado é sempre baixo. Como consequência, a água é muito corrosiva em relação a

vários materiais, como amianto, cimento, aço galvanizado, aço, revestimento de cimento, cobre e latão. Portanto, é necessária a correção do pH do permeado (AL-KHATIB; ARAFAT, 2009).

3.6.4 Condutividade Elétrica

A análise de condutividade mede a capacidade da água conduzir a corrente elétrica. Depende das concentrações iônicas e da temperatura. Medidas de condutividade são importantes na área do reúso de águas especialmente na prática da irrigação, aquicultura e prevenção de corrosão. A condutividade é, também, uma medida importante na determinação de outros parâmetros analíticos, entre os quais a salinidade (OLIVEIRA, 1999).

Altos valores podem indicar características corrosivas da água (CETESB, 2009).

3.6.5 Alcalinidade

É uma medição da capacidade da água de resistir às alterações de pH. Este efeito tampão se deve à presença de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos na água. É importante sua quantificação em relação ao tratamento de coagulação da água de abastecimento, redução de dureza e prevenção da corrosão em tubulações (VON SPERLING, 2005).

3.6.6 Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)

São determinados como sólidos filtráveis. Seu alto teor pode afetar a qualidade da água e danificar equipamentos susceptíveis à corrosão. Os SDT compreendem sais inorgânicos (principalmente cálcio, magnésio, potássio, sódio, bicarbonatos, cloretos e sulfatos) e algumas pequenas quantidades de matéria orgânica dissolvida em água (ORAM, 2012).

No estudo realizado por Al-Khatib e Arafat (2009), o objetivo foi avaliar a qualidade físico-química e microbiológica da água potável durante um ano na Faixa de Gaza, Palestina. As amostras de água foram retiradas de cisternas de água de chuva, águas subterrâneas da rede de distribuição e água dessalinizada por OR. As concentrações de SDT foram mais baixas na água dessalinizada. O estudo revelou que a qualidade da água dessalinizada foi

melhor comparada às demais amostras, mas também que há necessidade de adotar melhores práticas de manutenção dos sistemas de armazenamento de água, pré e pós-tratamento nos sistemas de dessalinização.

3.6.7 Dureza total

É definida como a concentração de cátions multimetálicos em uma solução, principalmente os íons de cálcio e magnésio. O excesso de dureza reduz a formação de espuma na água. Pode causar incrustações nas tubulações de água quente em caldeiras e aquecedores devido à precipitação em temperaturas elevadas (VON SPERLING, 2005).

No estudo realizado por Abdalla *et al.* (2010), foi determinada a dureza e a concentração de cálcio e magnésio das águas subterrâneas da zona urbana e rural do município de Rosário-MA a fim de verificar sua potabilidade e possíveis restrições para uso industrial e/ou de irrigação. Os resultados das análises em 30 amostras de 16 poços artesianos mostraram que as águas subterrâneas locais são predominantemente de dureza branda a pouco dura, embora alguns poços tenham apresentado águas classificadas como pouco duras a duras, dependendo do período sazonal. Sob o ponto de vista da potabilidade, as águas subterrâneas locais não apresentaram restrições para consumo humano. No entanto, deve-se ter cuidado quanto ao uso em caldeiras.

3.6.8 Cloreto e Sulfato

O conjunto de sais normalmente dissolvidos em águas naturais é formado principalmente por bicarbonatos, cloretos, sulfatos e pode conferir sabor salino e propriedades laxativas na água (RICHTER, NETTO; 2002).

Cloretos são os íons resultantes do desprendimento de minerais, intrusão de águas salinas, despejos domésticos e industriais (VON SPERLING, 2005).

Anders *et al.* (2017) avaliou as características físico-químicas das águas de estações de tratamento por OR (água de poço, água dessalinizada e rejeito salino) no Oeste potiguar do Brasil. Foram investigados dez sistemas de dessalinização de água salobra por OR. As amostras foram coletadas para

determinação dos parâmetros de condutividade elétrica, Razão de Adsorção de Sódio (RAS), pH e os íons Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Na^+ e Ca^{2+} . Os resultados indicaram que as águas de poços e do rejeito salino de todas as comunidades apresentaram alto grau de restrição de uso para a irrigação quanto aos riscos de salinização e toxicidade de íons cloreto, sendo necessário o uso de práticas de manejo, como, por exemplo, o cultivo de plantas tolerantes à salinidade e a aplicação de fração de lixiviação de sais. Porém, concluíram que o permeado das águas dessalinizadas estavam adequados para fins irrigação.

3.6.9 Coliformes Totais e Termotolerantes

Os coliformes são bactérias que normalmente habitam os intestinos dos animais. A sua presença pode indicar contaminação por esgoto doméstico na água. A análise de coliformes é aplicada para controle do sistema de abastecimento, determinando a eficiência do tratamento (RICHTER; NETTO, 2002). A detecção e quantificação destes microrganismos pode ser realizada por vários métodos (DANIEL, 2001).

Os coliformes termotolerantes não são tão bons indicadores de contaminação fecal quanto à *Escherichia coli* (E. coli), mas seu uso é aceitável para avaliação da qualidade da água. Na legislação brasileira, os coliformes fecais são utilizados como padrão para qualidade microbiológica de águas superficiais destinada ao abastecimento, recreação, irrigação e piscicultura (CETESB, 2009).

3.7 PRINCIPAIS PARÂMETROS OPERACIONAIS NA DESSALINIZAÇÃO

3.7.1 Pressão Osmótica

A pressão osmótica é a pressão necessária para que um solvente (água) deixe uma solução (água salina do mar, águas residuais, água salobra) e permeie através da membrana (SAGLE; FREEMAN, 2004).

Os processos de OR são mais afetados do que outros processos de dessalinização porque a pressão osmótica é diretamente proporcional à concentração de salinidade da água de alimentação. Quanto maior a

concentração de sais maior será a pressão osmótica, o que requer maior diferença de pressão transmembrana para fazer com que a água de alimentação do sistema permeie através da membrana. As maiores diferenças de pressão transmembrana requerem mais energia elétrica, portanto aumentando o consumo geral de energia. No entanto, estudos econômicos relatam que a tecnologia de dessalinização por OR consome menos energia comparada aos processos de destilação (MSF e MED) (SAGLE; FREEMAN, 2004).

3.7.2 Taxa de Filtração

Nos sistemas de OR a taxa de filtração será igual à quantidade em volume de permeado que será tratado por metro quadrado de membrana em um determinado tempo (Equação 1) (PURETEC INDUSTRIAL WATER, 2016).

$$\phi = (V_P / t) / (n_m \cdot A_m) \quad (1)$$

Em que:

ϕ = taxa de filtração (L.h⁻¹.m⁻²);

V_P = volume de permeado (L);

t = tempo (h);

n_m = número de membranas no sistema de OR;

A_m = área superficial da membrana (m²).

3.7.3 Taxa de Recuperação

A recuperação do sistema refere-se a vazão da água de alimentação convertida em água purificada e depende de vários fatores, como a formação de *scaling* (precipitação de sais) na superfície das membranas, a pressão osmótica e a qualidade do permeado (Equação 2) (MOURA, 2008).

$$r = (Q_p/Q_a) \times 100 \quad (2)$$

Em que:

r = taxa de recuperação do sistema (%);

Q_p = vazão da água produzida ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$);

Q_a = vazão da água de alimentação ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$).

Com o aumento do nível de recuperação do sistema, mais água é convertida em produto, isto reduz o volume da água a ser rejeitada e conseqüentemente aumenta o valor da concentração de sais dissolvidos na corrente do concentrado, assim como a possibilidade de sua precipitação na superfície da membrana (MOURA, 2008).

4- METODOLOGIA

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

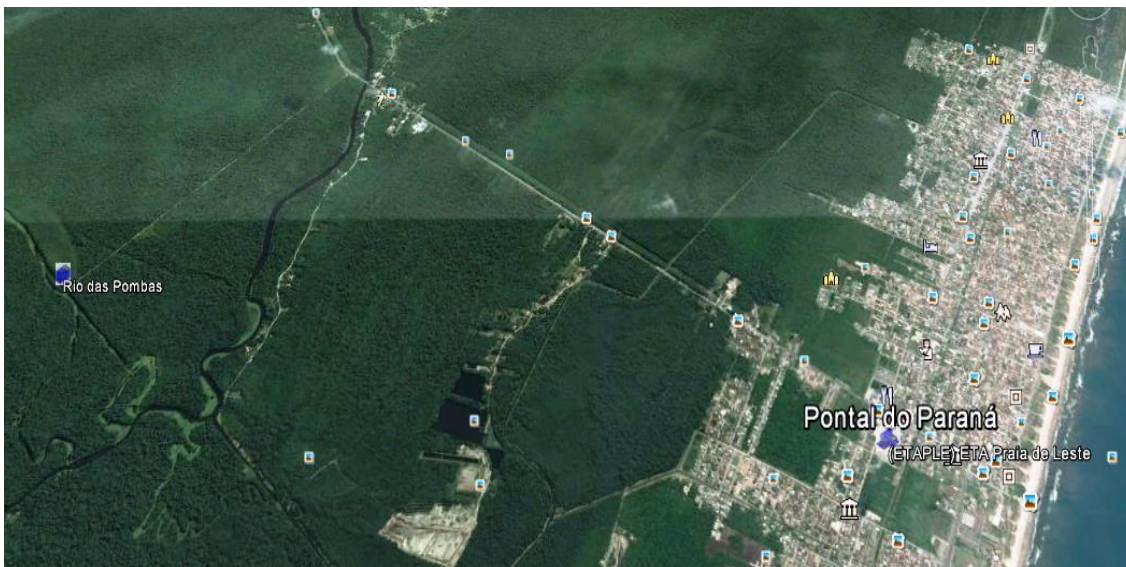
Praia de Leste é um dos 48 balneários que fazem parte do município de Pontal do Paraná, fruto do desmembramento do Município de Paranaguá. Situa-se no litoral do Paraná a uma distância de aproximadamente 100 km de Curitiba, tendo como atividades econômicas principais o turismo, comércio, pesca e artesanato. O município faz divisas ao Sul com o município de Matinhos, a Oeste com o Município de Paranaguá e a leste e norte é banhado pelo Oceano Atlântico, sendo a norte pela baía de Paranaguá (PREFEITURA MUNICIPAL DE PONTAL DO PARANÁ, 2015).

O município de Pontal do Paraná enquadra-se na planície costeira de Praia de Leste, caracterizando-se por um relevo bastante suave e de baixa altitude, que recebe a designação genérica de restinga. O período mais chuvoso é o verão, sendo o mês de fevereiro o que apresenta maior precipitação (350 mm). No período mais seco, o inverno, a precipitação é de 100 mm (mensal), sendo a precipitação média anual do Município de Pontal do Paraná em torno de 2.000 mm (PREFEITURA MUNICIPAL DE PONTAL DO PARANÁ, 2015).

Considerando os dados do IBGE (2015), Pontal do Paraná possui uma área de 199,847 km² e cerca de 20.920 habitantes. Porém, como característica da cidade e conforme o Conselho do Litoral (COLIT, 2004) está o contraponto entre população residente e população flutuante (domicílios de uso eventual). Essa movimentação de veranistas impacta de forma significativa na prestação de serviços básicos (FARIA *et al.* 2015).

A água de abastecimento de Praia de Leste é proveniente do rio das Pombas, um afluente do rio Guaraguaçu. A captação está a aproximadamente 10 km de distância da ETA da Sanepar, conforme apresentado na Figura 3. O tratamento é do tipo convencional, que contempla as etapas de coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e correção de pH.

Figura 3 – Localização da estação de tratamento de água da Sanepar e do rio das Pombas



Fonte: Sanepar, adaptado de Google Earth, 2017

4.2 LOCAL DE INSTALAÇÃO E DESCRIÇÃO DO SISTEMA PILOTO DE DESSALINIZAÇÃO

O sistema piloto de dessalinização foi instalado nas dependências da ETA de Praia de Leste, que pertence à Sanepar. Conforme representado na Figura 4, o sistema de abrandamento e OR foram montados dentro de um container fornecido pela empresa Permution.

A captação da água do rio das Pombas para o sistema piloto foi feita pela tubulação adutora da ETA adaptada a uma mangueira.

A coleta de água do mar foi realizada no Centro de Aquicultura Marinha e Repovoamento (CAMAR) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) em Pontal do Paraná e encaminhada a Sanepar por meio de caminhão pipa.

O sistema de alimentação foi composto por 3 tanques com capacidade de 10000 L cada, nos quais eram armazenadas água do rio das Pombas, água do mar e água salobra.

Para obtenção da água salobra como água de alimentação do sistema de dessalinização, foi realizada a mistura da água do rio das Pombas com a água do mar, pela bomba de recirculação, atingindo uma concentração de SDT de $1500 (\pm 100) \text{ mg.L}^{-1}$, devido à especificação do equipamento de OR.

Figura 4 – Instalação piloto de dessalinização



Fonte: Adaptado de ALMEIDA (2017)

Hidrômetros na saída dos tanques de água do rio e de água do mar foram instalados para controlar o volume necessário para obter a água salobra com as concentrações desejadas de SDT. A partir do tanque de mistura, a água salobra era enviada para o sistema de ultrafiltração por bombeamento.

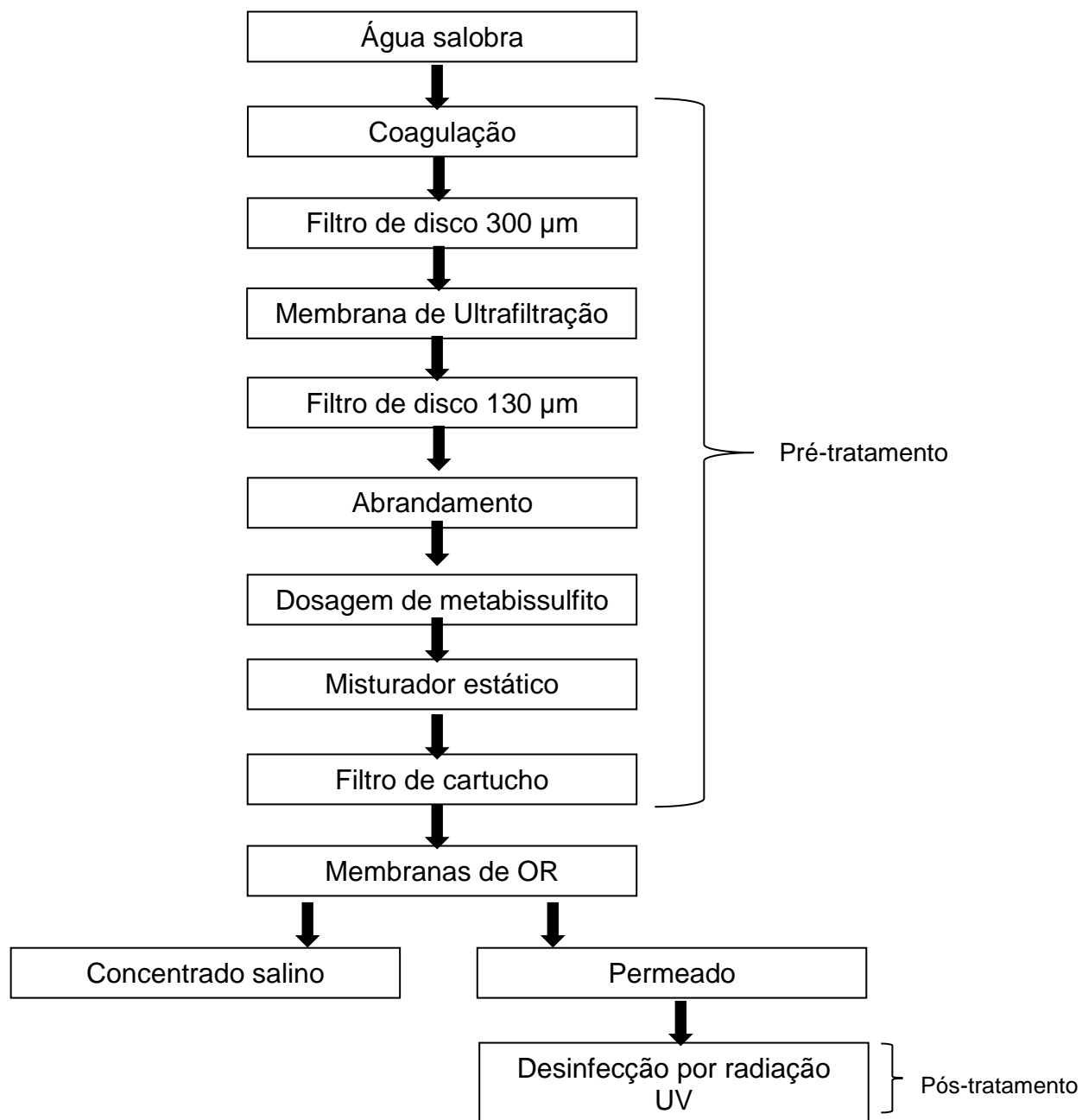
A água salobra foi coagulada em linha com cloreto de polialumínio (PAC) e seguia para o processo de ultrafiltração com uma membrana de escoamento vertical ascendente. O permeado da UF era encaminhado para o sistema de OR composto por cinco membranas de escoamento horizontal.

O sistema de dessalinização de água salobra operou por aproximadamente 3h por dia devido à capacidade de armazenamento de água.

A rede da Companhia Paranaense de Energia (COPEL) supriu toda a energia necessária para os sistemas.

As etapas do processo de dessalinização estão descritas em ordem na Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma das etapas do processo de dessalinização



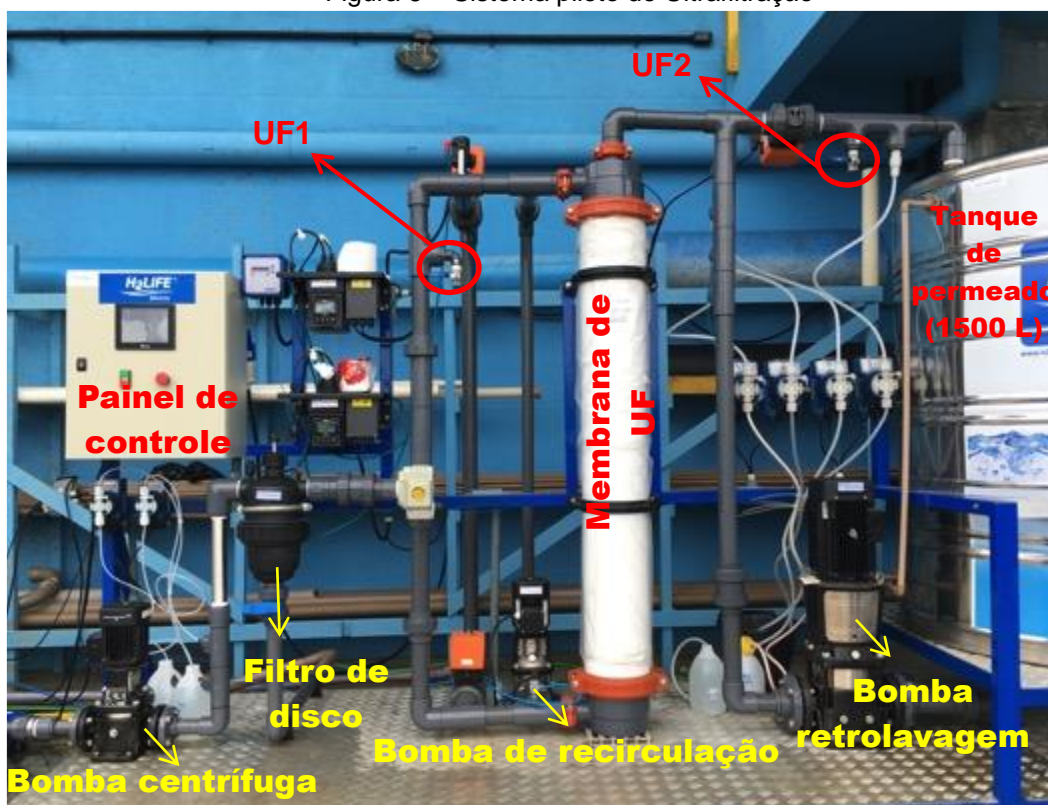
4.2.1 Ultrafiltração (UF)

O sistema foi composto por: 2 tanques de 60 litros cada, com misturador e bomba dosadora de coagulante; painel de controle; bomba centrífuga; dosadora de ácido ou base para controle de pH; sensor de pH; misturador estático para promover a mistura de produtos químicos na água; pré-filtro (300 µm); 2 medidores de turbidez, um de 0-1000 NTU (para água bruta) e

um de 0-100 NTU (para água permeada); membrana de UF (64 m²); bomba centrífuga para recirculação; bombas de dosagem para a retrolavagem química; dosadora para cloro residual; bomba de retrolavagem e tanque de permeado de 1500L (aço inoxidável) com sensor de nível.

A Figura 6 apresenta o sistema de pré-tratamento indicando os principais componentes. A membrana hidrofílica da UF é composta por uma mistura de polivinilpirrolidona e polietersulfona. Possui um tamanho de poro nominal de 20 nm e uma estrutura assimétrica microporosa.

Figura 6 – Sistema piloto de Ultrafiltração



A água salobra era bombeada do tanque de mistura e variava-se a dosagem de coagulante, de acordo com sua cor, turbidez e pH. A água já coagulada passava por um pré-filtro de 300 µm, com o objetivo de reter as impurezas de maior peso molecular e na saída do pré-filtro eram coletadas amostras (ponto de coleta UF1, Figura 6). Em seguida, a água coagulada passava pela membrana de UF e eram coletadas amostras da água permeada

para análises (ponto de coleta UF2, Figura 6). A água permeada da UF era armazenada no reservatório de 1500 L para alimentação do sistema de OR.

O fluxo de água na membrana de UF era alternado automaticamente a cada 30 min de operação a partir de válvula de controle para a execução das limpezas hidráulicas (retrolavagens). Durante a limpeza era possível recircular a água (permeado) utilizada para a lavagem da membrana, com auxílio da bomba centrífuga. Os resíduos das retrolavagens da membrana de UF seguiam para o tanque de lodo da ETA da Sanepar.

Além das limpezas hidráulicas, era possível realizar as limpezas químicas programadas, conforme a necessidade, descritas a seguir:

- CEB A: limpeza química com hidróxido de sódio 10%, seguida de retrolavagem com água permeada. Essa limpeza era programada para ser realizada automaticamente a cada 100 ciclos de operação. Cada ciclo equivale a 30 min de operação.
- CEB B: limpeza química com dosagem de ácido clorídrico 10%, seguida de retrolavagem com água permeada. Era realizada automaticamente a cada 200 ciclos de operação.

4.2.2 Osmose Reversa (OR)

Conforme o manual do fabricante (PERMUTION, 2016), o sistema de OR pode operar com temperatura máxima de até 40°C; rejeição média de sais $\geq 95\%$; taxa de recuperação média = 75%; características da água de alimentação: condutividade $\leq 2000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; SDT $\leq 1600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; pH de 4 a 10; cloreto $\leq 800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; dureza total $\leq 300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

O sistema era composto por: filtro de disco (130 μm); bomba centrífuga com pressurizador; 2 colunas para abrandamento com resina catiônica; 1 tanque de regenerante contendo cloreto de sódio não iodado com capacidade para 200 kg; 3 tanques de 100 L cada, com misturadores e bombas dosadoras de anti-escalantes, anti-incrustantes e metabissulfito de sódio; misturador estático; filtro de cartucho (5 μm); 5 unidades de membranas de poliamida enrolada em espiral com poros de 1 nm modelo VONTRON LP-21-4040; 5 medidores de pressão; 3 medidores de vazão; sistema CIP (*Clean in Place*) com tanque de 200 L e bomba centrífuga; sistema de desinfecção UV com 1

lâmpada de 39W, temperatura máxima de 60°C, comprimento de onda de 185-254 nm, dosagem de até 30000 $\mu\text{Ws.cm}^{-2}$; desinfecção com cloro em tanque de 100 L misturador e bomba dosadora; 3 controles de ORP com sensores; 1 medidor de condutividade com sensor; painel de controle com armazenamento de dados.

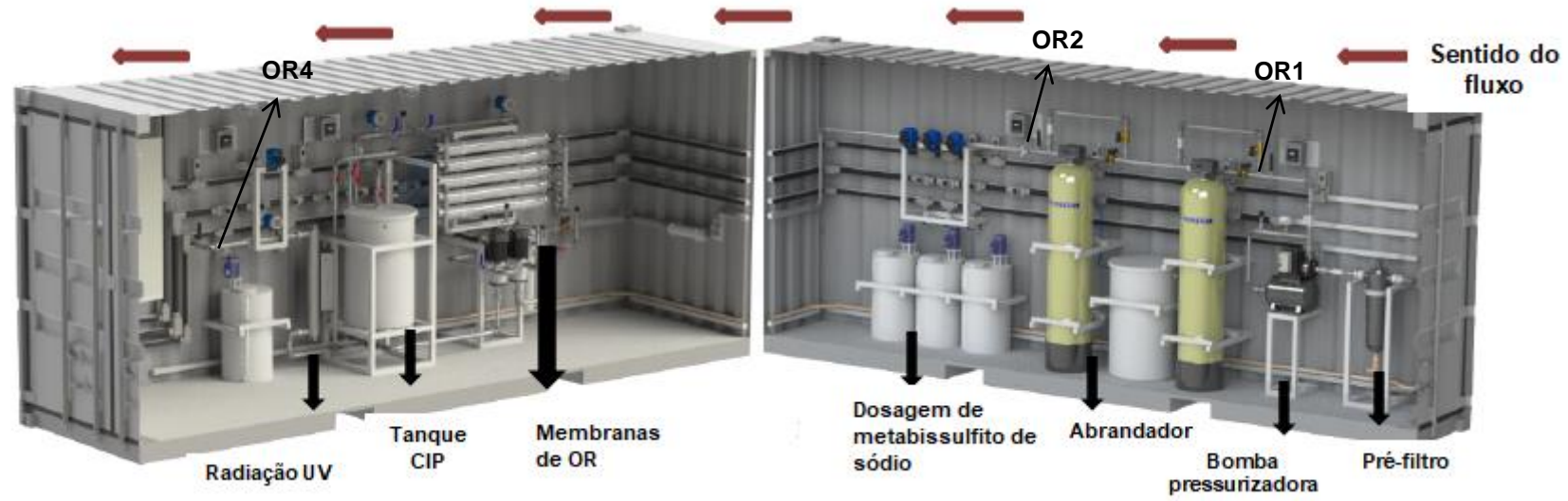
O sistema de OR possui 4 pontos de amostragem de água conforme apresentados na Figura 7, porém, apenas amostras de água dos pontos OR1, OR2 e OR4 foram analisados. Conforme dados obtidos por Almeida (2017), as amostras coletadas nos pontos OR3 e OR4 apresentaram características similares. Portanto, somente as amostras do ponto de coleta OR4 foram analisadas.

O permeado da UF era bombeado ao filtro de disco e passava pelo sistema de abrandamento para remoção de dureza. Após o abrandamento, era dosado continuamente 2 mL.min^{-1} de metabissulfito de sódio 10% na água abrandada para proteger as membranas de OR. Com o auxílio de uma bomba de alta pressão, a água seguia para as membranas de OR. A saída do permeado da OR era pelo canal central da membrana o qual era direcionado à desinfecção por radiação UV com a finalidade de inativar microrganismos.

Tanto o permeado quanto o concentrado eram armazenados em tanques com capacidade de 5000 L. A cada final de operação era realizada a limpeza das membranas (CIP) no sistema de OR unicamente com a água permeada. Quando o sistema permanecia em repouso por mais de 2 dias, era dosado 20 mL.min^{-1} de metabissulfito durante 10 min de operação. A água de limpeza e a água de regeneração do abrandador seguiam para o tanque do concentrado salino. A cada 12h de operação era realizada a regeneração dos abrandadores automaticamente.

A Figura 7 apresenta as etapas do processo de dessalinização por OR.

Figura 7 – Sistema piloto de Osmose Reversa



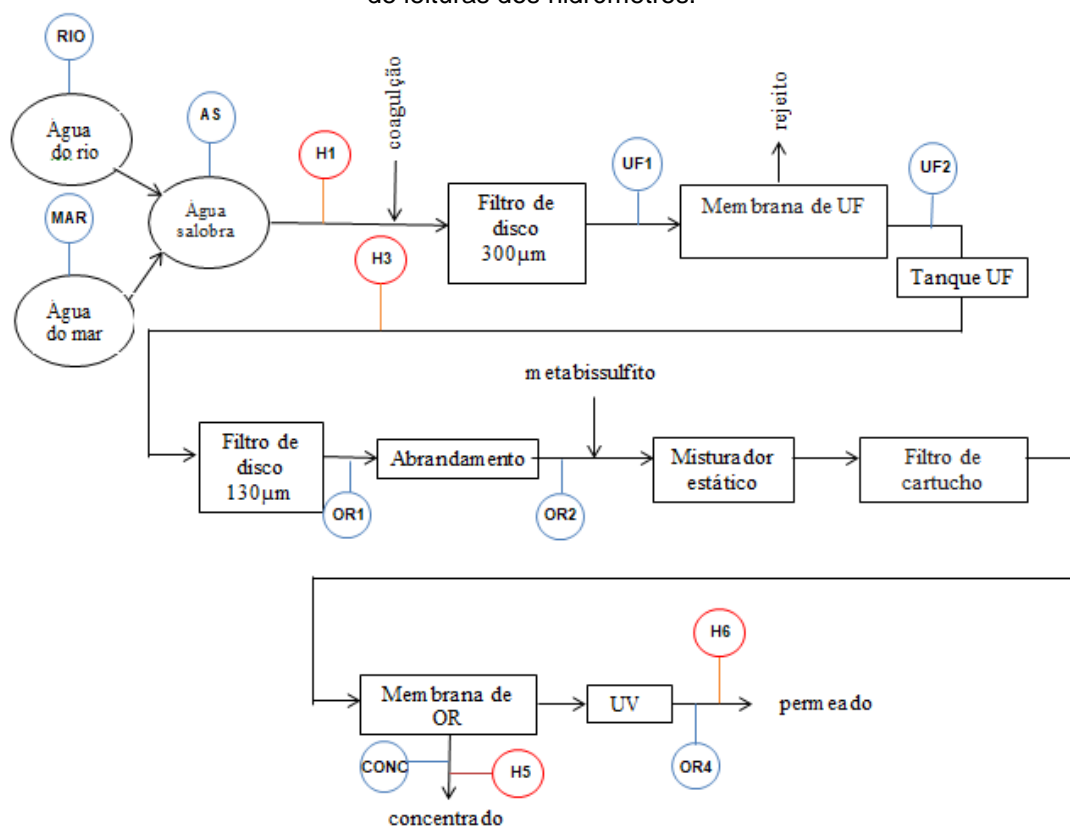
Fonte: Adaptado de PERMUTION (2016)

4.3 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA

A qualidade da água foi monitorada em 9 pontos de coleta, conforme apresentado na Figura 8 em azul, sendo RIO = água do rio; MAR = água do mar; AS = água salobra; UF1 = ultrafiltração 1 (após coagulação); UF2 = ultrafiltração 2 (após membrana de UF); OR1 = osmose reversa 1 (antes do abrandamento); OR2 = osmose reversa 2 (após abrandamento); OR4 = osmose reversa 4 (após desinfecção por UV); CONC = concentrado salino.

Os 4 hidrômetros monitorados também estão representados na Figura 8 em vermelho, sendo H1 = hidrômetro de entrada da UF, H3 = hidrômetro de entrada da OR, H5 = hidrômetro do concentrado salino e H6 = hidrômetro do permeado da OR. Por meio da leitura dos volumes, foi possível calcular as vazões médias de entrada e de saída, bem como a taxa de recuperação e a taxa de filtração.

Figura 8 – Diagrama global do sistema indicando os pontos de coleta de amostras e de leituras dos hidrômetros.



Além dos parâmetros físico-químicos listados no Quadro 2, também foram realizadas análises microbiológicas de coliformes totais e de *E. coli* nos pontos AS, UF2 e OR4 pelo método Colilert® uma vez por semana de operação, conforme estipulado pela Sanepar.

Para as análises físico-químicas foram coletadas de cada ponto aproximadamente 1,2 L de amostra e para as análises microbiológicas, foram coletadas 100 mL de amostra de cada ponto.

Os ensaios microbiológicos, leituras de pH, turbidez, condutividade, temperatura e SDT foram realizados *in loco*. O Quadro 1 apresenta a acurácia de cada equipamento utilizado para as análises de pH, turbidez, SDT, condutividade elétrica, temperatura e cor aparente.

Quadro 1 – Acurácia dos equipamentos utilizados

Parâmetro	Equipamento	Método	Marca	Modelo	Acurácia
pH	pHmetro	Potenciométrico	GEHAKA	PG 2000	± 0,02 %
Turbidez (NTU)	Turbidímetro	Nefelométrico	HACH	2100 Q	± 2 %
SDT (ppm)	Ultrameter	*	MYRON L [®] COMPANY	6 PSI & 4P	± 1 %
Condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Ultrameter	Eletrólise	MYRON L [®] COMPANY	6 PSI & 4P	± 1 %
Temperatura (°C)	Ultrameter	*	MYRON L [®] COMPANY	6 PSI & 4P	± 0,1°C
Cor aparente (uH)	Colorímetro	Colorimétrico	DIGIMED	DM	± 3 % + 1 Pt-Co

Fonte: DIGIMED (2018); GEHAKA (2018); HACH (2018); MYRON L[®] COMPANY (2018)

(*) os resultados de SDT e de temperatura foram compensados pelos resultados de condutividade elétrica no Ultrameter.

As amostras foram encaminhadas aos laboratórios de recursos hídricos e de saneamento e instalações hidráulicas da UEPG para a determinação dos demais parâmetros, seguindo a metodologia de APHA, 1999.

Quadro 2 – Pontos de coleta de amostra, parâmetros físico químicos de monitoramento e frequência de amostragem.

Ponto de coleta	Parâmetros	Frequência
Água salobra	Turbidez, cor aparente, SDT, condutividade, pH, alcalinidade, temperatura, dureza, Ca, SO ₄ ⁻ , Cl ⁻	3x dia
Concentrado salino		
UF1	Turbidez, SDT, condutividade, pH, temperatura	3x dia
UF2	Turbidez, cor aparente, SDT, condutividade, pH, alcalinidade, temperatura, dureza, Ca, SO ₄ ⁻ , Cl ⁻	3x dia
OR1, OR2 e OR4	Turbidez, cor aparente, SDT, condutividade, pH, alcalinidade, temperatura, dureza, Ca, SO ₄ ⁻ , Cl ⁻	3x dia
Água do rio e água do mar	Turbidez, cor aparente, SDT, condutividade, pH, temperatura	1x dia

4.4 CONSIDERAÇÕES OPERACIONAIS

Este trabalho foi realizado alternadamente com outro trabalho de mestrado que teve como objetivo principal avaliar o balanço de massa do sistema piloto de dessalinização em Praia de Leste.

Após o enchimento do tanque de mistura com a água do rio e do mar, realizava-se a recirculação continuamente. Antes do início do experimento, eram anotadas as leituras dos hidrômetros e a concentração de SDT era ajustada a 1500 (\pm 100) mg.L⁻¹.

A solução de cloreto de polialumínio foi diluída a 10% e homogeneizada para utilização nos experimentos como coagulante da água salobra no sistema de UF com a finalidade de promover a aglomeração das impurezas suspensas e coloidais. A cada meia hora de operação a UF fazia automaticamente uma retrolavagem com o permeado do próprio sistema.

Foram realizadas 3 coletas por dia, a cada 1 hora de operação. As amostras eram coletadas em frasco plástico e armazenadas em caixa de isopor para envio até a UEPG.

Durante a regeneração do abrandador não foram realizadas coletas de amostras.

Os sistemas de UF e de OR eram operados ao mesmo tempo. O horário de início e fim de operação era registrado para que pudesse ser calculada a vazão.

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Cada amostra foi coletada três vezes ao dia durante a primeira (A), segunda (B) e terceira (C) hora de operação, e foram realizadas 60 análises de cada amostra, para cada parâmetro, exceto para a água do rio e para a água do mar, que foram analisadas uma vez ao dia, totalizando 20 análises de cada amostra, para cada parâmetro.

Devido à variação da qualidade da água do rio das Pombas e, conseqüentemente, da água salobra durante os dias de operação, foi utilizada a estatística descritiva, com medidas de tendência central (média e mediana) e medidas de dispersão (amplitude, desvio padrão, variância e coeficiente de variação). As medidas de variância, desvio padrão e coeficiente de variação tem a média como ponto de referência. Todos os cálculos e gráficos foram realizados por meio do software Excel 2010.

De modo geral, emprega-se a média aritmética quando a distribuição dos dados é simétrica, ou nos casos em que se utiliza o cálculo de outras estatísticas. O cálculo da mediana é utilizado quando se deseja encontrar o ponto que divide a distribuição em duas partes iguais, ou nos casos em que na distribuição dos dados existam valores muito distanciados dos demais (valores extremos) (AZEVEDO, 2016).

5- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Segundo Moura *et al.* (2008), a água de alimentação é o elemento principal para a produção de água doce em sistemas de dessalinização e sua qualidade depende diretamente do tipo de fonte hídrica que abastece o sistema. A composição físico-química da água subterrânea tem menor índice de variação, durante as diferentes estações do ano, do que a água superficial. As águas superficiais (rios, mares) são caracterizadas pelo nível de sólidos suspensos, atividade microbiana e variações climáticas.

5.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO DO SISTEMA

A Tabela 1 apresenta algumas características da água do rio das Pombas, da água do mar e da água salobra durante o período experimental.

Tabela 1 – Variação dos parâmetros da água do rio, da água do mar e da água salobra

Parâmetro	Água do rio	Água do mar	Água salobra (AS)
Turbidez (NTU)	2,07 – 8,41	0,18 – 0,55	2,13 – 7,98
Cor aparente (uH)	5,2 – 153,0	0,0 – 2,2	4,3 – 137,0
SDT (mg.L ⁻¹)	21,45 – 53,29	42420 – 51730	1433 - 1577
Condutividade elétrica (μS.cm ⁻¹)	34,00 – 84,25	40410 – 48070	1993 – 2170
pH	5,59 – 6,76	7,94 – 8,10	6,43 – 7,13

Nota: Foram analisadas 20 amostras de água do rio, 20 amostras de água do mar e 60 amostras de água salobra para cada parâmetro

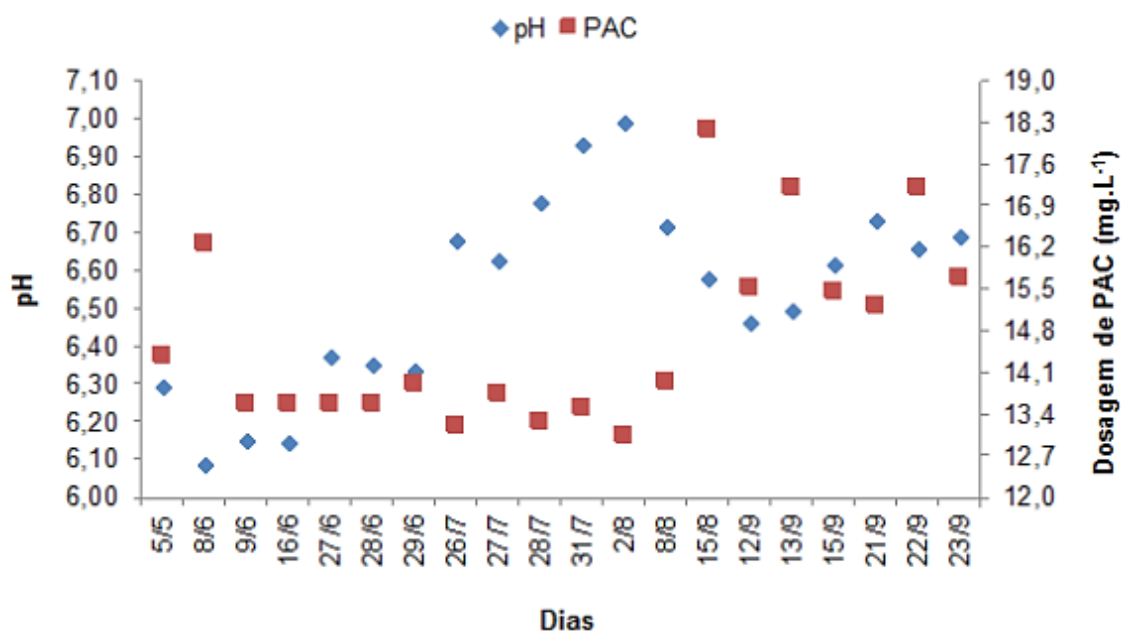
Analisando a Tabela 1, pode-se observar que a cor aparente foi o parâmetro que apresentou a maior amplitude de variação (147,8 uH) para a água do rio e, conseqüentemente, para a água salobra (132,7 uH).

De acordo com a Sanepar, nos períodos de estiagem a cor aparente do rio das Pombas aumenta, causando variações na qualidade da água bruta que abastece a ETA. Há também a presença de ácidos húmicos e fúlvicos decorrentes da decomposição da matéria orgânica que alteram as características físico-químicas e biológicas da água do rio e, conseqüentemente, da água salobra.

5.2 DOSAGEM DE COAGULANTE E pH DE COAGULAÇÃO

O Gráfico 1 apresenta os resultados médios de pH das amostras de água salobra coletadas no ponto UF1 (antes da membrana de UF) em função da dosagem de coagulante, durante os 20 dias de operação.

Gráfico 1 – pH de coagulação em função da dosagem de coagulante



O coagulante é um composto ácido, portanto, após a dosagem de PAC, o pH da água salobra baixava. Durante o período de operação não foi necessário realizar a correção do pH após a dosagem do coagulante. O pH médio de coagulação foi de 6,53.

A dosagem variou conforme a concentração da solução do PAC fornecida pelo fabricante, conforme a turbidez e cor aparente, vazão média de entrada e pH da água salobra.

A dosagem de PAC variou de 13 a 18,2 mg.L⁻¹, com média de 14,7 mg.L⁻¹. No estudo realizado por Almeida (2017), a dosagem de coagulante na água salobra com 1500 (\pm 100) mg.L⁻¹ de SDT obteve média de 18,63 mg.L⁻¹. Porém, esse experimento foi realizado nos meses de setembro a dezembro, sendo observado pouca variação em relação ao pH e a cor aparente da água do rio das Pombas.

5.3 ENSAIOS MICROBIOLÓGICOS

Segundo a Portaria nº 2.914 (BRASIL, 2011), o padrão de potabilidade é um conjunto de valores máximos permitidos como parâmetros de qualidade da água para consumo humano.

O presente trabalho é de caráter investigativo e não visa determinar a potabilidade do permeado do sistema de dessalinização, visto que o permeado não passou pelo processo de remineralização, correção de pH, cloração e fluoretação. Os dados do presente trabalho são insuficientes para determinar se o permeado é próprio para consumo humano ou que não apresenta risco à saúde, pois não foram realizados todos os ensaios exigidos pela Portaria nº 2.914 (BRASIL, 2011), tais como: compostos orgânicos e inorgânicos, agrotóxicos, desinfetantes e produtos secundários da desinfecção, cianotoxinas, cianobactérias, radioatividade, dentre outros.

De acordo com a Tabela 2, pode-se verificar que o sistema de UF removeu os coliformes totais e *E. coli* da água salobra, e que também não houve recontaminação ou presença destes microrganismos no permeado do sistema de OR após a etapa de desinfecção por radiação UV.

É válido ressaltar que a Portaria nº 2.914 (BRASIL, 2011) exige ausência de coliformes totais e *E. coli* na água para consumo humano.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios microbiológicos

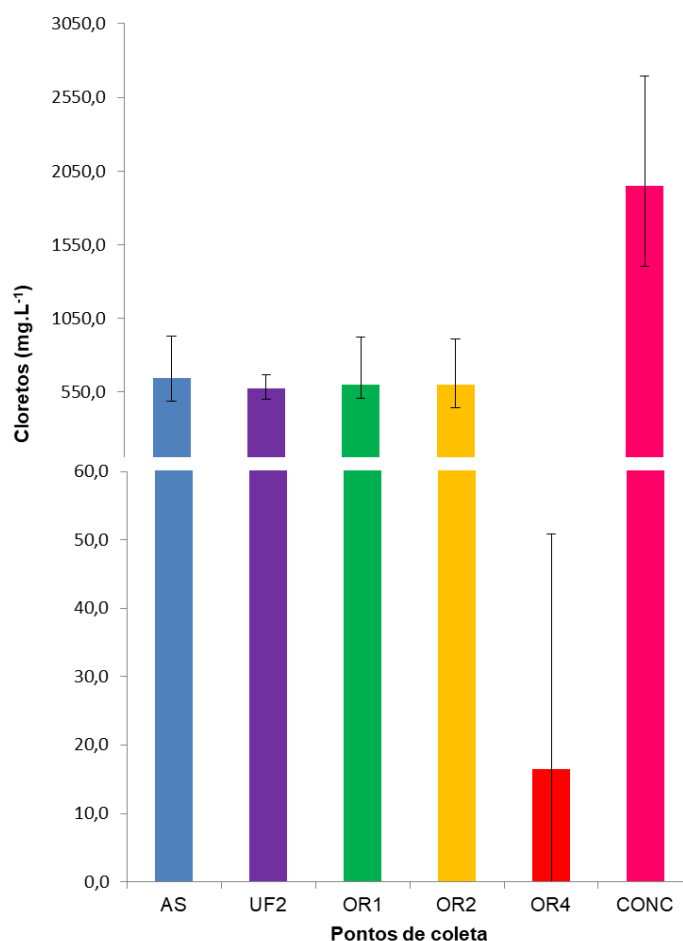
AMOSTRAS	RESULTADOS			
	08/06/17	29/06/17	27/07/17	22/09/17
Água salobra (AS)				
Coliformes totais (NMP/100 mL)	2143	3654	3130	4352
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	10	41	<1	10
Permeado da UF (UF2)				
Coliformes totais (NMP/100 mL)	<1	<1	<1	<1
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	<1	<1	<1	<1
Permeado da OR (OR4)				
Coliformes totais (NMP/100 mL)	<1	<1	<1	<1
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	<1	<1	<1	<1

5.4 ENSAIOS QUÍMICOS

5.4.1 Cloreto

Conforme o Gráfico 2, a concentração de cloreto presente na água salobra não foi removida no pré-tratamento por UF e nem no sistema de abrandamento. A concentração de cloreto da água salobra acumulou no concentrado salino após a passagem pela membrana de OR.

Gráfico 2 – Concentrações médias, máximas e mínimas de cloreto



AS = água salobra; UF2 = permeado da UF; OR1 = ponto de coleta antes do abrandamento; OR2 = ponto de coleta após abrandamento; OR4 = permeado da OR; CONC = concentrado salino

A remoção média de cloreto da água salobra para o permeado da OR foi de 97,4%. No estudo realizado por Almeida (2017), a eficiência de remoção média de cloreto na OR foi de 99,5%. Comparando os resultados com o padrão

de potabilidade, a água do permeado da OR está com uma concentração abaixo do valor máximo permitido de 250 mg.L^{-1} de cloreto.

A Tabela 3 apresenta os resultados mínimo e máximo, da média, mediana, desvio padrão, variância e coeficiente de variação da concentração de cloreto nas diferentes amostras analisadas.

Tabela 3 – Dados estatísticos das concentrações de cloreto

	AS	UF2	OR1	OR2	OR4	CONC
MÉDIA	645,1	577,6	603,0	602,9	16,5	1950,3
MEDIANA	597,0	554,9	587,1	591,8	13,9	1726,3
DP	137,6	48,7	84,4	86,0	12,8	427,8
VAR	18938,3	2369,2	7116,0	7403,1	164,7	182998,7
MÍN	489,0	502,1	510,8	445,3	<1	1402,5
MÁX	930,9	666,5	924,2	910,1	50,9	2693,6
CV (%)	21,3	8,4	14,0	14,3	77,8	21,9

AS = água salobra; UF2 = permeado da UF; OR1 = ponto de coleta antes do abrandamento; OR2 = ponto de coleta após abrandamento; OR4 = permeado da OR; CONC = concentrado salino; DP = desvio padrão; VAR = variância; CV = coeficiente de variação

A partir da análise estatística, constatou-se elevado coeficiente de variação (77,8 %) em relação ao permeado da OR. Porém, não pode-se afirmar que esse grupo de dados é heterogêneo, ou seja, que possui alta variabilidade em relação à média de cloreto, pois a média e a mediana apresentaram valores muito próximos.

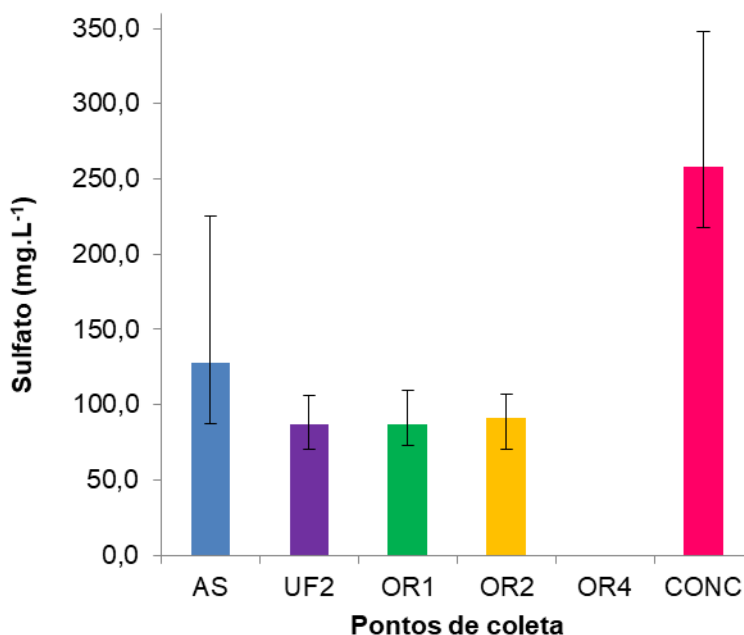
Os maiores desvios padrões foram encontrados nas amostras de água salobra e de concentrado salino devido a variação das características físico-químicas do rio.

5.4.2 Sulfato

O Gráfico 3 apresenta as concentrações médias, mínimas e máximas de sulfato nos diferentes pontos de amostragem.

Pode-se observar a remoção de sulfato apenas após o sistema de OR, assim como ocorreu para o parâmetro de cloreto. A eficiência de remoção foi de 100% na OR, já no trabalho realizado por Almeida (2017), a remoção de sulfato no permeado da OR foi de 99,1% para a concentração de $1500 (\pm 100) \text{ mg.L}^{-1}$ de SDT na água salobra.

Gráfico 3 – Concentrações médias, máximas e mínimas de sulfato



AS = água salobra; UF2 = permeado da UF; OR1 = ponto de coleta antes do abrandamento; OR2 = ponto de coleta após abrandamento; OR4 = permeado da OR; CONC = concentrado salino

A Tabela 4 apresenta os dados estatísticos de sulfato em relação aos diferentes pontos de amostragem. A água salobra apresentou o maior coeficiente de variação (35,4%) e o maior desvio padrão (45,3 mg.L⁻¹). Esta variação pode ser explicada devido à mudança das características da água do rio das Pombas nos períodos de estiagem, alta precipitação, ou maré alta, visto que o sulfato está presente em águas naturais, e em grande quantidade na água do mar, assim como o cloreto.

A concentração de sulfato removida pela OR se aglomerou no concentrado salino. Porém, o permeado da OR não apresentou concentrações significativas de sulfato. O valor de sulfato máximo permitido em água potável é de 250 mg.L⁻¹ (BRASIL, 2011).

Tabela 4 – Dados estatísticos das concentrações de sulfato

	AS	UF2	OR1	OR2	OR4	CONC
MÉDIA	127,8	86,6	86,9	91,3	<1	258,3
MEDIANA	101,3	86,9	86,3	91,7	<1	250,0
DP	45,3	6,2	7,1	7,2	<1	28,6
VAR	2053,0	38,4	50,8	52,6	<1	818,5
MÍN	87,7	70,7	73,1	70,7	<1	217,5
MÁX	225,3	105,9	109,4	106,6	<1	347,8
CV (%)	35,4	7,2	8,2	7,9	<1	11,1

AS = água salobra; UF2 = permeado da UF; OR1 = ponto de coleta antes do abrandamento; OR2 = ponto de coleta após abrandamento; OR4 = permeado da OR; CONC = concentrado salino; DP = desvio padrão; VAR = variância; CV = coeficiente de variação

5.4.3 Condutividade Elétrica e Sólidos Dissolvidos Totais

Sabe-se que os índices de SDT e de condutividade elétrica são proporcionais, ou seja, quanto maior a concentração de SDT de uma solução, maior a sua condutividade elétrica.

Os resultados de SDT e de condutividade elétrica para o concentrado salino variaram em função da água de alimentação do sistema e também em função da movimentação da válvula do fluxo do concentrado salino do equipamento de OR, devido a outra aluna de mestrado ter operado o sistema alternadamente a este trabalho.

No primeiro dia de operação, a coleta do concentrado salino para análise foi realizada no tanque de armazenamento contendo o rejeito do processo de regeneração dos abrandadores, que aumentou o teor de SDT e de condutividade elétrica da amostra. Após o primeiro dia de operação, foi instalada uma torneira de coleta na tubulação do concentrado salino, logo após o hidrômetro. Isso explica o valor médio de $6819 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ de condutividade elétrica e de $5403 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de SDT no dia 05/05/17, valores maiores que os demais.

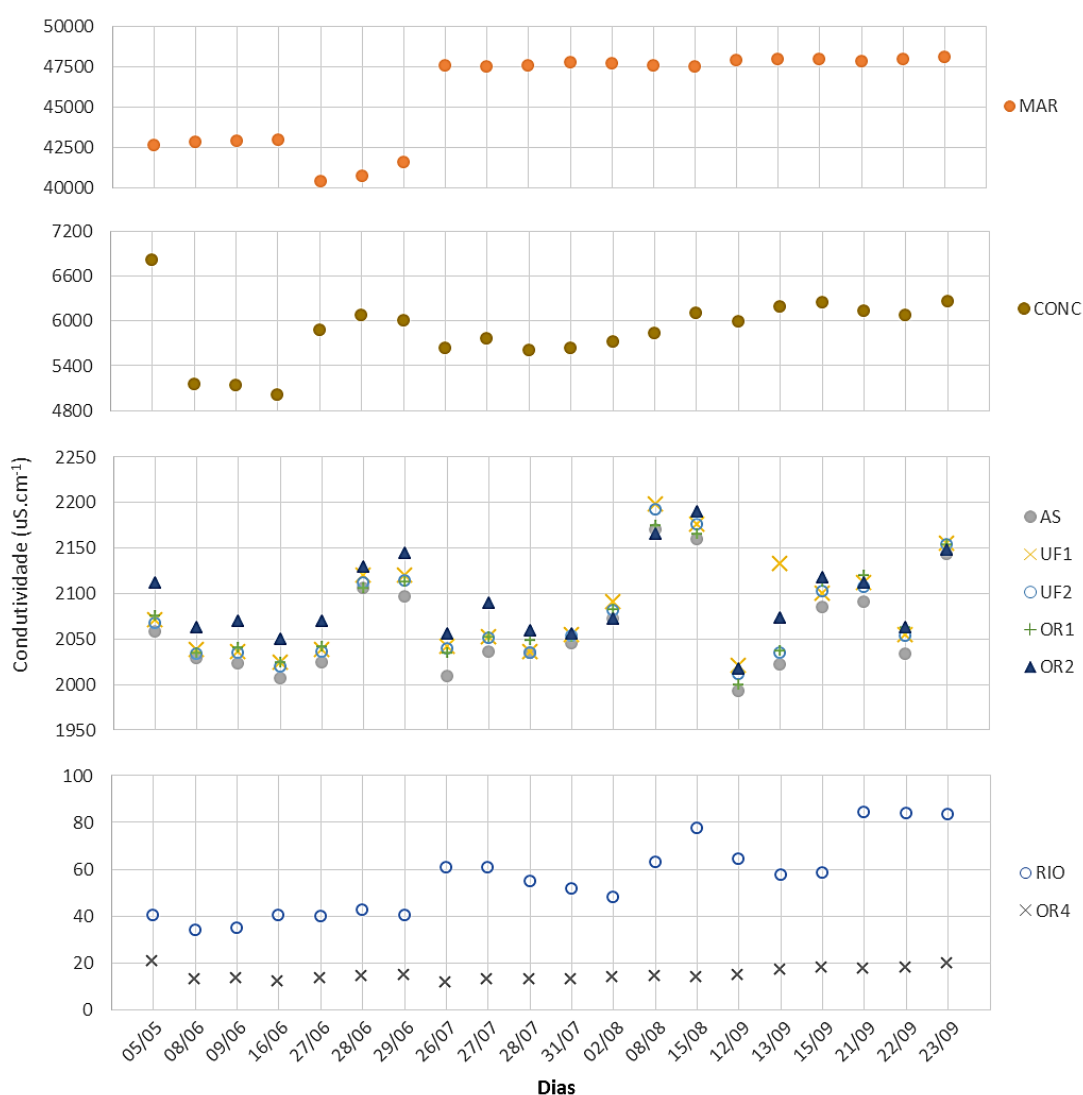
Até o dia 29/06/17 foi utilizado um volume de água do mar. Após essa data, houve a necessidade de abastecimento do tanque, por meio de caminhão pipa. Por esta razão, houve a variação de condutividade elétrica e de SDT na água do mar.

Os Gráficos 4 e 5 apresentam os resultados de condutividade elétrica e de SDT, respectivamente.

Os pontos AS, UF1, UF2, OR1 e OR2 apresentaram valores de condutividade próximos de 2000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ e valores entre 1400 a 1600 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de SDT, respeitando a especificação do sistema de OR.

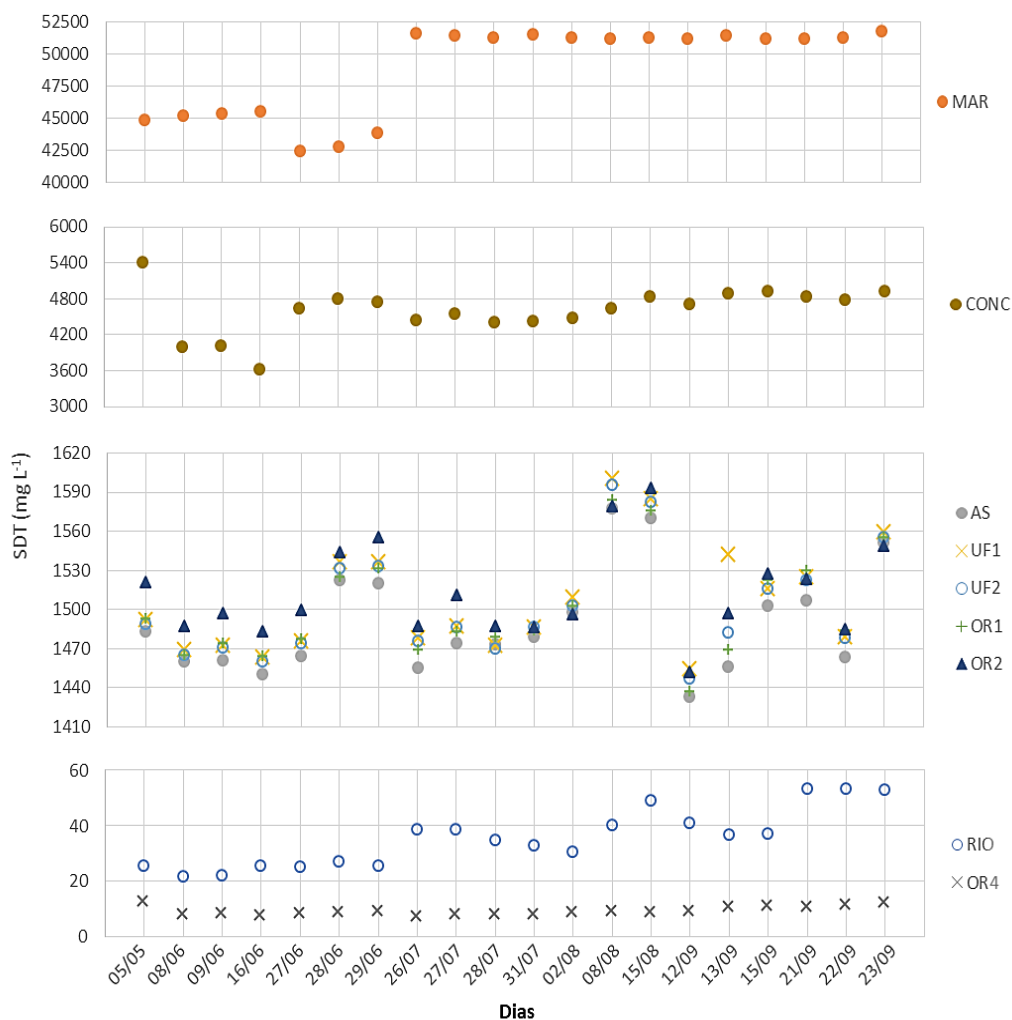
O sistema de dessalinização por OR teve eficiência de remoção média de 99,4% para SDT e de 99,3% para condutividade elétrica.

Gráfico 4 - Média diária de condutividade elétrica



AS = água salobra; UF1 = água salobra coagulada; UF2 = permeado da UF; OR1 = ponto de coleta antes do abrandamento; OR2 = ponto de coleta após abrandamento; OR4 = permeado da OR; CONC = concentrado salino.

Gráfico 5 - Média diária de sólidos dissolvidos totais



AS = água salobra; UF1 = água salobra coagulada; UF2 = permeado da UF; OR1 = ponto de coleta antes do abrandamento; OR2 = ponto de coleta após abrandamento; OR4 = permeado da OR; CONC = concentrado salino.

O permeado da OR apresentou valores abaixo de 20 mg.L⁻¹ de SDT. Segundo a Portaria nº 2.914 (BRASIL, 2011), o valor máximo permitido para a concentração de SDT na água para consumo humano é de 1000 mg.L⁻¹. Porém, esse valor será menor dependendo da finalidade do uso da água.

Elasaad *et al.* (2015) avaliaram um sistema de dessalinização por OR para a produção de 1m³.dia⁻¹ de água doce para uma comunidade no México. A água de alimentação era proveniente de poço com concentração de SDT de 2154,3 mg.L⁻¹. Após o tratamento, a concentração de SDT obtida foi de 10,2 mg.L⁻¹, valor próximo ao do permeado do sistema de OR do presente trabalho.

As Tabelas 5 e 6 apresentam os resultados estatísticos dos parâmetros de condutividade elétrica e de SDT, respectivamente. Para os dois parâmetros, os maiores coeficientes de variação foram encontrados no ponto OR4, porém a média se manteve próxima da mediana, e os maiores desvios padrões foram encontrados na amostra do concentrado salino.

Tabela 5 – Dados estatísticos das concentrações de condutividade elétrica

	AS	UF2	OR1	OR2	OR4	CONC
MÉDIA	2060	2073	2075	2091	15,10	5830
MEDIANA	2041	2054	2059	2072	14,23	5891
DP	51,72	49,75	47,69	43,71	2,72	395,28
VAR	2675,41	2475,49	2273,99	1910,28	7,39	156247,96
MÍN	1993	2008	1974	1987	11,49	4997
MÁX	2182	2192	2188	2204	25,48	6819
CV (%)	2,51	2,40	2,30	2,09	17,99	6,78

AS = água salobra; UF2 = permeado da UF; OR1 = ponto de coleta antes do abrandamento; OR2 = ponto de coleta após abrandamento; OR4 = permeado da OR; CONC = concentrado salino; DP = desvio padrão; VAR = variância; CV = coeficiente de variação

Tabela 6 – Dados estatísticos das concentrações de sólidos dissolvidos totais

	AS	UF2	OR1	OR2	OR4	CONC
MÉDIA	1489	1499	1499	1512	9,45	4571
MEDIANA	1478	1486	1485	1500	8,95	4655
DP	40,31	38,27	37,40	34,26	1,67	375,94
VAR	1624,76	1464,83	1398,81	1173,63	2,80	141329,08
MÍN	1433	1444	1418	1428	7,21	3084
MÁX	1587	1595	1591	1604	15,82	5403
CV (%)	2,71	2,55	2,50	2,27	17,70	8,23

AS = água salobra; UF2 = permeado da UF; OR1 = ponto de coleta antes do abrandamento; OR2 = ponto de coleta após abrandamento; OR4 = permeado da OR; CONC = concentrado salino; DP = desvio padrão; VAR = variância; CV = coeficiente de variação

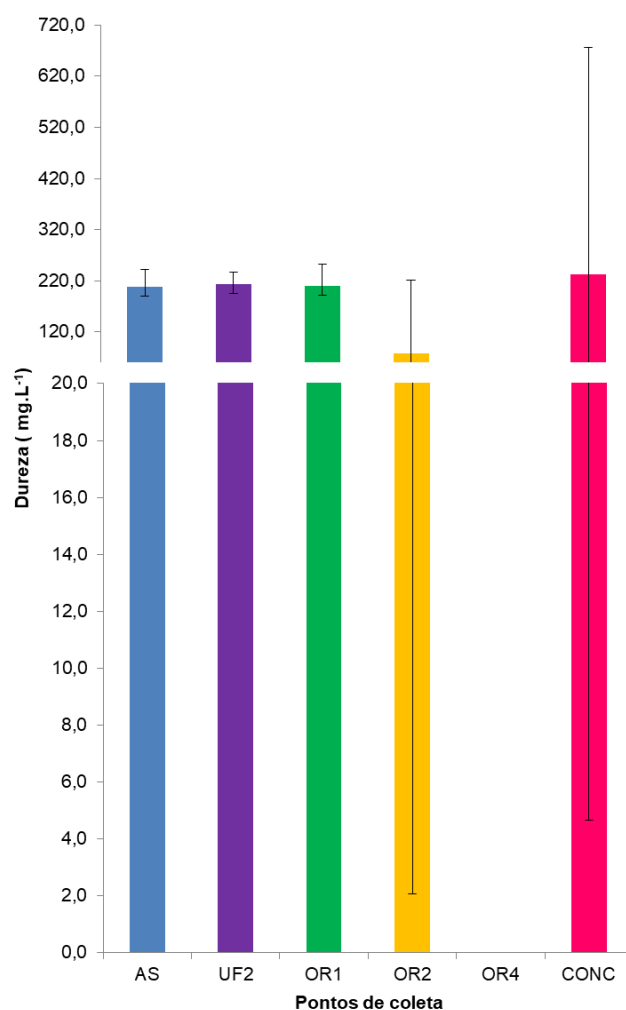
5.4.4 Dureza Total e Cálcio

O Gráfico 6 apresenta os resultados de dureza total em mg.L^{-1} de carbonato de cálcio (CaCO_3). Pode-se observar a remoção parcial de dureza após o abrandamento (62,8%), e remoção total após a membrana de OR. Porém, houve grande variação na remoção de dureza pelo abrandador. O mesmo ocorreu com os resultados de cálcio (Gráfico 7). Isso pode ser

justificado devido à recomendação da Sanepar de diminuir a frequência de regeneração do abrandador a fim de reduzir os custos operacionais.

O sistema possui dois abrandadores que operavam alternadamente. No início dos experimentos, o sistema de OR foi programado para fazer uma regeneração a cada 12h de operação em cada abrandador. A partir do mês de julho (28/07/2017), este tempo foi ampliado para 24h de operação. Também houve a troca da granulometria do sal do tanque de regeneração. Esses fatores certamente contribuíram para a baixa remoção de dureza e de cálcio pelo abrandador em alguns dias de operação, observando-se que o sistema apresentava maior remoção logo após a regeneração.

Gráfico 6 – Concentrações médias, máximas e mínimas de dureza total

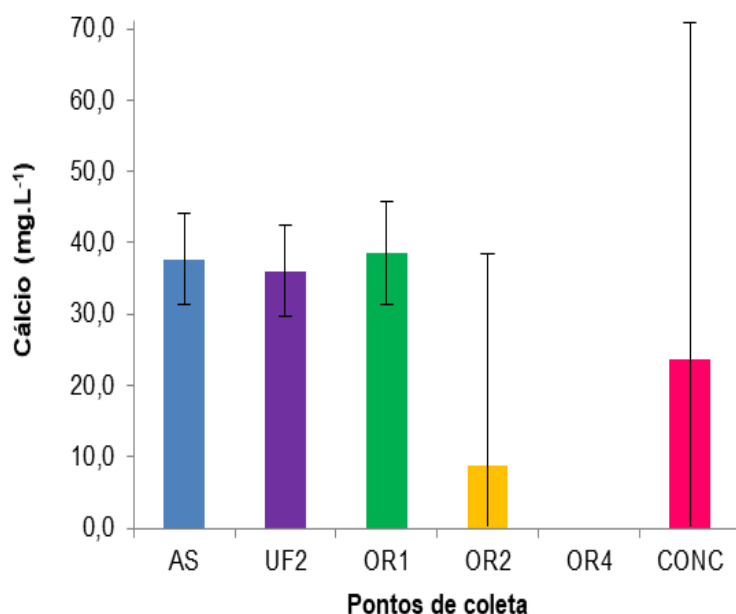


AS = água salobra; UF2 = permeado da UF; OR1 = ponto de coleta antes do abrandamento; OR2 = ponto de coleta após abrandamento; OR4 = permeado da OR; CONC = concentrado salino

A dureza removida na membrana de OR seguiu para o concentrado salino. O mesmo ocorreu com as concentrações de cálcio (Gráficos 6 e 7).

De acordo com a Portaria nº 2.914 (BRASIL, 2011), o valor máximo permitido de dureza para água potável é de 500 mg.L⁻¹. Porém, esse valor deve ser menor dependendo da finalidade de uso da água. O permeado da OR não apresentou concentração de dureza total e nem de cálcio (Gráfico 6 e 7).

Gráfico 7 – Concentrações médias, máximas e mínimas de cálcio



AS = água salobra; UF2 = permeado da UF; OR1 = ponto de coleta antes do abrandamento; OR2 = ponto de coleta após abrandamento; OR4 = permeado da OR; CONC = concentrado salino

Tabela 7 – Dados estatísticos das concentrações de dureza total

	AS	UF2	OR1	OR2	OR4	CONC
MÉDIA	209,1	214,0	210,4	77,8	<1	233,3
MEDIANA	208,0	212,2	207,2	15,2	<1	34,4
DP	10,5	11,8	13,8	86,3	<1	262,8
VAR	110,5	139,8	189,5	7443,7	<1	69086,8
MÍN	190,6	194,9	191,9	2,1	<1	4,7
MÁX	241,9	237,2	253,5	221,4	<1	675,5
CV (%)	5,0	5,5	6,5	110,9	<1	112,7

AS = água salobra; UF2 = permeado da UF; OR1 = ponto de coleta antes do abrandamento; OR2 = ponto de coleta após abrandamento; OR4 = permeado da OR; CONC = concentrado salino; DP = desvio padrão; VAR = variância; CV = coeficiente de variação

As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados estatísticos de dureza total e de cálcio, respectivamente.

A partir da avaliação dos resultados estatísticos de dureza total, nota-se que a média não representa o conjunto de dados para as amostras da OR2 e do concentrado salino, pois houve grande diferença entre a média e a mediana. Por esta razão é necessário avaliar mais de uma medida de posição ou de dispersão estatística. Os maiores desvios padrões coincidiram com os maiores coeficientes de variação para as amostras da OR2 e do concentrado salino.

Elasaad *et al.* (2015), obtiveram dureza de 1 mg.L⁻¹ para água dessalinizada. Almeida (2017) não constatou presença de dureza na água dessalinizada para as duas concentrações de SDT na água salobra.

Tabela 8 – Dados estatísticos das concentrações de cálcio

	AS	UF2	OR1	OR2	OR4	CONC
MÉDIA	37,6	35,9	38,5	8,8	<1	23,6
MEDIANA	37,4	35,6	38,4	3,0	<1	10,2
DP	2,1	3,2	2,8	9,8	<1	23,6
VAR	4,5	10,0	7,9	96,5	<1	559,1
MÍN	31,3	29,6	31,3	0,0	<1	<1
MÁX	44,2	42,6	45,7	38,4	<1	70,8
CV (%)	5,6	8,8	7,3	111,6	<1	100,1

AS = água salobra; UF2 = permeado da UF; OR1 = ponto de coleta antes do abrandamento; OR2 = ponto de coleta após abrandamento; OR4 = permeado da OR; CONC = concentrado salino; DP = desvio padrão; VAR = variância; CV = coeficiente de variação

A partir dos resultados obtidos de dureza e de cálcio, observou-se que o desvio padrão foi maior que a média nas amostras da OR2 e do concentrado salino, e o coeficiente de variação destes pontos ultrapassaram 100%.

O concentrado salino apresentou valor mínimo <1 de cálcio. Isso significa que neste período o abrandador estava em boas condições de operação, visto que a água de alimentação não apresentou variação nas concentrações de cálcio.

Os maiores coeficientes de variação foram encontrados nas amostras OR2 (111,6 %) e CONC (100,1 %). A concentração média de cálcio foi de 8,8 mg.L⁻¹ no ponto de coleta OR2 e 23,6 mg.L⁻¹ para o concentrado salino.

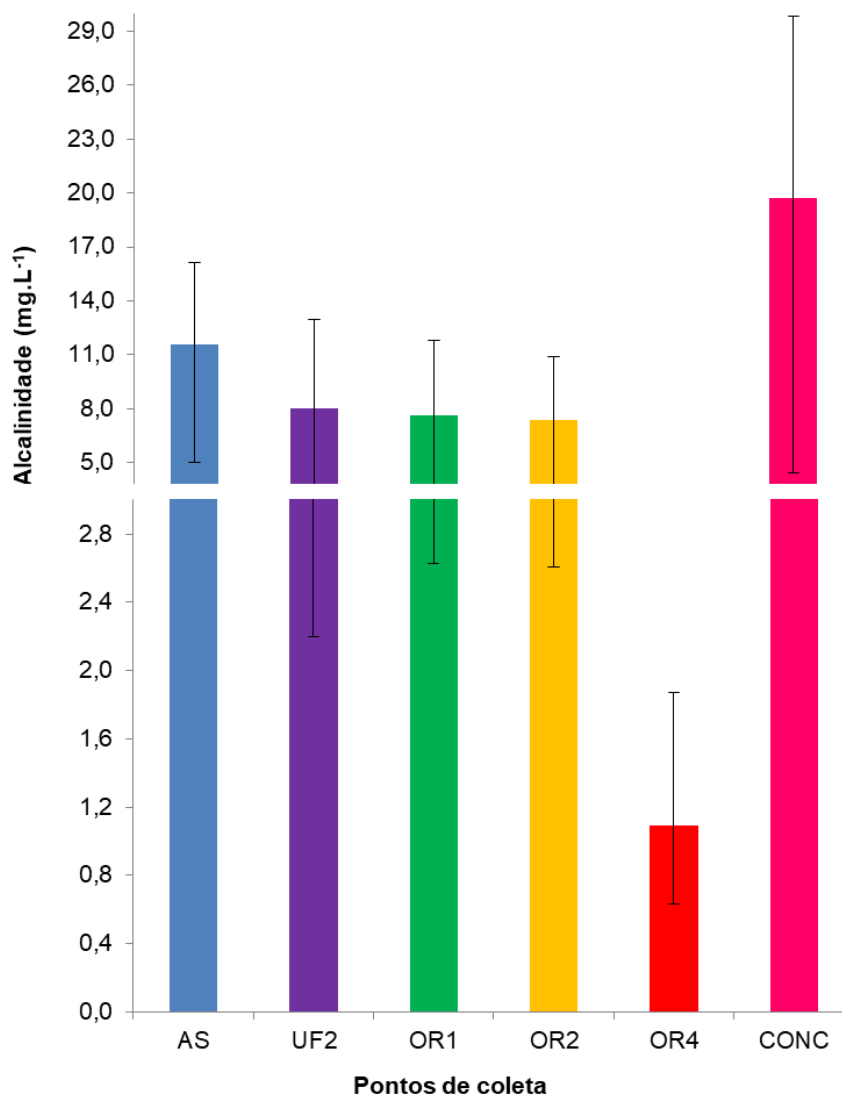
Enquanto que a mediana foi $3,0 \text{ mg.L}^{-1}$ no ponto de coleta OR2 e $10,2 \text{ mg.L}^{-1}$ no concentrado salino.

Assim como no trabalho de Almeida (2017), não houve presença de cálcio nas amostras do permeado da OR. No estudo de Elasaad *et al.* (2015), a concentração de cálcio foi de $0,39 \text{ mg.L}^{-1}$ para a água dessalinizada.

5.4.5 Alcalinidade total e pH

O Gráfico 8 apresenta os resultados de alcalinidade total dos pontos de amostragem.

Gráfico 8 – Concentrações médias, máximas e mínimas de alcalinidade total



AS = água salobra; UF2 = permeado da UF; OR1 = ponto de coleta antes do abrandamento; OR2 = ponto de coleta após abrandamento; OR4 = permeado da OR; CONC = concentrado salino.

A diminuição da alcalinidade na amostra UF2 ocorre devido à dosagem de PAC na água salobra.

Visto que o pH tem relação com a alcalinidade, pode-se notar que no ponto OR4 a concentração de alcalinidade e pH baixaram, sendo que no concentrado salino o pH e a alcalinidade aumentaram.

A Tabela 9 apresenta os dados estatísticos em relação à alcalinidade para avaliação do sistema.

Tabela 9 – Dados estatísticos dos resultados de alcalinidade total

	AS	UF2	OR1	OR2	OR4	CONC
MÉDIA	11,5	8,0	7,6	7,4	1,1	19,7
MEDIANA	12,7	9,2	8,7	8,2	1,0	23,4
DP	3,4	3,3	2,8	2,6	0,3	8,4
VAR	11,7	10,6	7,7	6,5	0,1	70,2
MÍN	5,0	2,2	2,6	2,6	0,6	4,4
MÁX	16,1	12,9	11,8	10,9	1,9	29,8
CV (%)	29,6	40,5	36,6	34,6	29,2	42,6

AS = água salobra; UF2 = permeado da UF; OR1 = ponto de coleta antes do abrandamento; OR2 = ponto de coleta após abrandamento; OR4 = permeado da OR; CONC = concentrado salino; DP = desvio padrão; VAR = variância; CV = coeficiente de variação

Não houve remoção de alcalinidade após o sistema de abrandamento, pois as médias e medianas nos pontos de coletas OR1 e OR2 apresentaram valores muito próximos.

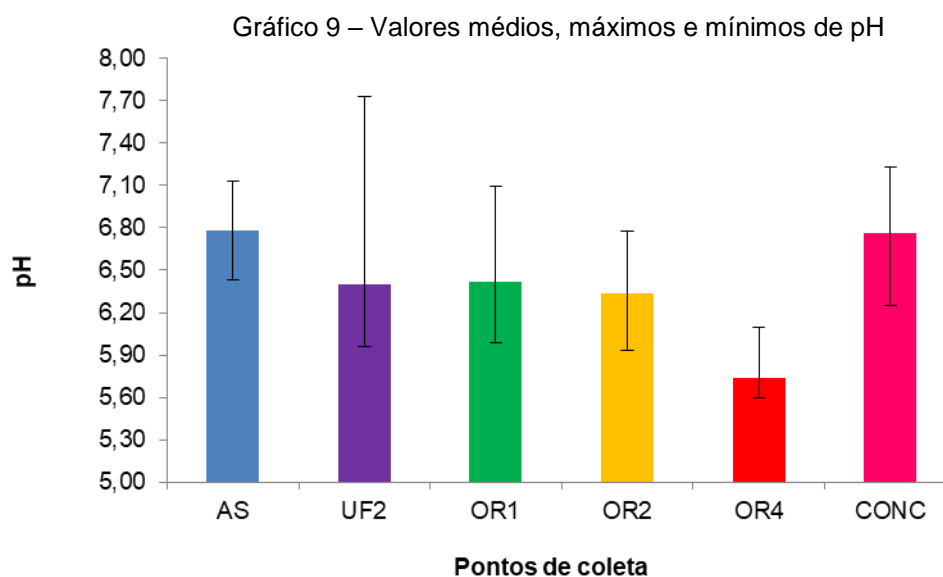
A eficiência de remoção de alcalinidade global do sistema, considerando os valores da água salobra (AS) e permeado da OR (OR4), foi de 90,6 %. No trabalho de Almeida (2017), a remoção média global de alcalinidade do sistema foi de 88,8% para a concentração de 1500 (± 100) mg.L⁻¹ de SDT na água salobra.

O Gráfico 9 apresenta os resultados médios, mínimos e máximos de pH nas amostras.

Os valores de pH da água dessalinizada durante o período experimental oscilaram entre 5,60 a 6,10. O valor médio foi de 5,74. Isso significa que o sistema necessita de pós-tratamento, como a adição de alcalinizante no permeado da OR. O padrão de pH para potabilidade da água estabelecido pela

Portaria nº 2.914 é de 6,0 a 9,5 (BRASIL, 2011), mas o pH ideal da água dessalinizada depende da sua finalidade de uso.

Os resultados de pH e alcalinidade reduziram em relação aos pontos UF2 e OR4, e aumentaram em relação ao ponto CONC. A redução média de pH da água salobra em relação ao ponto UF2 foi de 5,6% devido a adição de PAC e de 15,3% da água salobra em relação ao permeado do sistema de OR.



AS = água salobra; UF2 = permeado da UF; OR1 = ponto de coleta antes do abrandamento; OR2 = ponto de coleta após abrandamento; OR4 = permeado da OR; CONC = concentrado salino

Al-Khatib e Arafat (2009), em seus estudos, concluíram que as amostras de água dessalinizada por OR apresentaram alta porcentagem (44%) de não conformidade em termos de valor de pH em comparação com a água proveniente de cisternas alimentadas com chuva (1%) ou águas subterrâneas (11%). Quase todas as amostras não conformes apresentaram valores de pH abaixo do limite da OMS de 6,5.

Elasaad *et al.* (2015), obtiveram o valor de 6,62 de pH para a água permeada da OR. O pH do permeado teve influência da adição de *anti-scaling* e *anti-fouling*, segundo os autores. Em relação à alcalinidade, eles obtiveram 12,5 mg.L⁻¹ para água dessalinizada, valor superior aos dados obtidos no presente trabalho.

A Tabela 10 apresenta os dados estatísticos das variações de pH das amostras do sistema piloto de dessalinização. Nota-se que não houve grande variabilidade nos resultados de pH.

Tabela 10 – Dados estatísticos dos resultados de pH

	AS	UF2	OR1	OR2	OR4	CONC
MÉDIA	6,78	6,40	6,42	6,34	5,74	6,76
MEDIANA	6,83	6,41	6,49	6,39	5,70	6,85
DP	0,18	0,31	0,26	0,21	0,10	0,27
VAR	0,03	0,10	0,07	0,04	0,01	0,07
MÍN	6,43	5,96	5,99	5,93	5,60	6,25
MÁX	7,13	7,73	7,09	6,78	6,10	7,23
CV (%)	2,59	4,83	4,04	3,30	1,67	4,02

AS = água salobra; UF2 = permeado da UF; OR1 = ponto de coleta antes do abrandamento; OR2 = ponto de coleta após abrandamento; OR4 = permeado da OR; CONC = concentrado salino; DP = desvio padrão; VAR = variância; CV = coeficiente de variação

Observa-se uma uniformidade do pH nos dados estatísticos, com relação aos pontos de coleta. Conforme Gráfico 1, onde estão apresentados os valores de pH de coagulação x dosagem de coagulante, relativos ao ponto de coleta UF1, houve uma pequena diferença entre a média obtida em UF1 (6,53) e UF2 (6,40). Como não houve remoção efetiva de alcalinidade após a membrana de UF, o pH manteve-se constante. Ao contrário do que ocorreu após as membranas de OR, onde ocorreu eficiência de remoção de alcalinidade, com a redução do pH (OR4).

5.5 ENSAIOS FÍSICOS

5.5.1 Temperatura

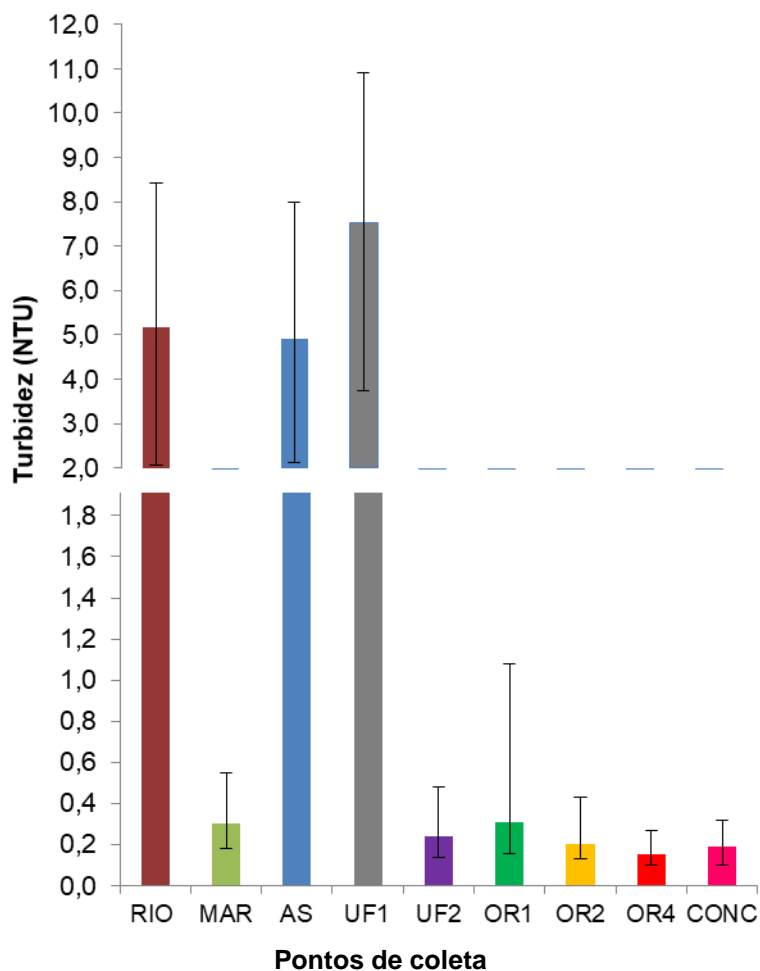
Os resultados de temperatura das amostras não variaram durante a operação, mantiveram próximos da temperatura ambiente, entre 18° (inverno) e 26 °C (outono e primavera).

5.5.2 Turbidez e Cor Aparente

O Gráfico 10 apresenta os resultados de turbidez para as amostras do rio, do mar, da água salobra (AS), da água salobra coagulada (UF1), do permeado da UF (UF2), permeado da UF antes (OR1) e após o abrandador (OR2), permeado da OR (OR4) e do concentrado salino (CONC).

A partir da análise dos dados, constatou-se remoção de 95,1% de turbidez da água salobra após a passagem pela membrana de UF e remoção de 1,8% do permeado da UF em relação ao permeado da OR (OR4). O padrão mais restrito de turbidez na água potável estabelecido pela Portaria n° 2.914 é $\leq 0,5$ NTU (Brasil, 2011).

Gráfico 10 – Valores médios, máximos e mínimos de turbidez



Pode-se notar o aumento de turbidez na amostra UF1, como já esperado, pois após a dosagem do coagulante, uma pequena parcela dos

sólidos dissolvidos, coloides e grande parte dos sólidos suspensos da água salobra se aglomeram formando os flocos, que aumentam de tamanho e peso molecular para serem retidos na membrana de UF.

Al-Khatib e Arafat (2009) observaram que turbidez e cor apresentaram 9% de não conformidade apenas para as águas subterrâneas. Devido à escassez de abastecimento, a água é bombeada intermitentemente na rede de distribuição. A população instala tanques para coletar água durante os períodos de bombeamento para uso durante os períodos de não bombeamento. As partículas sólidas na água se acumulam no fundo desses tanques, agitam-se e suspendem-se quando o fluxo de água para o tanque é reiniciado, especialmente quando há alta pressão. Se a água for extraída do tanque durante esse tempo (isto é, quando a água da rede está enchendo novamente o tanque), é visível e provável que a água fique turva.

O aumento de turbidez no ponto da OR1 pode ser justificado pela mesma observação citada acima, visto que o tanque de armazenamento do permeado da UF não era limpo com frequência e que o sistema de dessalinização de Praia de Leste operava intermitentemente, sendo assim, era visível o depósito de sólidos em seu fundo. Quando iniciada a operação conjunta da UF e OR, dependendo do volume do tanque, à medida que entrava água do permeado, ocorria agitação fazendo com que estes sólidos se suspendessem e fossem bombeados para o sistema de OR.

A Tabela 11 indica os resultados da análise estatística dos dados de turbidez das amostras.

Tabela 11 – Dados estatísticos dos resultados de turbidez

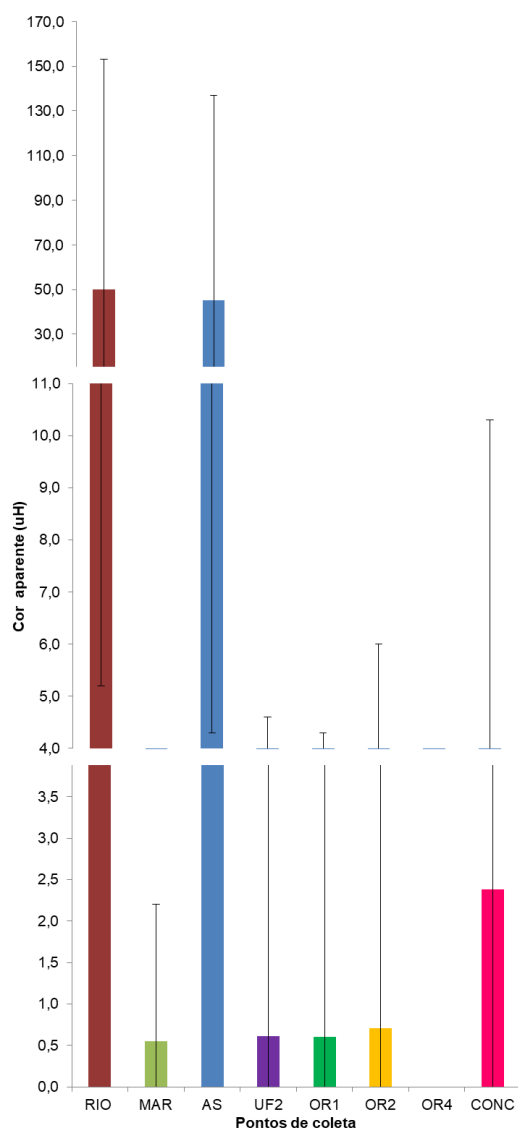
	RIO	MAR	AS	UF1	UF2	OR1	OR2	OR4	CONC
MÉDIA	5,18	0,30	4,91	7,53	0,24	0,31	0,21	0,15	0,19
MEDIANA	4,68	0,24	4,39	7,66	0,21	0,25	0,20	0,16	0,19
DP	1,63	0,13	1,55	1,99	0,09	0,18	0,06	0,03	0,04
VAR	2,67	0,02	2,40	3,95	0,01	0,03	$3,6 \times 10^{-3}$	9×10^{-4}	$1,6 \times 10^{-3}$
MÍN	2,07	0,18	2,13	3,73	0,14	0,16	0,13	0,10	0,10
MÁX	8,41	0,55	7,98	10,90	0,48	1,08	0,43	0,27	0,32
CV (%)	31,54	42,74	31,54	26,40	36,50	57,56	29,31	19,88	22,11

AS = água salobra; UF1 = ponto de coleta antes da membrana de UF; UF2 = permeado da UF; OR1 = ponto de coleta antes do abrandamento; OR2 = ponto de coleta após abrandamento; OR4 = permeado da OR; CONC = concentrado salino; DP = desvio padrão; VAR = variância; CV = coeficiente de variação

Observa-se que os desvios padrões foram pequenos em relação à média. O coeficiente de variação das amostras do rio, mar, AS, UF2 e OR1 apresentaram valores superiores a 30% indicando uma grande dispersão entre os dados. Porém, os resultados estatísticos indicam que não houve grande diferença entre a média e a mediana.

O Gráfico 11 apresenta os resultados de cor aparente das amostras do rio, do mar, da água salobra (AS), do permeado da UF (UF2), permeado da UF antes (OR1) e após o abrandador (OR2), permeado da OR (OR4) e do concentrado salino (CONC).

Gráfico 11 – Valores médios, máximos e mínimos de cor aparente



Observa-se que esporadicamente os dados de cor aparente dos pontos de coleta OR1 e OR2 apresentaram valores maiores que na UF2. A troca iônica no abrandamento, a qualidade da água salobra, ou a frequência de limpeza do tanque de armazenamento do permeado da UF podem ter contribuído para este fator. Porém, o permeado da OR não apresentou cor aparente, esta seguiu para o concentrado salino.

Nota-se que o parâmetro de cor aparente foi o que teve maior coeficiente de variação nas amostras, com exceção do ponto de coleta OR4. Isso ocorreu devido a fatores externos, pois em alguns períodos, a água do rio das Pombas apresentava altos valores de cor aparente (100 a 150 uH) e, conseqüentemente, na água salobra. Por essa razão, é de grande importância o controle e monitoramento do sistema de pré- tratamento, a fim de não danificar as membranas de OR.

A eficiência de remoção de cor aparente da AS para UF2 foi de 98,6% e da UF2 para a OR4 foi de 1,4%. O padrão máximo de cor aparente na água potável estabelecido pela Portaria nº 2.914 é de 15,0 uH (BRASIL, 2011).

A Tabela 12 apresenta os resultados da análise estatística dos dados de cor aparente.

Tabela 12 – Dados estatísticos dos resultados de cor aparente

	RIO	MAR	AS	UF2	OR1	OR2	OR4	CONC
MÉDIA	50,0	0,6	45,1	0,6	0,6	0,7	< 0,1	2,4
MEDIANA	15,0	0,2	7,9	< 0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	1,4
DP	50,7	0,7	53,1	1,2	1,1	1,4	< 0,1	2,5
VAR	2568,9	0,5	2819,9	1,4	1,1	1,8	< 0,1	6,2
MÍN	5,2	< 0,1	4,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
MÁX	153,0	2,2	137,0	4,6	4,3	6,0	< 0,1	10,3
CV (%)	101,4	122,8	117,9	192,7	176,4	191,5	< 0,1	104,8

AS = água salobra; UF2 = permeado da UF; OR1 = ponto de coleta antes do abrandamento; OR2 = ponto de coleta após abrandamento; OR4 = permeado da OR; CONC = concentrado salino; DP = desvio padrão; VAR = variância; CV = coeficiente de variação

Pode-se notar a elevada diferença entre os dados de média e mediana para o parâmetro de cor aparente para a maioria dos pontos de coleta. Os maiores desvios foram para as amostras da água do rio e da água salobra.

5.6 EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO

A Tabela 13 apresenta a eficiência de remoção global e parcial do sistema de dessalinização de água com relação aos parâmetros de qualidade de água analisados.

Pode-se notar a remoção total de sulfato, cor aparente, dureza total e cálcio no permeado da OR. A eficiência de remoção média de cloreto foi de 97,4%, e de 90,6% para a alcalinidade.

Tabela 13 – Comparativo da eficiência de remoção média do sistema de dessalinização com relação à qualidade da água

Parâmetro	Comparativo entre os pontos	Eficiência de remoção média (%)
Sulfato	AS – OR4	100
Cloreto	AS – OR4	97,4
SDT	AS – OR4	99,4
Condutividade elétrica	AS – OR4	99,3
	AS – UF2	30,4
Alcalinidade total	UF2 – OR4	60,0
	AS – OR4	90,4
	AS – UF2	98,6
Cor aparente	UF2 – OR4	1,4
	AS – OR4	100
	AS – UF2	95,1
Turbidez	UF2 – OR4	1,8
	AS – OR4	96,9
	AS – OR2	62,8
Dureza total	OR2 – OR4	37,2
	AS – OR4	100
	AS – OR2	76,6
Cálcio	OR2 – OR4	23,4
	AS – OR4	100

AS = água salobra; UF2 = permeado da UF; OR2 = permeado da UF após abrandador; OR4 = permeado da OR.

No estudo realizado por Almeida (2017), a eficiência de remoção média de SDT foi de 99,1%, e de 99% para o parâmetro de condutividade elétrica, valores muito próximos aos obtidos no presente trabalho.

Com relação à turbidez, houve remoção de 95,1% da água salobra para o sistema de UF, e da UF2 para a OR4, 1,8%, totalizando 96,9% de remoção de turbidez.

5.7 PARÂMETROS OPERACIONAIS

A partir dos resultados da vazão média de entrada de água salobra na UF e das vazões média do permeado e do concentrado da OR, foi possível calcular a taxa de recuperação global do sistema.

O sistema de OR produziu em média aproximadamente $1,1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de permeado e em média aproximadamente $0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de concentrado salino.

A pressão osmótica se manteve constante durante os dias de operação, próximo de $8 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$, indicando que não houve alterações na eficiência do tratamento. Elevações nos valores de pressão podem indicar desenvolvimento de *fouling* na membrana, necessitando limpeza química. Segundo o manual do fabricante, o sistema de OR pode operar com pressão mínima de $6 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$ e máxima de $12 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$ (PERMUTION, 2016).

De acordo com a Tabela 14, a taxa de recuperação global mínima foi de 42,6% e a máxima foi de 57,4% durante os vinte dias de operação. Elasaad *et al.* (2015) obteve uma taxa de recuperação de aproximadamente 33%.

No experimento de Almeida (2017), a taxa de recuperação do sistema de dessalinização por OR variou de 56,48 a 99,94%. Concluiu-se que os valores próximos a 100% coincidiram com a alteração da configuração do equipamento para obtenção de maiores volumes de permeado, o que não é recomendado pelo fabricante do sistema de OR.

Os menores valores de vazão média de entrada da UF e do concentrado da OR coincidiram com a maior taxa de recuperação, como pode ser observado na Tabela 14. Também pode-se observar que a maior vazão de permeado coincidiu com o maior fluxo de filtração.

O cálculo da taxa de filtração foi baseado na área de filtração total das cinco membranas de OR (42 m^2).

Tabela 14 – Resultados médios dos parâmetros operacionais durante os dias de operação

Dias	Vazão de entrada na UF (m ³ .h ⁻¹)	Vazão de entrada na OR (m ³ .h ⁻¹)	Vazão do permeado da OR (m ³ .h ⁻¹)	Vazão do concentrado da OR (m ³ .h ⁻¹)	Taxa de recuperação parcial (UF) (%)	Taxa de recuperação parcial (OR) (%)	Taxa de recuperação global (UF e OR) (%)	Pressão osmótica (kgf.cm ⁻²)	Taxa de Filtração (L.h ⁻¹ .m ⁻²)
5/5	1,928	1.691	1,111	0,486	87.3	65.7	57,4	8,53	30,0
8/6	2,224	1.838	1,047	0,695	82.6	57.0	47,1	8,18	28,3
9/6	2,201	1.842	1,038	0,695	82.8	56.3	46,7	8,23	28,0
16/6	2,199	1.815	1,004	0,699	82.5	55.3	45,7	8,38	27,1
27/6	2,207	1.731	1,063	0,569	78.0	61.4	47,9	8,82	28,7
28/6	2,200	1.720	1,055	0,565	77.8	61.4	47,7	8,82	28,5
29/6	2,149	1.728	1,060	0,568	80.0	61.3	49,1	8,83	28,6
26/7	2,308	1.715	1,026	0,583	74.3	59.8	44,5	9,09	27,7
27/7	2,220	1.722	1,035	0,579	77.5	60.1	46,6	9,02	28,0
28/7	2,297	1.708	1,020	0,580	74.3	59.7	44,4	9,09	27,6
31/7	2,259	1.711	1,030	0,581	75.3	60.2	45,3	9,05	27,8
2/8	2,338	1.706	1,031	0,575	73.0	60.4	44,1	8,95	27,9
8/8	2,164	1.680	1,003	0,576	77.6	59.7	46,3	9,11	27,1
15/8	2,161	1.729	1,044	0,578	79.6	60.3	48,0	8,96	28,2
12/9	2,526	1.786	1,120	0,558	70.3	62.7	44,1	8,49	30,2
13/9	2,279	1.787	1,123	0,557	78.0	62.9	49,0	8,47	30,4
15/9	2,539	1.773	1,115	0,552	69.8	62.9	43,9	8,46	30,2
21/9	2,572	1.771	1,103	0,561	68.5	62.3	42,6	8,59	29,8
22/9	2,278	1.777	1,116	0,555	77.6	62.8	48,7	8,49	30,2
23/9	2,505	1.773	1,107	0,557	70.4	62.5	44,0	8,57	29,9
Média	2,278	1,750	1,063	0,583	76,9	60,7	46,7	8,71	28,7
Mín	1,928	1,680	1,003	0,486	68,5	55,3	42,6	8,18	27,1
Máx	2,572	1,842	1,123	0,699	87,3	65,7	57,4	9,11	30,4

A taxa de filtração obteve média de $28,7 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, atingindo a vazão de $1\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ de permeado especificada pelo fabricante do sistema de OR, conforme a Tabela 14.

O trabalho de Almeida (2017) apresentou média de $25,9 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ para o fluxo do permeado, também atingindo a vazão de permeado especificada pelo fabricante do equipamento de OR.

A taxa de recuperação global (UF e OR) foi menor do que a parcial (OR) devido ao volume de água gasto para a limpeza das membranas de UF.

6- CONCLUSÕES

A partir dos objetivos e da análise dos resultados dos experimentos realizados, conclui-se que:

- I. A etapa de coagulação utilizando o cloreto de polialumínio como coagulante foi fundamental para a eficiência de remoção de cor aparente (98,6 %) e de turbidez (95,1 %) da água salobra após a membrana de UF, visto que a característica da água salobra teve alta variabilidade;
- II. A dosagem de coagulante variou conforme a cor aparente, turbidez e pH da água de alimentação do sistema, obtendo valores médios de 14,7 mg.L⁻¹;
- III. Os resultados bacteriológicos indicaram que o sistema de UF removeu totalmente os coliformes totais e E. coli da água salobra de alimentação e que não houve presença destes microrganismos no permeado da OR, coletado logo após a etapa de desinfecção por UV;
- IV. Com a alteração do tempo de regeneração do sistema de abrandamento de 12h para 24h de operação, constatou-se coeficiente de variação na remoção de dureza e cálcio acima de 100% pelo abrandador;
- V. O sistema de OR apresentou remoção de 99,4 % para SDT e 99,3 % de remoção para condutividade elétrica;
- VI. A redução média de pH da água salobra em relação ao ponto UF2 foi de 5,6 % devido a adição de PAC e de 15,3 % da água salobra em relação ao permeado do sistema de OR;
- VII. Constatou-se remoção média acima de 90% para sulfato e para cloreto no sistema de OR;
- VIII. A média da taxa de recuperação global do sistema de dessalinização foi de 46,7%. O sistema operou com pressão média de 8,71 kgf.cm⁻²;
- IX. O sistema de dessalinização produziu em média 1,1 m³.h⁻¹ de permeado e em média 0,6 m³.h⁻¹ de concentrado salino;
- X. O fluxo de filtração obteve média de 28,7 L.m⁻².h⁻¹, atingindo a vazão de 1m³.h⁻¹ de permeado, especificada pelo equipamento de OR.
- XI. O sistema piloto de dessalinização foi eficiente quanto à qualidade da água dessalinizada na remoção de SDT, condutividade elétrica, cor

aparente, turbidez, sulfato, cloreto, alcalinidade total, dureza total, cálcio, coliformes totais e E. coli.

RECOMENDAÇÕES

- I. Sugere-se fazer a análise de outros parâmetros físico-químicos e microbiológicos para avaliar e sugerir a melhor destinação final ou tratamento do concentrado salino;
- II. Se o permeado for utilizado para consumo humano, deve ser realizada a remineralização, correção de pH, adição de cloro e flúor, bem como a realização das análises de todos os parâmetros de potabilidade da Portaria nº 2.914 (BRASIL, 2011);
- III. Avaliar o consumo de energia e propor sistemas de energia sustentáveis que sejam viáveis;
- IV. Calcular o balanço de massa e de energia a fim de otimizar a operação do sistema piloto de dessalinização;
- V. Automatizar o sistema de UF para testar e encontrar o tempo ideal de retrolavagem da membrana, dentre outros parâmetros operacionais;
- VI. Testar e encontrar o melhor tempo de regeneração do abrandador a fim de obter maiores eficiências de remoção de dureza para não sobrecarregar as membranas da OR e obter menor custo operacional;
- VII. Fazer a limpeza do tanque de armazenamento de permeado da UF regularmente;
- VIII. Operar o sistema durante períodos mais longos, visto que era limitada a capacidade de armazenamento e bombeamento da água do rio das Pombas;
- IX. Alterar os parâmetros operacionais a fim de compará-los com a qualidade da água e obter maiores taxas de recuperação.

7- REFERÊNCIAS

- ABDALLA, K. V. P.; CAVALCANTE, P. R. S.; NETO, J. P. C.; BARBIERI R.; NETO M. M. C. de. Avaliação da Dureza e das Concentrações de Cálcio e Magnésio em Águas Subterrâneas da Zona Urbana e Rural do Município de Rosário-MA. In: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, Maranhão, 2010.
- AL-KHATIB, I. A.; ARAFAT, H. A. Chemical and microbiological quality of desalinated water, groundwater and rain-fed cisterns in the Gaza strip, Palestine. **Desalination**, Nablus, Palestine, p.1165-1170, 2009.
- ALMEIDA, J. P. de. **Eficiência de um Sistema de Dessalinização de Água Salobra Utilizando Ultrafiltração e Osmose Reversa**. 2017. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG, Ponta Grossa, 2017.
- ANDERS C. R.; MELO R. de S. M.; DIAS, da S. N.; SOUZA M. A. C.; PORTELA C. J.; JUNIOR S. de S. F. Caracterização das Águas de Estações de Tratamento na Mesorregião do Oeste Potiguar, Brasil. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza-CE, v. 11, n. 3, p.1430-1437, 2017.
- APHA; AWWA; WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20 ed. Washington. 1999.
- AZEVEDO, P. R. M. de. **Introdução à Estatística**. 3. Ed. Natal: EDUFERN, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/21298/2/Introduc%CC%A7a%CC%83o%20a%CC%80%20Estati%CC%81stica%20%28digital%29.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2017.
- BARROS, F. G. N.; AMIN, M. M. Água: um bem econômico de valor para o Brasil e o mundo. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, Taubaté-SP, v. 4, n. 1, p.75-108, jan/abr 2008.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357 de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF, 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>> Acesso em: 16 dez. 2016>.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html> Acesso em: 15 dez. 2016>.
- Centro Regional de Informações das Nações Unidas (UNRIC). **Aumento da população mundial está a contribuir para agravamento da crise da água**. 2009. Disponível em: <<http://www.unric.org/pt/actualidade/22742>>. Acesso em: 01 nov 2017>.
- CHARCOSSET, C. A review of membrane processes and renewable energies for desalination. **Elsevier: Desalination**, Lyon, 2009. 214-231 p.
- CHEN, S.; LIXIN X.; XIAOWEI, L.; LEI, S.; HAIPING D. Study on different ultrafiltration-based hybrid pretreatment systems for reverse osmosis desalination. **Elsevier: Desalination**, Tianjin, 2015. 18-25 p.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo**: Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e Metodologias Analíticas e de Amostragem. São Paulo, 2009.

DANIEL, L. A. **Processos de Desinfecção e Desinfetantes Alternativos na Produção de Água Potável**. Rio de Janeiro: Rima, 2001. 155 p.

DIAS, N. S.; COSME, C. R.; SOUZA, A. C. M.; SILVA, M. R. F. Gestão das águas residuárias provenientes da dessalinização da água salobra. **Recursos Hídricos em regiões semiáridas: estudos e aplicações**. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2012. 175-186 p.

DIGIMED. **Medidores para controle de água DM-COR**. Disponível em: <<https://www.digimed.ind.br/DownloadFile.ashx?c=70726F6475746F732F6F7574726F73&f=444D2D3630202D2052455630352E706466>>. Acesso em: 02 jan. 2018.

ELASAAD, H.; BILTON, A.; KELLEY, L.; DUAYHE, O.; DUBOWSKY, S. 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, 2015.

FANE, A.G. T.; WANG, R.; JIA, Y. Membrane Technology: Past, Present and Future. **Membrane and Desalination Technologies**. V. 13. Capítulo 1, p.3, 2011.

FARIA, G. G.; BARBOSA C. L. E.; MENDES T. E.; AMARANTES G. R. S. Sociedade e Ambiente em Pontal do Paraná: discussões para o ensino em Sociologia. In: **XII Congresso Nacional de Educação**, PUC-PR, p. 29414-29423, 26-29 out. 2015. Disponível em: <http://educere.bruc.com.br/arquivo/pdf2015/20469_11343.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2017.

GEHAKA. **Manual de instruções pHmetro modelo PG 2000**. Disponível em: <https://www.gehaka.com.br/produtos/linha-analitica/phmetro-de-bancada/pg2000/manual_pg2000.pdf>. Acesso em: 02 jan. 2018.

GOOGLE. Google Earth. Disponível em: <<https://www.google.com.br/intl/pt-PT/earth/>>. Acesso em: 21/10/2017.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. **Processos de Separação com Membranas**. Rio de Janeiro: E-papers, 2006.

HACH. **Manual de instruções Turbidímetro modelo 2100 Q**. Disponível em: <<https://www.hach.com/asset-get.download.jsa?id=7639982324>>. Acesso em 02 jan. 2018.

HUEHMER, R. P. MF/UF Pretreatment In Seawater Desalination: applications and trends. **Proceedings of World Congress in Desalination and Reuse, International Desalination Association, IDAWC/DB09-253, Dubai, UAE**. 2009.

H2LIFE BRASIL. **Manual de instruções sistema piloto de ultrafiltração 1m3/h**. 2015.

KRISHNA, H. J. Introduction to desalination technologies. **Texas Water Development**, v. 2, 2004.

MACÊDO, J. A. B. de. **Águas & Águas**. Belo Horizonte-MG: CRQ-MG, 2004.

METCALF, E. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. Tradução de: Ivanildo Hespagnol, José Carlos Mierzwa.

MIERZWA, J. C.; SILVA, M. C. C.; RODRIGUES, L. B.; HESPANHOL, I. Tratamento de água para Abastecimento Público por Ultrafiltração: avaliação comparativa através dos custos diretos de implantação e operação com os sistemas convencional e convencional com carvão ativado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. n. 1, v. 13, p. 78-87, 2008a.

MORILLO, J.; USERO, J.; ROSADO, D.; BAKOURI, H.; RIAZA, A.; BERNAOLA, F. J. Comparative study of brine management technologies for desalination plants. **Desalination**. N. 336, p. 32-49, 2014.

MOURA, J.P.; MONTEIRO, G.S.; SILVA, J.N.; PINTO, F.A.; FRANÇA, K.P. Aplicações do Processo de Osmose Reversa para o Aproveitamento de Água Salobra do Semi-Árido Nordeste. 2008.

MYRON L[®] COMPANY. **Ultrameter II™ Operation Manual Models 6 PSI & 4P**. Disponível em: http://www.myronl.com/PDF/manuals/Ultrameter_II_Manual.pdf Acesso em: 18 dez. 2017.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). **Desalination: a national perspective**. National Academies Press, 2008.

OLIVEIRA, R; SILVA, A. S.; JÚNIOR A., BARBOSA G.; SILVA A., SALENA T.. Relação entre Condutividade e Sólidos Totais Dissolvidos em Amostras de Esgoto Bruto e de Lagoas de Estabilização. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 20^o Feira Internacional de Tecnologias de Saneamento Ambiental. ABES, 1999. p. 1-6.

OLIVEIRA, T. F. **Tratamento de água para abastecimento público por sistema de separação por membrana de ultrafiltração: estudo de caso na ETA Alto da Boa Vista (São Paulo, SP)**. 2010. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. p.13.

ORAM, B. **Sources of Total Dissolved Solids (Minerals) in Drinking Water**. 2012. Disponível em: <http://www.water-research.net/index.php/water-treatment/tools/total-dissolved-solids>. Acesso em: 14 fev. 2017.

PERMUTION. **Manual técnico de operação e manutenção da unidade de tratamento avançado por osmose reversa – Modelo ROH 010054 – 1,0 m³/h**. 2016.

PORTO, E. R.; AMORIM, M. C. C. de; SILVA JÚNIOR, L. G. A. Uso do Rejeito da Dessalinização de Água Salobra para Irrigação da Erva-Sal (*Atriplex nummularia*). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PE, v.5, p.111-114, 2001.

PURETEC INDUSTRIAL WATER. **Basics of Reverse Osmosis**. Disponível em: <http://puretecwater.com/downloads/basics-of-reverse-osmosis.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2018.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PONTAL DO PARANÁ. **Pontal do Paraná**. 2015. Disponível em: <http://www.pontaldoparana.pr.gov.br/portalnovo/municipio/historia?p=1342>. Acesso em: 16 out. 2017.

REBOUÇAS, A. da C.. Água doce no mundo e no Brasil. REBOUÇAS, A. da C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas Doces no Brasil: Capital Ecológico, Uso e Conservação**. 3. ed. São Paulo: Escrituras, 2006. Cap. 1, p. 1.

REBOUÇAS, J. R. L.; FERREIRA NETO, M.; DIAS, N. S.; SOUZA NETO, O. N.; DINIZ, A. A.; LIRA, R. B. Cultivo hidropônico de coentro com uso de rejeito salino. **Revista Irriga**, Botucatu, SP, v. 18, n.4, p.624-634, out.-dez.,2013.

REVISTA TAE: **Membranas de osmose reversa: aplicações e novidades do mercado**. São Paulo: Beatriz Farrugia, 2013. Disponível em: <http://www.revistatae.com.br/6637-noticias>. Acesso em: 07 nov. 2017.

RICHTER, C. A.; NETTO, J. M. de A. **Tratamento de Água: Tecnologia Atualizada**. São Paulo: Edgard Blücher, 2002. 332 p.

SAGLE, A.; FREEMAN, B. Fundamentals Of Membranes For Water Treatment. **The future of desalination in Texas**, v. 2, p. 137-154, 2004.

SANTOS, A. N.; SOARES, T. M.; SILVA, E. F. F.; SILVA, D. J. R.; MONTENEGRO, A. A. A. Cultivo hidropônico de alface com água salobra subterrânea e rejeito da dessalinização em

IBIMIRIM, PE. **Revista de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.14, n.9, p.961-969, 2010.

SANTOS, R. T. F. dos. **Mudanças Climáticas e a Zona Costeira: Uma Análise do Impacto da Subida do Nível do Mar nos Recursos Hídricos – O Caso do Canal de São Francisco – Baía de Sepetiba – RJ**. 2012. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SANTOS, R. de S.; MOHR, T. SAÚDE E QUALIDADE DA ÁGUA: Análises Microbiológicas e Físico-Químicas em Águas Subterrâneas. **Contexto Saúde**, Ijuí-RS, v. 13, n. 24/25, p.46-53, 2013.

SILVA, G. da A.; KULAY, L. A. Água doce no mundo e no Brasil. REBOUÇAS, A. da C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Água na Indústria: Tratamento de Água para Uso Industrial**. ed. São Paulo: Escrituras, 2006. Cap. 11, p. 375.

SOUZA, L. F. Dessalinização como fonte alternativa de água potável. **Norte Científico**, v. 1, n. 1, 2006.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Editora UFMG, 2005.

VOUTCHKOV, N. Considerations for Selection of Seawater Filtration Pretreatment System. **Desalination**. N. 261, p. 354-354, 2010.

WENTEN, I. G.; GANESHA, JI. Ultrafiltration In Water Treatment and its Evaluation as Pre-Treatment for Reverse Osmosis System. **Research Report Institut Teknologi Bandung, Indonesia (June 2008)**, 1996.

WISBECK, E.; SANDRI K. E.; SOARES M. L. A.; MEDEIROS W. H. S.. Desinfecção de Água de Chuva por Radiação Ultravioleta. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Joinville-SC, v. 16, n. 4, p.337-342, out/dez 2011.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Progress on Sanitation and Drinking-Water: **update and MDG assessment, 2015**.

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