

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIANA ESPÍNDOLA DE SOUZA

ESTUDO FÍSICO-QUÍMICO DO CONCENTRADO PROVENIENTE DO PROCESSO
DE OSMOSE REVERSA NO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA USO INDUSTRIAL



CURITIBA
2014

MARIANA ESPÍNDOLA DE SOUZA

ESTUDO FÍSICO-QUÍMICO DO CONCENTRADO PROVENIENTE DO PROCESSO
DE OSMOSE REVERSA NO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA USO INDUSTRIAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Área de concentração de Ciências Ambientais, Departamento de Engenharia Química, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial

Orientadora: Dr^a. Arislete Dantas Aquino

CURITIBA
2014

S729e Souza, Mariana Espindola de

Estudo físico-químico do concentrado proveniente do processo de osmose reversa no tratamento de água para uso industrial / Mariana Espindola de Souza. – Curitiba – PR, 2014.

XVI, 122 p. : il. ; color.

Impresso; CD-ROM; on-line.

Dissertação (Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Arislete Dantas de Aquino

1. Água industrial. 2. Permeado. 3. Processos de separação por membrana. 4. Tecnologia de separação por membrana. I. Aquino, Arislete Dantas de. II. Título.

CDD 628.16

TERMO DE APROVAÇÃO

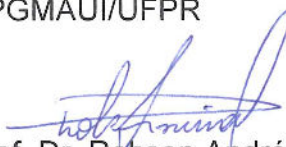
MARIANA ESPÍNDOLA DE SOUZA

**“ESTUDO FÍSICO-QUÍMICO DO CONCENTRADO
PROVENIENTE DO PROCESSO DE OSMOSE REVERSA NO
TRATAMENTO DE ÁGUA PARA USO INDUSTRIAL”**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná em parceria com SENAI/PR e a *Universität Stuttgart*, Alemanha, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a):


Prof^a. Dr^a. Arislete Dantas Aquino
PPGMAUI/UFPR


Prof. Dr. Robson André Armindo
Departamento de Solos e Engenharia Agrícola/ UFPR


Prof^a. Dr^a. Mônica Beatriz Kolicheski
PPGMAUI/ UFPR


Prof^a. Dr^a. Regina Maria Matos Jorge
PPGMAUI/ UFPR


Prof^a. Dr^a. MARGARETE CASAGRANDE LASS ERBE
Coordenadora do PPGMAUI-UFPR

Curitiba, 28 de novembro de 2014.

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Maria de Lourdes Espindola de Souza, exemplo de mulher, pela educação, caráter e oportunidades que me propiciou.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná pelo acesso ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial.

À orientadora Prof^a. Dr^a. Arislete Dantas de Aquino, pela orientação, auxílio e sugestões para o desenvolvimento deste trabalho.

A Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial em especial aos servidores, Elizete Pires, Jacir Mário Tedesco, e as Prof^{as}. Dr^a Margarete Casagrande Lass Erbe e MSc. Marielle Feilstrecker pelo auxílio prestado.

Aos professores, Dr. Robson André Armindo, Dra. Regina Maria Matos Jorge e Dr^a. Mônica Beatriz Kolicheski por participarem da banca de defesa.

Aos colegas do PPGMAUI, pela paciência e disponibilidade.

Aos colegas da SANEPAR da ETAI, Roberto Ramalho de Souza, Antonio Cavalcante de Souza Junior, Cesar Mildemberg, Claiton Kovalik, Elton Evandro Marafigo, Pedro Atilio Estrella, Saulo Waenga e Waldir Horffmann Stanula pelo aprendizado, companhia, ajuda e ideias trocadas.

Ao meu querido companheiro de todas as horas, amigo que sempre esteve ao meu lado no momento de escolhas tão importantes, Ricardo Shigueru Fujiwara.

A Deus, por me colocar em contato diário com pessoas que me fazem crescer com saúde.

“Se a própria natureza faz da água um recurso renovável,
quando esta é reciclada através de sistemas naturais por diversas vezes,
por que o homem, que se beneficia deste recurso,
não pode se dedicar ao melhor aproveitamento seja através
da economia, limpeza ou do reuso planejado?”

R. Bernardis

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar e caracterizar o resíduo produzido pelo tratamento avançado de um Processo de Separação por Membranas (PSM) proveniente de uma unidade piloto, instalada dentro de uma planta de tratamento de água para a indústria, denominada Estação de Tratamento de Água Industrial – Araucária (ETA-I). Esta planta possui capacidade de tratamento de água de 1.152 m³/h e atende a quatro grandes indústrias da região sendo, siderurgia, termoelétrica, madeireira e de fertilizantes nitrogenados, que utilizam a em processos industriais como, em torres de resfriamento, caldeiras. A unidade piloto possui capacidade de tratamento de até 400 L h⁻¹, e era composta por filtro de carvão ativado, bomba dosadora de metabisulfito de sódio, filtro de polipropileno, dois vasos de pressão onde estavam inseridos os módulos individuais de membranas filtrantes. Cada membrana possuía 7,9 m² totalizando 15,8m² de área de filtração, a composição do elemento filtrante era uma mescla de poliamida e polisulfona, espiralada e fornecida pela *Hydranautics ESPA1-4040 Nitto Denko*. As amostras coletadas, de concentrado e de água de alimentação, foram analisadas no laboratório para determinações analíticas de: cor, turbidez, pH, temperatura, condutividade elétrica, dureza, cloretos, fluoretos e cloro livre. Estas foram definidas com base nos parâmetros mais significativos para água de processo, caldeira e torre de resfriamento, custo, tempo de preparo e determinação. Os resultados das análises destes parâmetros foram tratados utilizando o teste Z e os resultados foram expressos pela média com a incerteza expandida para 95,45% do período avaliado. O tempo de operação da planta piloto para este trabalho foi de 1000 horas de forma contínua sendo interrompida apenas para a manutenção da ETA-I. Para cada parâmetro avaliado foram coletadas 127 amostras de água de alimentação, de permeado e do concentrado, após o tratamento de dados restaram 81 amostras para cada parâmetro, estes resultados indicam para a eficiência na redução da concentração dos parâmetros avaliados no permeado e para o concentrado avaliado o fator de concentração variou entre 2 a 5 vezes quando comparado com as concentrações presentes na água de alimentação, sendo verificada a eficiência do PSM. O resíduo proveniente da limpeza química das membranas filtrantes foi coletado e enviado para análise de laboratório externa e os resultados destas análises indicam conformidade de parte dos parâmetros com a Resolução CONAMA 430/2011 que estabelece critérios para o lançamento do efluente no corpo hídrico e outros parâmetros não possuem regulamentação nesta resolução, sendo assim a legislação brasileira para o lançamento de efluente omissa.

Palavras-Chave: água industrial; permeado; processos de separação por membranas; tecnologia de separação por membranas.

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate and characterize the waste produced by the advanced treatment of a membrane separated process (MSP) from a pilot unit, installed in a water treatment plant for the industry, called Industrial Water Treatment Plant - Araucaria (IWTP). This plant has water treatment capacity of 1,152 m³ / h and serves four major industries in the region and, steel, thermal power, timber and nitrogen fertilizers, which use in industrial processes such as in cooling towers, boilers. The pilot plant has the capacity to process up to 400 L h⁻¹, and was composed of activated carbon filter, metering pump sodium metabisulfite, polypropylene filter, a pressure vessel where the individual modules of filter membranes were inserted. Each membrane had a total 7.9 m² of filtration area, the filter element composition was a blend of polyamide and polysulfone, coiled and supplied by Nitto Denko ES-PA1-4040 Hydranautics. Samples collected, concentrated and feed water, were analyzed in the laboratory for analytical determinations of: color, turbidity, pH, temperature, electrical conductivity, hardness, chlorides, fluorides and free chlorine. These were defined based on the most significant parameters for process water, boiler and cooling tower, cost, preparation time and determination. The results of the analysis of these parameters have been treated using the Z test and the results were expressed as mean with uncertainty expanded to 95.45% of the evaluation period. The pilot plant operating time for this work was 1000 hours continuously being interrupted only for the maintenance of IWTP. For each parameter evaluated were collected 127 feedwater samples of permeate and concentrate, after the processing of data remaining 81 samples for each parameter, these results indicate for the efficiency reduction of the concentration of the parameters evaluated in the permeate and concentrate assessed the concentration factor ranged between 2 to 5 times when compared with the concentrations present in the feed water, and checked for MSP efficiency. The waste from chemical cleaning of the membrane filters were collected and sent to external laboratory analysis and the results of these analyzes indicate the parameters of compliance with CONAMA Resolution 430/2011 establishing criteria for the release of effluent in the water body and other parameters. They do not have legislation in this resolution, so the Brazilian legislation for the launch of silent effluent.

Keywords: industrial water; permeated; membrane separated technology; membrane technology.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA OSMOSE E DA OSMOSE REVERSA (OR)	10
FIGURA 2.2 – ESCALA DE FILTRAÇÃO DE MEMBRANAS	14
FIGURA 2.3 – MEMBRANA DE FIBRA OCA	15
FIGURA 2.4 – MEMBRANA ESPIRALADA.....	16
FIGURA 2.5 – MEMBRANA TUBULAR	17
FIGURA 2.6 – MEMBRANA TUBULAR CERÂMICA.....	17
FIGURA 2.7 – ESQUEMA TÍPIDO DE UM SISTEMA DE MBR:.....	18
FIGURA 3.1 – FOTO DA LOCALIZAÇÃO DA ETAI	35
FIGURA 3.2 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DA ETAI	37
FIGURA 3.3 – ESQUEMA SIMPLIFICADO DA UNIDADE PILOTO DE OSMOSE REVERSA.....	40
FIGURA 3.4 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DAS UTILIZAÇÃO DE MEMBRANAS NA UNIDADE PILOTO	41
FIGURA 3.5 – UNIDADE PILOTO DE OSMOSE REVERSA	43
FIGURA 3.6 – PAINEL DE CONTROLE	44
FIGURA 3.7 – ESQUEMA DA UNIDADE PILOTO DE OSMOSE REVERSA.....	45
FIGURA 3.8 – DETALHES DA UNIDADE PILOTO DE OSMOSE REVERSA.....	46
FIGURA 3.9 – ESQUEMA DO EQUIPAMENTO PARA A MEDIDA DO SDI.....	53
FIGURA 4.1 – AMOSTRA DE ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO (A), PERMEADO (P) E CONCENTRADO (C) EM ÉPOCA DE BAIXA PLUVIOSIDADE E DOSAGEM DE DIÓXIDO DE CLORO INSUFICIENTE	58
FIGURA 4.2 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.....	67
FIGURA 4.3 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE TURBIDEZ.....	68
FIGURA 4.4 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE PH	70
FIGURA 4.5 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE COR.....	71
FIGURA 4.6 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE CLORO LIVRE.....	72
FIGURA 4.7 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE FLUORETO	74
FIGURA 4.8 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE CLORETO	75
FIGURA 4.9 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE DUREZA TOTAL.....	76

FIGURA 4.10 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE SURFACTANTES (MBAS).....	77
FIGURA 4.11 – ESQUEMA PARA O APERFEIÇOAMENTO DO TRATAMENTO DA ETAI.....	81

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – CAPACIDADE DE TRATAMENTO DA ETAI E DA UNIDADE PILOTO DE OSMOSE REVERSA	36
TABELA 4.1 – RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO, SEM E COM O TRATAMENTO DE DADOS CONTENDO VALORES DA MÉDIA, DO DESVIO PADRÃO, O COEFICIENTE DE VARIAÇÃO, A ANÁLISE DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO E A INCERTEZA EXPANDIDA DE CADA PARÂMETRO	60
TABELA 4.2 – RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PERMEADO, SEM E COM O TRATAMENTO DE DADOS CONTENDO VALORES DA MÉDIA, DO DESVIO PADRÃO, O COEFICIENTE DE VARIAÇÃO, A ANÁLISE DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO E A INCERTEZA EXPANDIDA DE CADA PARÂMETRO	61
TABELA 4.3 – RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DO CONCENTRADO, SEM E COM O TRATAMENTO DE DADOS CONTENDO VALORES DA MÉDIA, DO DESVIO PADRÃO, O COEFICIENTE DE VARIAÇÃO, A ANÁLISE DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO E A INCERTEZA EXPANDIDA DE CADA PARÂMETRO	62
TABELA 4.4 – RESULTADOS DA MÉDIA, MEDIANA, DESVIOS PADRÃO, MODA, MÁXIMO, MÍNIMO E COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO PARA CADA PARÂMETRO DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO	63
TABELA 4.5 – RESULTADOS DA MÉDIA, MEDIANA, DESVIOS PADRÃO, MODA, MÁXIMO, MÍNIMO E COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO PARA CADA PARÂMETRO DO CONCENTRADO	64
TABELA 4.6 – LIMITE INFERIOR E SUPERIOR PARA CADA PARAMETRO DE ÁGUA INDUSTRIAL GENÉRICA	65

TABELA 4.7 – ANÁLISES DO EFLUENTE APÓS A LIMPEZA QUÍMICA DAS MEMBRANAS	78
--	----

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 – VALORES DE SDI E APLICAÇÕES	19
QUADRO 3.1 – FAIXA DE OPERAÇÃO DO ESPECTROFÔTOMETRO DE UV VISÍVEL <i>HACH DR3900</i>	48
QUADRO 3.2 – PARÂMETROS ANALISADOS NO RESÍDUO QUÍMICO	56

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1 – CARACTERÍSTICAS DA MEMBRANA.....	97
ANEXO 2 – CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO ATIVADO GRANULAR CARBOMAFRA CARBONO 119	98
ANEXO 3 – CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO ATIVADO BONECHAR	99
ANEXO 4 – ALTURAS DIÁRIAS DE PRECIPITAÇÃO – 2014	100
ANEXO 5 – FICHA TÉCNICA – METABISSULFITO DE SÓDIO.....	101
ANEXO 6 – FICHA TÉCNICA – ÁCIDO CLORÍDRICO – HCL A 30%	102
ANEXO 7 – FICHA TÉCNICA – HIDRÓXIDO DE SÓDIO – NaOH A 50%.....	103

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE 1 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	105
APÊNDICE 2 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE pH.....	107
APÊNDICE 3 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE TURBIDEZ	109
APÊNDICE 4 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE COR	111
APÊNDICE 5 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE CLORO RESIDUAL LIVRE	113
APÊNDICE 6 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE CLORETO	115
APÊNDICE 7 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE FLUORETO.....	117
APÊNDICE 8 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE DUREZA.....	119
APÊNDICE 9 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE SURFACTANTES ...	121

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONAMA	- Conselho Nacional de Meio Ambiente
DBO	- Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	- Demanda Química de Oxigênio
ETA	- Estação de Tratamento de Água
ETAI	- Estação de Tratamento de Água Industrial
ETAR	- Estação de Tratamento de Águas Residuárias
ETE	- Estação de Tratamento de Esgotos
GAC	- Carvão ativado granular
LSI	- <i>Langelier Saturation Index</i> – índice de saturação de Langelier
MBR	- Biorreator com Membranas
μs	- Milisiemens
pH	- Potencial Hidrogeniônico
PAC ¹	- Cloreto de Poli Alumínio
PAC ²	- Carvão Ativado em Pó
PDA	- ágar de batata (<i>potato dextrose ágar</i>)
PSM	- Processo de Separação por Membranas
PVC	- Cloreto de polivinila
RMC	- Região Metropolitana de Curitiba
OR	- Osmose Reversa
SDI	- <i>Silt Density Index</i> – índice de densidade de sedimentos
SDSI	- <i>Stiff & Davis Stability Index</i> – índice de estabilidade de Stiff & Davis
SEMA – PR	- Secretaria Estadual de Meio Ambiente do Estado do Paraná
THM	- Trihalometanos

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVO GERAL.....	4
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA	6
2.2	PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR OSMOSE REVERSA	8
2.3	CARACTERÍSTICAS DAS MEMBRANAS	11
2.3.1	Membranas de fibra oca	15
2.3.2	Membranas espiraladas	16
2.3.3	Membranas tubulares	17
2.3.4	Membranas de placa plana	18
2.3.5	Variáveis que influenciam a vida útil das membranas	18
2.4	O EMPREGO DE MEMBRANAS	21
2.4.1	Tratamento e destinação de rejeitos provenientes de membranas	27
2.4.2	Incrustações e limpeza química	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1	DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO DA ETAI	36
3.2	DESCRIÇÃO DA UNIDADE PILOTO DE OSMOSE REVERSA	38
3.2.1	Sistema de filtração	40
3.2.2	Descrição do sistema de limpeza da membrana de osmose reversa	46
3.3	ANÁLISES PARA A CARACTERIZAÇÃO DO CONCENTRADO	47
3.3.1	Determinação da cor	48
3.3.2	Determinação da concentração de íons fluoretos	49
3.3.3	Determinação da concentração de cloro livre	49
3.3.4	Determinação da concentração de íons cloretos	49
3.3.5	Determinação de dureza total	50
3.3.6	Determinação do potencial hidrogeniônico – pH e da temperatura	51
3.3.7	Determinação de turbidez	51

3.3.8	Determinação da condutividade elétrica	52
3.3.9	Determinação da concentração de surfactantes	52
3.4	DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE DENSIDADE DE SEDIMENTOS	52
3.5	PROCEDIMENTO DE LIMPEZA QUÍMICA DAS MEMBRANAS DE OSMOSE REVERSA	54
3.6	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	55
3.7	ANÁLISES DO RESÍDUO PROVENIENTE DA LIMPEZA QUÍMICA	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	57
4.1.1	Análise Do Coeficiente De Variação	58
4.1.2	Análise do coeficiente de determinação (R^2)	63
4.2	ANÁLISE GRÁFICA DOS RESULTADOS	65
4.2.1	Resultados das determinações de condutividade elétrica	66
4.2.2	Resultados das determinações de turbidez	67
4.2.3	Resultados das determinações do pH	69
4.2.4	Resultados das determinações de cor	70
4.2.5	Resultados das determinações da concentrações de cloro livre	71
4.2.6	Resultados das determinações das concentração de íons fluoreto	73
4.2.7	Resultados das determinações das concentração de cloreto	74
4.2.8	Resultados das determinações de dureza total	75
4.2.9	Resultados das determinações de concentração de surfactantes	77
4.3	RESULTADO DO ÍNDICE DE DENSIDADE DE SEDIMENTOS	78
4.4	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO QUÍMICO	78
4.5	ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE MEMBRANAS PARA O ATENDIMENTO DA ETAI	79
4.6	ALTERNATIVAS PARA O TRATAMENTO DO CONCENTRADO	80
4.7	MELHORIAS PARA A ETAI	82
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	83
	REFERÊNCIAS	87

ANEXO..... 96

APÊNDICE 104

1 INTRODUÇÃO

A cada dia a água se torna um recurso mais escasso e com maior valor econômico. Na América Latina, Central e do Norte, na Europa, na África e na Ásia há regiões aonde o stress hídrico vem se tornando comum, em especial em locais com baixa pluviosidade e sem um regime de chuvas definido, os países mais afetados são a o Brasil, Venezuela, Peru, Colômbia, Estados Unidos, Espanha, Turquia, Itália, Grécia, Malásia, Índia e outros.

Diante da possibilidade de escassez de água diversos países elaboraram estratégias para o reúso da água, tendo como base o ciclo da água e a possibilidade da renovação dos recursos hídricos em diferentes estados, sólido, líquido e gasoso. Nesta ótica os recursos hídricos disponíveis foram provenientes de reúso, que pode ser planejado ou não planejado e direto ou indireto.

O reúso direto ocorre quando se utiliza efluente tratado para a produção de águas, esta água poderá ter finalidade industrial, agrícola, recarga de aquífero e até mesmo o abastecimento público. O reuso indireto ocorre quando a água já utilizada, uma ou mais vezes, é lançada dos corpos hídricos, diluída e utilizada novamente.

Outra classificação inerente ao reuso seria o reúso planejado e o reúso não planejado. O primeiro ocorre quando o reuso direto ou indireto é planejado pelas autoridades, que tratam adequadamente as águas servidas antes do lançamento ou do encaminhamento aos sistemas de distribuição, garantindo a segurança da população com a adoção ou a melhoria do sistema tratamento de efluentes, com a utilização do efluente tratado na agricultura, diluição em corpos hídricos e a recarga de aquíferos subterrâneos. O reuso não planejado ocorre sem a previsão das autoridades competentes, normalmente sem a adoção de tecnologias que garantam o tratamento necessário ao efluente, que pode ser direcionado a estações de tratamento público e privado de águas.

Os processos convencionais de filtração, devido ao baixo custo continuam sendo empregados em muitas estações de tratamento de águas (ETA's), porém perdem competitividade quando não há mais espaço para a construção e ampliação da estação ou quando a taxa de filtração já está na capacidade nominal, não pos-

suindo mais alternativas se não a aplicação do processo de separação por membranas (PSM).

O uso de membranas de filtração no tratamento de água e de efluentes vem crescendo ao longo dos anos, em todo o mundo. As membranas para a filtração podem ser utilizadas no tratamento de efluentes aeróbios ou anaeróbios. E elas apresentam como vantagem a redução de área para a instalação quando comparadas aos de processos convencionais de tratamento que englobam os processos biológicos e físico-químicos.

O PSM pode ser considerado como um tratamento avançado para a água e de pós-tratamento para os efluentes industriais e domésticos. O produto resultante deste processo, denominado de permeado, não possui alto valor agregado quando comparado aos produtos provenientes de outras indústrias como a de alimentos de higiene pessoal.

O material concentrado, ou rejeito proveniente de PSM, necessita de tratamento posterior. Nele estão contidos compostos orgânicos e minerais que pelo tamanho, forma ou estrutura não foram capazes de atravessar as membranas filtrantes. O rejeito produzido em uma unidade de separação por membranas, expresso em volume, representa aproximadamente 20 a 30% do total do material filtrado e, dependendo do tamanho da planta, da tecnologia empregada e das características da água de alimentação, este valor pode ser ainda maior.

Acredita-se que por se tratar de tratamento de água retirada do subsolo ou de um corpo hídrico superficial, o resíduo resultante deste processo possa retornar ao meio ambiente sem qualquer tipo de tratamento.

No entanto, o resíduo proveniente de um PSM é considerado como efluente proveniente da indústria do tratamento da água e deve ser tratado seguindo a legislação vigente.

Do ponto de vista econômico a água é considerada um bem de alto valor agregado enquanto os efluentes sanitários, muitas vezes, não são vistos como tal.

No Brasil, além de leis, decretos, portarias, contratos que regulam a qualidade da água produzida deve-se ater à Resolução CONAMA 430/2011, que possui como objetivo determinar a qualidade mínima do efluente tratado para o posterior lançamento nos corpos hídricos. No Estado do Paraná a Resolução SEMA – PR 21/2009 estipula metas e prazos para o tratamento dos resíduos produzidos em estações de tratamento de água –(ETA) e de esgotos (ETE).

Dessa forma o rejeito proveniente do PSM deve ser tratado para a posterior disposição final, ou reciclado à unidade, como ocorre com os compostos lixiviados e os concentrados provenientes do tratamento de efluentes sanitários.

Estes podem ainda ser conduzidos a colunas de filtração utilizando carvão ativado granular ou em forma de pó e dependendo do caso passar por processos de coagulação e floculação utilizando polímeros. No entanto a caracterização do resíduo possui fundamental importância na escolha do processo de tratamento, bem como as variações de parâmetros que ocorrem em função da qualidade do manancial envolvido, as quais devem consideradas e avaliadas conjuntamente.

Estudos comparativos de preço da água dessalinizada mostram a redução em países desenvolvidos (Europa) dos anos 90 para os anos 2000, de 1,50 US\$/m³ para 0,50 US\$/m³, sendo que quase metade do custo de operação se deve a energia elétrica e somente as bombas representam cerca de 85% da energia consumida.

No Estado de São Paulo, 30% do total demandando para o setor industrial, utiliza o reúso direto de água industrial. A SABESP e a Foz do Brasil (controlada pelo Grupo Odebrecht Ambiental) uniram-se em uma sociedade de propósito específico (SPE) denominada de Aquapolo, esta unidade foi instalada em uma ETE que trata o efluente de forma aeróbia e possui em sua unidade de pós-tratamento biorreatores de membrana e a unidade de osmose reversa.

No nordeste brasileiro há trabalhos em andamento e concluídos sobre a utilização de membranas de osmose reversa para a dessalinização da água extraída de poços, e devido ao elevado teor de sais as membranas utilizadas filtram cerca de 30 a 40% do volume de água extraído e o restante de 60 a 70% é devolvido para o solo sem nenhum tipo de tratamento, prejudicando a qualidade do solo da região e até mesmo contaminando os aquíferos existentes.

A estação de tratamento de água industrial localizada na Região Metropolitana de Curitiba (RMC) é alimentada com água proveniente do Rio Iguaçu e possui tratamento denominado de ciclo completo envolvendo operações unitárias de coagulação, floculação, decantação e filtração, produzindo água não potável para indústrias da região. Devido à sua localização e pelas características físico-químicas do corpo hídrico, esta unidade pode ser considerada como uma unidade de reúso indireto e não planejado.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho foi avaliar em uma unidade piloto de filtração, instalada na ETAI, a qualidade da água de alimentação, a qualidade do rejeito, a qualidade do permeado e o resíduo químico proveniente desta unidade piloto. O manancial utilizado para a alimentação da ETAI encontra-se em processo de degradação e o processo de ciclo completo apresenta dificuldades para o atendimento da qualidade da água, que é distribuída para fins não potáveis às indústrias.

Em decorrência da crescente demanda por água, da baixa disponibilidade hídrica da região e das tarifas diferenciadas aplicadas às indústrias faz-se necessário a substituição de água potável por água de reúso.

Neste sentido o presente trabalho visa a contribuir de forma significativa com na melhoria da qualidade da água industrial em substituição à água potável.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Operacionalizar a unidade piloto de tratamento avançado de água com o uso de membranas de osmose reversa;
- b) Analisar a qualidade da água tratada pelo processo convencional da ETAI e comparar com os resultados do concentrado obtidos pelo processo de tratamento avançado de água PSM em uma unidade piloto contendo membrana de osmose reversa;
- c) Caracterizar o resíduo proveniente da limpeza química do equipamento de osmose reversa;
- d) Estimar a quantidade de membranas necessárias para o atendimento parcial e integral da estação de tratamento de água industrial;
- e) Sugerir alternativas para o descarte ou tratamento do rejeito gerado na unidade piloto visando à minimização de impactos ambientais;
- f) Propor alternativas no processo de tratamento da ETAI a fim de melhorar o seu processo produtivo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresentada a seguir aborda os assuntos envolvidos neste trabalho, desde o processo para o tratamento da água utilizado até o estado da arte em membranas de filtração.

O conceito de filtração é ampliado e aplicado no PSM, podendo ser definido como a separação de duas ou mais partículas sólidas de uma corrente fluida (CHERYAN, 1986).

De acordo com Vargas (2003) o PSM pode envolver a separação de fluxo único em duas correntes de concentrações distintas e ao utilizar a diferença de pressão para o fluido atravessar uma barreira física a membrana semipermeável, o material é selecionado. As correntes com composições diferentes normalmente recebem a nomenclatura de concentrado ou rejeito e permeado ou filtrado. Na corrente do rejeito os sais encontram-se em maior concentração do que na corrente de permeado ou filtrado, que possui menor quantidade de sais (FOUST *et al.* 1960; PEREIRA *et al.*, 2014).

Nos últimos 30 anos os PSM vem sendo aplicados a diferentes segmentos industriais, principalmente naqueles que exigem ou necessitam de processos de filtração, clareamento ou fracionamento de correntes, onde se necessita de um desempenho confiável e repetitivo. O uso em larga escala desta tecnologia vem substituindo os processos de separação convencionais (HO e SIRKAR, 1992).

Dessa forma o PSM visa separar, concentrar ou purificar substâncias e é utilizado para gerar um produto final mais concentrado, como na indústria de alimentos e higiene, ou ainda para obter produtos mais purificados como a água utilizada nas indústrias de cosméticos, farmacêuticas dentre outras.

No Brasil, os filtros de alta taxa são amplamente empregados, sendo rara a utilização de filtros convencionais. Na Europa, em especial na Alemanha a filtração convencional, também denominada de lenta é aplicada, no entanto essa operação unitária vem perdendo espaço para os PSM tendo em vista a escassez de áreas para a ampliação do processo e os custos elevados para a aquisição e a construção de unidades de processo.

O uso da água no Brasil se divide em 40% do volume retirado para a agricultura, 27% para o abastecimento humano urbano, 17% para a indústria, 13% para a produção animal e 3% para o abastecimento humano rural (ANA, 2007).

2.1 PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA

Grande parte das partículas presentes na água não pode ser removida sem o emprego de tratamento físico-químico, pois este permite a transformação de pequenos elementos em constituintes maiores, capazes de serem removidos por sedimentação ou filtração. Estes tratamentos são denominados de coagulação e floculação.

Os processos físico-químicos de coagulação, floculação e decantação são utilizados tanto para o tratamento de águas quanto para o tratamento de efluentes líquidos industriais, devido à eficiência e a facilidade na operação. Estes processos englobam a adição de produtos químicos, com a finalidade de remover impurezas que possam estar em suspensão ou dissolvidas em estado coloidal.

A coagulação pode ser definida como a aglutinação da fase dispersa de uma solução coloidal provocada pela adição de eletrólitos. Nela ocorre a transformação de impurezas que se encontram em estado coloidal, ou em suspensão, pela adição de um agente coagulante. Algumas partículas mesmo em suspensão não são removidas por coagulação sendo necessárias operações complementares como a sedimentação ou a filtração.

Nesse processo são adicionados produtos que facilitam a redução de forças eletrostáticas de repulsão e ao mesmo tempo mantém separadas as partículas em suspensão. Os produtos químicos mais utilizados são o cloreto férrico, sulfato de alumínio e o cloreto de polialumínio (PAC¹). O excesso de produtos não necessariamente melhora o desempenho do processo de coagulação e para uma boa eficiência é necessário a busca por valores ideais de pH e da quantidade de produto coagulante adicionada.

Para Lee *et al.* (2009) o tipo e a dosagem do agente coagulante interfere na eficiência de remoção de partículas. Por sua vez Huang *et al.* (2009) e Leiknes

(2009) evidenciam que a coagulação seria mais apropriada para a remoção de materiais suspensos ou em formas coloidais visto que dificilmente estes decantam ou levariam muito tempo para decantar. Neste caso a utilização de um pré-tratamento seria o mais indicado.

Para a coagulação da água bruta normalmente se utiliza sais de ferro ou de alumínio. A aplicação destes sais propicia a formação de precipitados do metal (DI BERNARDO e PAZ, 2008).

Os coloides, por serem pequenos, são pouco influenciados pela força gravitacional fazendo com que permaneçam estáveis em suspensão. Para uma boa eficiência do processo além do pH e da quantidade de coagulante, é necessário conhecer as condições hidrodinâmicas do processo (SCHNEIDER, 1991).

Nos processos de separação por membranas (PSM), em especial na micro-filtração e ultrafiltração, podem ocorrer o prolongamento da vida útil da membrana e o retardamento da colmatção (entupimento) quando este for combinado com o processo de coagulação, como pré-tratamento. A combinação citada é mais indicada quando a água possui uma grande quantidade de partículas finas a serem removidas.

As partículas aglutinadas na coagulação se transformam em partículas maiores aglomeradas, denominadas de flocos, formados a partir da aglomeração destas. A floculação ocorre devido à desestabilização no equilíbrio de forças durante a coagulação. Os flocos possuem cargas elétricas de íons metálicos hidrolisados que foram liberados pelos coagulantes com a função de reduzirem as forças repulsivas entre os coloides, possibilitando assim a atração e não mais a repulsão.

De acordo com Cassini (2008) o contato e o crescimento de sólidos agregados ocorrem sob agitação lenta por meio da adição de agentes coagulantes, os quais propiciam a formação de aglomerados maiores, aumentando a eficiência do processo que tem por base o mecanismo de transporte de partículas.

Flocos maiores são formados a partir da união de flocos menores até um tamanho crítico, quando não ocorre mais o crescimento deste. Para atingir a estabilidade sem a desestruturação do floco, o gradiente de velocidade deve ser baixo, a fim de propiciar a aproximação e a aglomeração das partículas e dos flocos.

A sedimentação, também conhecida como clarificação ou decantação, ocorre devido à ação da gravidade. A queda livre de partículas dispersas no meio fluido que não sofre interferência mútua durante o processo de sedimentação promove a

separação das fases líquida e sólida até se obter um fluido clarificado e um material sedimentado denominado de lodo ou lama (HOUAISS e VILLAR, 2001; FOUST *et al.* 1960).

No tratamento de água a sedimentação ocorre depois dos processos de coagulação e floculação, e consiste em deixar em repouso a mistura contendo partículas aglutinadas em suspensão e dissolvidas, durante um determinado período de tempo, com isso, as partículas suspensas apresentam movimento descendente no meio líquido devido à ação gravitacional.

Em uma estação de tratamento de água (ETA) como em outras estações, a clarificação ocorre com a utilização de água floculada contendo partículas sob a forma de flocos e não discretas como grãos de areia. A unidade que promove a sedimentação em uma ETA é denominada de decantador, o qual pode ser classificado como convencional ou de alta taxa. (DI BERNARDO e PAZ, 2008).

A filtração consiste na separação de sólidos presentes em um fluido que o carrega, fazendo-o passar por meio de um material poroso capaz de reter ou remover parte das impurezas. A separação ocorre pela passagem forçada do fluido por meio de uma membrana porosa. A filtração na ETA ocorre da mesma maneira que na filtração em escala de laboratório, porém é necessário um maior volume do meio filtrante.

A principal função do filtro seria a remoção de partículas que não foram retidas pelas unidades descritas anteriormente, normalmente partículas suspensas, coloidais e micro-organismos (DI BERNARDO e PAZ, 2008).

A filtração pode ser considerada como um processo fundamental para a produção de água de acordo com os padrões exigidos seja, para a potabilidade ou para o adimplemento contratual do consumo industrial e muitas vezes é a etapa final de remoção de impurezas de uma ETA.

2.2 PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR OSMOSE REVERSA

O fenômeno conhecido como osmose, foi descrito em 1798 por Jean Antone Nollet que observou e constatou a alteração de concentração entre fluidos separa-

dos por uma membrana semipermeável de forma que um fluido (solução) de menor concentração de íons (meio hipotônico) se movimenta para o fluido com maior concentração de íons (meio hipertônico) até a obtenção do equilíbrio. Para que ocorra este movimento seria necessário a utilização de uma membrana semipermeável (GLATER, 1998).

De acordo com WEF (2006) se fossem colocadas duas soluções de concentrações diferentes separadas por uma membrana semipermeável, a velocidade de migração da água do meio hipotônico para o meio hipertônico ocasionaria um desnível entre as soluções conhecido como pressão osmótica.

Após o fim da II Guerra Mundial, a população da Califórnia teve um crescimento rápido e a região semiárida enfrentava problemas com o abastecimento de água potável. Durante este período, a "conversão da água" de solução salina foi motivo de pesquisa de alta prioridade nos Estados Unidos e, especialmente, na Universidade da Califórnia. Em 1952, o Ministério do Interior criou o Escritório de Água Salina, que lançou uma abrangente pesquisa no desenvolvimento da dessalinização e em 1954, um equipamento foi construído para a verificação experimental dos estudos, equipamento este chamado de "Conversor para o princípio da osmose" (GLATER, 1998, BJERKE, 2002).

O transporte de água do meio mais concentrado para o menos concentrado equivale a diminuir ainda mais a concentração do soluto presente no meio aquoso. Com base neste fato, pode-se utilizar o processo de osmose reversa para purificar as soluções (WEF, 2006).

Para Vargas (2008), o processo inverso recebeu a denominação de osmose reversa, onde o fluido passa do meio mais concentrado para o meio menos concentrado realizando um caminho inverso àquele imposto pela pressão osmótica. Para tanto se faz necessário o fornecimento de energia ao sistema e esta energia provém da pressão hidráulica artificial imposta ao sistema (GLATER, 1998; WEF, 2006).

Os processos por Osmose Reversa datam seu início em meados do século 20, quando surgiram pesquisas pela busca de soluções para o tratamento da água do mar para torná-la potável (GLATER, 1998,).

Segundo Glater (1998), o processo de tratamento de água por osmose reversa consiste, então, em forçar a passagem de água limpa por meio de uma membrana semipermeável, a qual só permitirá passar água e não as demais substâncias e elementos que estejam presentes no meio, tornando a água mais pura.

Dessa maneira os íons e os sais ficam retidos na membrana semipermeável e a água passa. O material retido na membrana foi denominado de concentrado e o material que atravessou a membrana de permeado, pois permeou através da membrana (GLATER, 1998).

A membrana de osmose reversa foi o primeiro tipo de membrana utilizada para o tratamento de efluentes. A aplicação de uma membrana dessa qualidade visava o reúso, reaproveitamento e a recarga de aquíferos em um local de elevada escassez hídrica (BJERKE, 2002).

No tratamento de água e de efluentes de indústrias químicas e de alimentos a utilização de membranas vem ganhando espaço na última década, em especial como filtro (WEF, 2006).

Na FIGURA 2.7 são apresentados de forma esquemática os dois fenômenos de osmose.

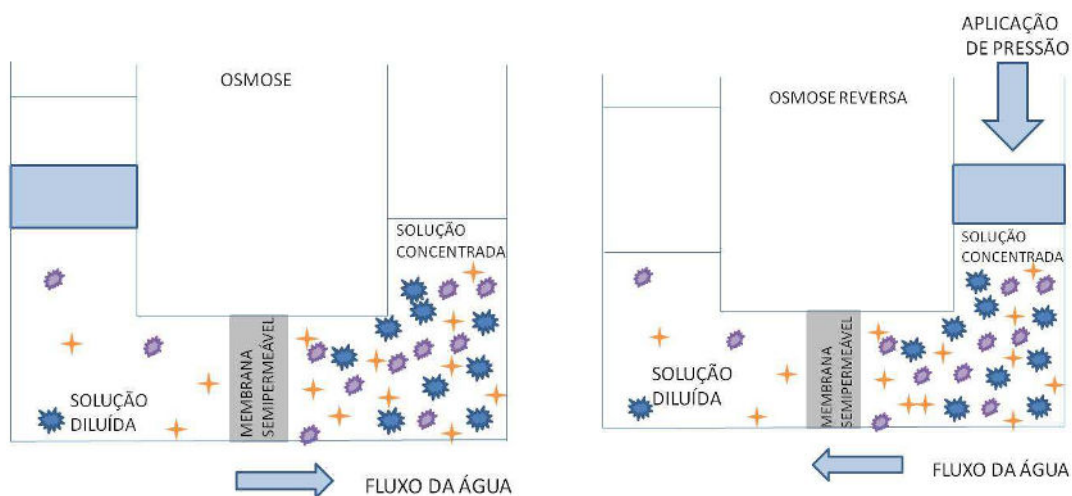


FIGURA 2.1 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA OSMOSE E DA OSMOSE REVERSA (OR)
Fonte: elaborado pela autora

2.3 CARACTERÍSTICAS DAS MEMBRANAS

Uma membrana pode ser definida como um material sólido, cristalino e ao mesmo tempo poroso, com poros de tamanhos regulares, que possuem a função de separar duas soluções, um filme fino atua como uma barreira seletiva para o transporte de componentes destas soluções, quando aplicada uma força externa, diferencial de pressão, sucção ou potencial elétrico. Este diferencial impulsiona a filtração nas membranas (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001).

Trata-se de um sistema de separação de materiais, pois não ocorrendo transformação química ou biológica durante o processo. O nível, grau de seletividade das membranas varia de acordo com o tamanho dos poros ou pela alteração da área superficial de filtração devido à colmatção (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001).

Para Mulder (1996) a membrana é o elemento essencial de todos os PSM, o “coração” podendo ser considerada a barreira seletiva ou a interface entre duas fases. A escolha da membrana apropriada, que envolve o tipo da membrana, o material em que ela é fabricada, o tamanho dos poros e a área dos mesmos são de suma importância para o sucesso ou não do processo.

A escolha mais adequada deverá isolar as espécies dissolvidas de determinados tamanhos enquanto permite que outros elementos ultrapassem a membrana semipermeável. Há elementos que são decisivos, como; o teor de sólidos dissolvidos, o peso molecular das espécies que compõem o fluido, a natureza e o carregamento do material suspenso. Tais elementos irão orientar a escolha e o tipo da geometria da membrana, bem como o pH do fluido, a temperatura, a vazão de entrada, fatores importantes para a tomada da decisão final (MULDER, 1996).

Para Ho e Sirkar (1992) uma membrana pode ser seletiva para uma ou mais espécies químicas ou microbiológicas. Algumas espécies possuem preferência para atravessar uma membrana em relação à outra. Assim é possível denominar o processo de separação por membranas como uma transferência seletiva controlada por uma ou mais espécies de uma determinada fase para outra.

As membranas são utilizadas com maior frequência em operações de separações de fluidos com alta viscosidade ou em separação de materiais em suspen-

são. Os materiais utilizados para a confecção de membranas normalmente são poliméricos, cerâmicos ou metálicos (MULDER, 1996; HO & SIRKAR, 1992).

Quando se busca alto rendimento normalmente são utilizadas as membranas poliméricas, que podem ser limpas mecanicamente de forma automatizada (MULDER, 1996; HO & SIRKAR, 1992).

A aplicação de membranas em ambientes agressivos, onde existam solventes, vapores corrosivos e variação de pH pode indicar que um material seja mais propício que o outro. Como exemplo tem-se as membranas cerâmicas que podem ser revestidas com alumina ou zircônio, aplicado na superfície interna do suporte de cerâmica (MULDER, 1996; HO & SIRKAR, 1992).

A durabilidade, o custo de manutenção e a vida útil operacional mais elevada devem ser levados em consideração no momento da escolha. No entanto a membrana cerâmica não possui resistência à abrasão, mesmo sendo revestida com polímeros (HO & SIRKAR, 1992).

O custo de investimento destas membranas é mais elevado quando comparado ao das membranas poliméricas, no entanto para determinadas aplicações apenas às membranas cerâmicas são viáveis (MULDER, 1996).

A tecnologia para a filtração utilizando membranas foi desenvolvida de acordo com o acondicionamento e o tipo de material utilizado para a fabricação. As membranas são confeccionadas em formatos e materiais distintos que influenciam a; área superficial, a porosidade, a capacidade e a taxa de filtração. A denominação é feita de acordo com o tamanho do poro e se a membrana é instalada no interior ou exterior do reator.

O menor nível de separação na filtração por membranas inicia com a osmose reversa (OR), menor nível molecular. As espécies mais dissolvidas irão passar por meio da membrana ao passo que se avança pela faixa de filtração, de desaguamento, ou purificação de água com a osmose reversa passando pela nanofiltração, ultrafiltração até a microfiltração (MULDER, 1996; HO & SIRKAR, 1992).

A separação de partículas de diferentes tamanhos de microns a Angstroms é possível de acordo com a porosidade da membrana e a variação da pressão interna, ou seja, 0,1 MPa para a microfiltração e até 7 MPa para a osmose reversa (MULDER, 1996; HO & SIRKAR, 1992).

A membrana utilizada para a osmose reversa é muito fina e retém praticamente todas as espécies dissolvidas, incluindo sais e açúcares. O tamanho médio

do poro é de aproximadamente 0,0001 μm , retendo até os sais monovalentes. Por se tratar de um sistema artificial de filtração a pressão deve ser superior à pressão osmótica natural da água dissolvida ou de outro solvente na membrana semipermeável (MULDER, 1996; HO & SIRKAR, 1992).

Estas membranas são utilizadas na indústria alimentícia para a concentração de sucos de frutas, chás, cafés e soluções de açúcares de baixa densidade. Esta tecnologia pode ser aplicada para concentrar as correntes de efluentes de águas residuais, tais como as águas lixivantes de aterros sanitários (MULDER, 1996; HO & SIRKAR, 1992).

A membrana de nanofiltração possui poros maiores que os da membrana de osmose reversa, e o tamanho médio de poros de aproximadamente 0,001 μm , com capacidade de retenção de sais bivalentes, pode ser utilizada para a separação de corantes ou para a concentração de antibióticos (MULDER, 1996; HO & SIRKAR, 1992).

A membrana de ultrafiltração possui tamanho médio de poros de aproximadamente 0,01 μm sendo utilizada por diversos segmentos industriais tanto para separar fluxos como as correntes de efluentes das tinturarias e fábricas de papel e celulose e ainda para a concentração de proteínas na indústria de laticínios ou para o clareamento de sucos. Devido a essa gama de aplicações a membrana de ultrafiltração pode ser empregada como pré-tratamento a fim de evitar a incrustação de partículas nas colunas de separação (MULDER, 1996; HO & SIRKAR, 1992).

A membrana de microfiltração possui tamanho médio de poro em torno de 0,1 μm . Normalmente os materiais empregados para poros deste diâmetro são polímeros ou cerâmicas, e são utilizadas para o processamento de líquidos do setor químico, farmacêutico, de bebidas e de alimentos e ainda para separar os efluentes de águas residuais (MULDER, 1996; HO & SIRKAR, 1992).

Os filtros denominados de convencionais para o tratamento de água removem o material coloidal e particulado por meio de adsorção química ou física, retenção física, sedimentação, floculação e impactação. Não são considerados barreiras absolutas para as partículas, pois sua eficácia é limitada devido à colmatação da área filtrante e o acúmulo de material no seu interior. Sendo necessária a limpeza e manutenção periódica, por meio de ciclos de retrolavagem para evitar a formação de canais preferenciais de fluxo nos bancos de areia e de carvão antracito. De modo

geral os filtros convencionais possuem menor eficiência quando comparados às membranas de microfiltração (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001).

A diferença de porosidade existente entre os diversos tipos de membranas pode ser visualizada na FIGURA 2.1

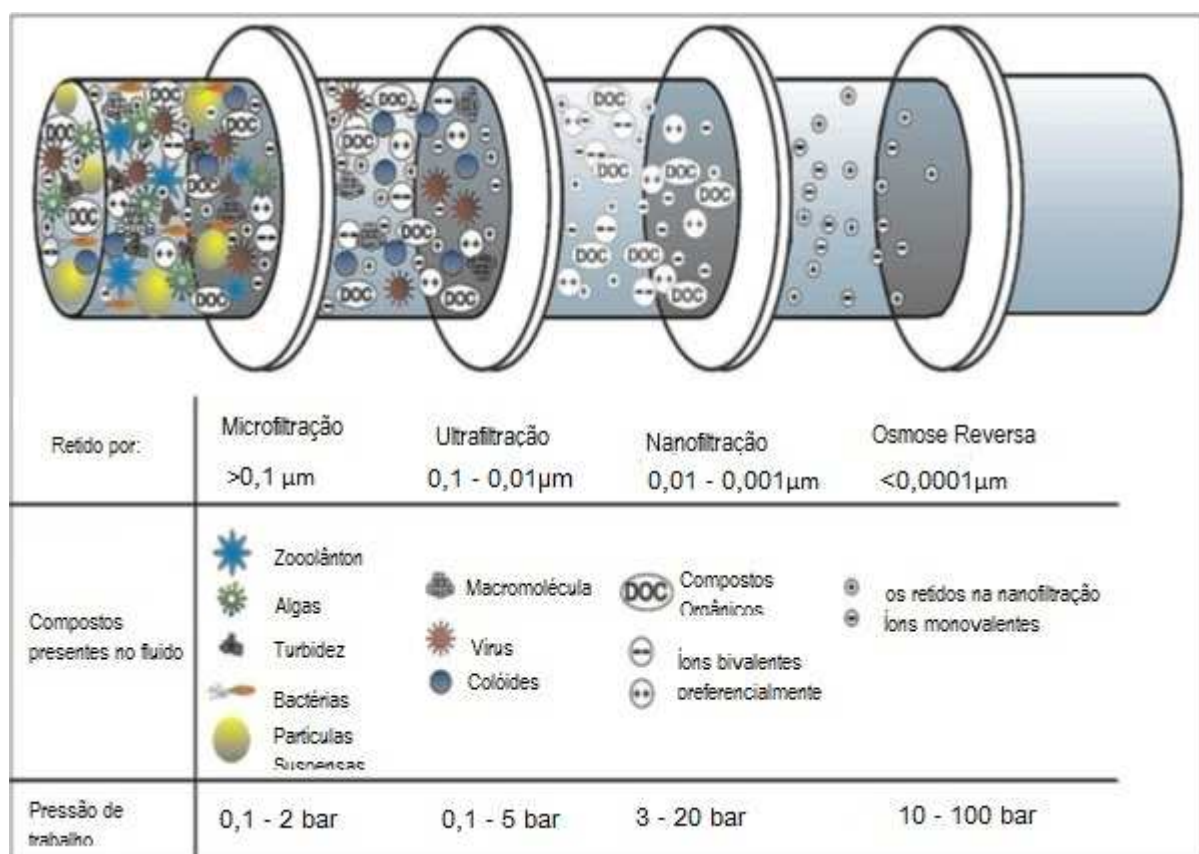


FIGURA 2.2 – ESCALA DE FILTRAÇÃO DE MEMBRANAS

Fonte: Cwater – tradução livre (2014)

As membranas possuem grande variedade de formas (geometria) e configurações dos módulos que podem ser ajustados a diversas aplicações. As formas de membrana produzidas comercialmente são; fibra oca, espiralada, tubular polimérica, tubular cerâmica, membrana de fibra oca para biorreator – submersa e membrana de placa plana (MULDER, 1996; HO & SIRKAR, 1992; GLATER, 1998).

2.3.1 Membranas de fibra oca

As membranas de fibra oca consistem em fibras extrusadas com uma pequena parte oca como visualizada na FIGURA 2.3. A filtração pode ocorrer da parte interna da fibra para a parte externa ou da parte externa da fibra para a parte interna, viabilizando o ciclo de retrolavagem. Embora sejam mais resilientes às pequenas partículas do que as membranas espirais, as membranas de fibra oca também necessitam de pré-filtração quando as partículas ou fibras maiores estiverem presentes no material de alimentação. A maior parte das membranas de fibra oca não pode ser usada em pressões acima de 0,2 MPa sem o rompimento, quebra desses finos fios (MULDER, 1996; HO & SIRKAR, 1992; GLATER, 1998).

Membranas de fibra oca podem ser empregadas em estrutura externa ao tratamento convencional, ou em biorreatores de membranas (MBR).

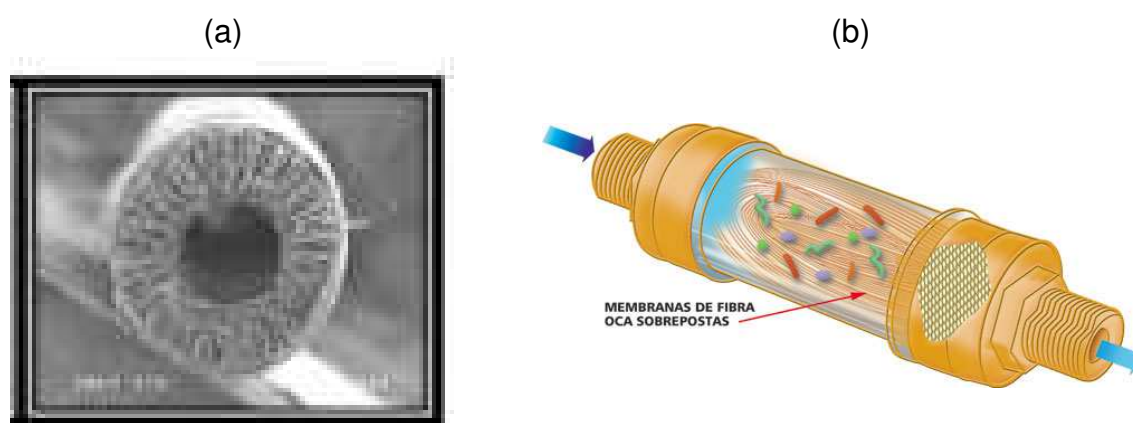


FIGURA 2.3 – MEMBRANA DE FIBRA OCA

Fonte: (a) Pam membranas seletivas (2014)

(b) Tecnologia HF membranas de fibra oca (2014)

2.3.2 Membranas espiraladas

As membranas espiraladas possuem o formato de um tubo cilíndrico espiralado, com um filtro bem apertado interposto entre os espaçadores de malha e envolto em um tubo de diâmetro pequeno. Normalmente são empregadas em processos de nanofiltração e osmose reversa, como pode ser visualizado na FIGURA 2.4.

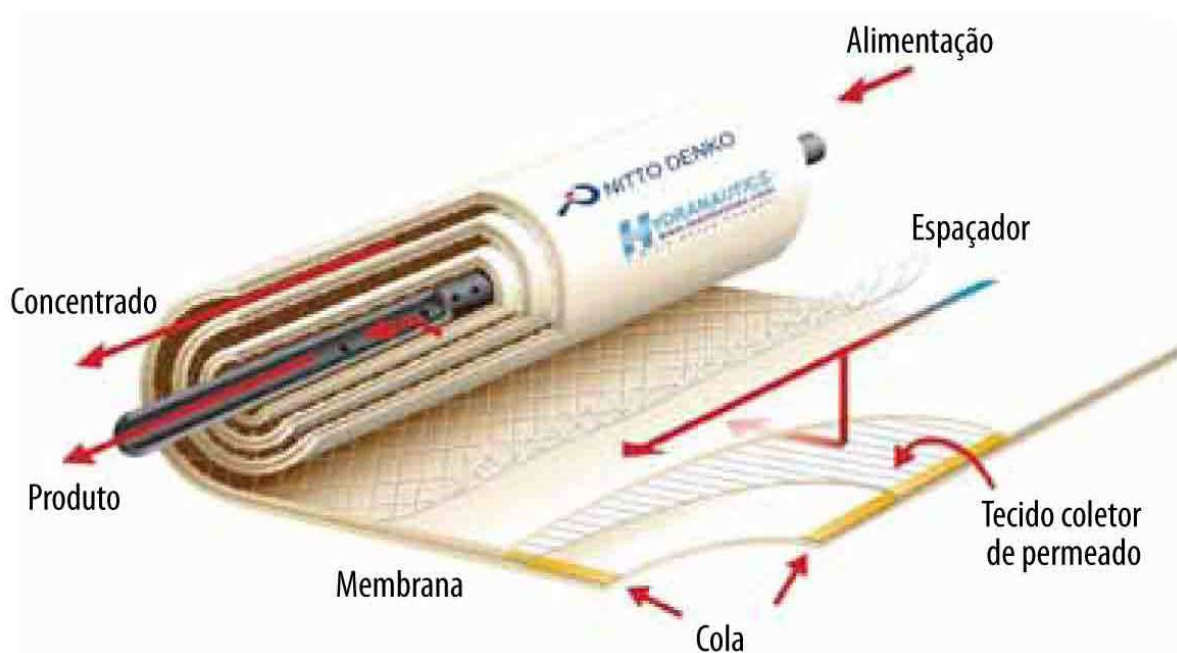


FIGURA 2.4 – MEMBRANA ESPIRALADA

Fonte: Petróleo e Energia – Nitto Denko (2014)

Devido à alta densidade de acondicionamento a área de superfície é maior em uma unidade, denominada de módulo, de filtração que pode ser fornecida pelas membranas tubulares. Se no fluido a ser filtrado existirem sólidos suspensos, as membranas espiraladas necessitam de pré-filtração para evitar a colmatação, bloqueios e entupimentos. Devido à pesquisa e o desenvolvimento de novos materiais e espaçadores de malha, o número de aplicações destas membranas vem crescendo (MULDER, 1996; HO & SIRKAR, 1992; GLATER, 1998).

2.3.3 Membranas tubulares

As membranas tubulares, que pode ser visualizadas na FIGURA 2.55 e FIGURA 2.66. Apresentam vantagens como a de controlar líquidos viscosos com elevado teor de sólidos suspensos, permitir a limpeza mecânica ou química automatizada podendo ser instalada em diversos módulos como plásticos ou aço inoxidável (MULDER, 1996; HO & SIRKAR, 1992; GLATER, 1998).

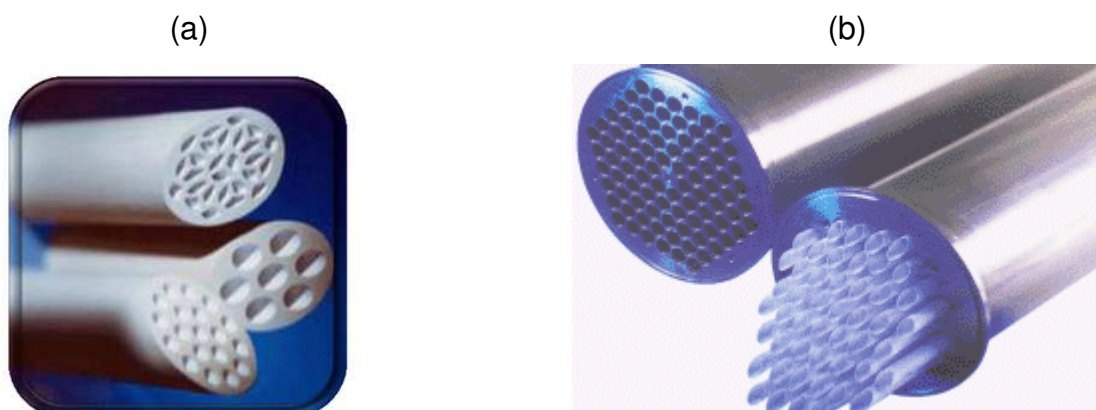


FIGURA 2.5 – MEMBRANA TUBULAR

Fonte: (a) Grupo água (2014)

(b) Associação Brasileira dos Técnicos Têxteis (2014);



FIGURA 2.6 – MEMBRANA TUBULAR CERÂMICA

Fonte: (a) Membranas cerâmicas (2014)

(b) *Italian ceramic* (2014)

2.3.4 Membranas de placa plana

As membranas de placa plana, visualizada na FIGURA 2.7, podem ser utilizadas em Biorreatores de Membranas (MBR) e destinam-se, em grande parte, ao tratamento de efluentes sendo necessário a presença de matéria orgânica e de micro-organismos (MULDER, 1996; HO & SIRKAR, 1992),

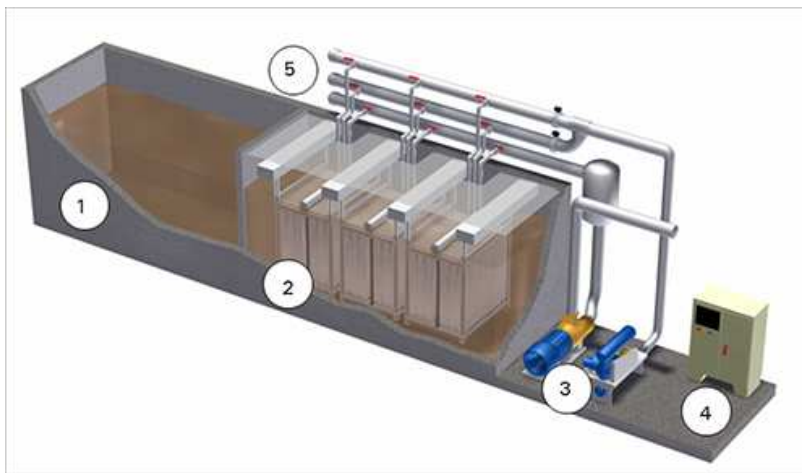


FIGURA 2.7 – ESQUEMA TÍPIDO DE UM SISTEMA DE MBR:

- 1) REATOR BIOLÓGICO;**
- 2) TANQUE COM MEMBRANAS;**
- 3) BOMBA PARA PERMEADO E SOPRADOR DE AR PARA A MEMBRANA;**
- 4) PAINEL DE CONTROLE ELÉTRICO;**
- 5) TUBULAÇÕES PARA A AERAÇÃO E CAPTAÇÃO DO PERMEADO**

Fonte: Pollution Engineering, 2014

2.3.5 Variáveis que influenciam a vida útil das membranas

Diversas variáveis influenciam a vida útil das membranas as quais podem ser determinadas por análises físico-químicas ou com a realização de testes específicos. Dentre os testes aplicáveis às membranas pode-se citar:

- i. o índice de densidade de sedimentos (*silt density index* – SDI);
- ii. o índice de saturação de Langelier (LSI) e;
- iii. o índice de estabilidade Stiff & Davis (SDSI) (SILVA, 2009; CASANÃS).

O índice de densidade de sedimentos (SDI) mede a presença de compostos orgânicos como sílica (areia), sais de sulfatos e outros incrustantes com estrutura semelhante à sílica e expressa a necessidade ou não de pré-tratamento da água de alimentação antes do PSM ou pode até mesmo não recomendar o uso dessa tecnologia para a água de alimentação em questão. Esta metodologia considera o tempo gasto para que um determinado volume de água atravesse uma membrana, com poro padrão conhecido. Durante o processo de filtração pode ocorrer a deposição de sedimentos da água na membrana, denominado de colmatação ou “*fouling*” (WEF, 2006).

De acordo com Schneider & Tsutiya (2001) o teste do SDI ocorre por filtração frontal e não reproduz com precisão as condições e o acúmulo de sedimentos nas membranas. Os autores enfatizam a importância da realização do teste para projetos com sistemas de membranas em especial para sistemas de osmose reversa e nanofiltração. Ainda em conformidade com os autores águas com alto índice de SDI precisam de pré-tratamento para a posterior filtração com membranas.

O índice de saturação de Langelier (LSI) possui a finalidade de medir a capacidade de dissolução ou deposição de carbonato de cálcio em águas salobras e o índice de estabilidade Stiff & Davis (SDSI) é utilizado para medir a capacidade de deposição ou dissolução de carbonato de cálcio em águas salinas (CASANÃS; WEF, 2006; HACH).

O QUADRO 2.1, apresenta valores de SDI, quando se recomenda o uso do pré-tratamento (SILVA, 2009; CASANÃS; ROVANI, 2012).

Valor do SDI	Recomendação quanto à aplicação da tecnologia PSM OR
SDI < 1	OR pode operar por muitos anos com pouca ou sem a ocorrência de colmatação.
SDI < 3	OR é indicada, a limpeza química pode ser necessária após meses de operação, considerado por alguns autores o valor ideal de SDI.
3 < SDI < 4	Os sistemas de OR podem apresentar problemas moderados de incrustações.
SDI > 5	OR não é indicada, sendo essencial pré-tratamento da água de alimentação. Se o sistema for utilizado sem o pré-tratamento o sistema poderá sofrer graves problemas
SDI = 6,67	Valor Máximo de SDI

QUADRO 2.1 – VALORES DE SDI E APLICAÇÕES

Adaptado de Silva, 2009; Rovani, 2012 e Casañas

O tratamento da água por Osmose Reversa necessita de bombeamento para a pressurização do sistema e que este seja alimentado com água de qualidade, caso contrário, poderá haver rápida obstrução da membrana filtrante. Mesmo que o sistema seja alimentado por água de qualidade poderá haver ao longo da operação uma inevitável obstrução da membrana filtrante. Este fenômeno, denominado de “*fouling*”, colmatção, entupimento ou incrustação pode ocorrer nas membranas quando a água de alimentação não atende ao padrão mínimo de qualidade (ALISSON, 1995; BIENATI, 2008; MADAENI & SAMIEIRAD, 2010; MALAED & AYOUB, 2011; QUEVEDO, 2012).

A origem do “*fouling*” pode ser biológica, orgânica e inorgânica e a fim de evitar o encurtamento da vida útil de membranas filtrantes, muitas vezes, se faz necessário o uso de pré-tratamento ao processo de osmose reversa (ANG & ELIMELLECH, 2008; MADAENI & SAMIEIRAD, 2010; MELO 2010; LEE, 2010; QUEVEDO, 2012).

Devido ao entupimento das membranas faz-se necessária ainda à manutenção e limpeza periódica, para membranas de microfiltração e ultrafiltração podendo-se realizar a retro-lavagem. Por sua vez as membranas de osmose reversa e de nanofiltração necessitam de limpeza química e utilizam para tal fim soluções alcalinas e ácidas. As duas formas de limpeza ocorrem com certa periodicidade, sendo a retro-lavagem mais frequente que a limpeza química. Ambas visam à desobstrução das membranas filtrantes e o prolongamento da vida útil destas (MADAENI & SAMIEIRAD, 2010; QUEVEDO, 2012; KARKAHANECHI, 2014).

Em alguns tipos de membranas de Osmose Reversa utilizam-se camadas alternadas de diferentes tamanhos de poros de filtração.

Como exemplo da aplicação direta deste processo pode-se citar a maior usina de dessalinização do mundo, a qual se localiza em Jubail, Arábia Saudita, fornecendo um total de 50% da água potável disponibilizada naquele país (MILLER, 2003).

Tais usinas estão se tornando cada vez mais comuns nos Estados Unidos e em 1992, por exemplo, a cidade de Santa Bárbara, Califórnia, inaugurou uma usina de osmose reversa que pode produzir 30 bilhões de litros de água potável por dia. Os dessalinizadores de Osmose Reversa de operação manual encontram-se disponíveis em pequena escala para uso em acampamentos e viagens pelo mar (BROWN, LEMAY & BURSTEN, 2005).

De acordo com Molina & Casañas (2010) o preço da dessalinização da água do mar nos anos noventa era cerca de 1,50 US\$/m³. Com o passar do tempo o custo de produção reduziu, chegando hoje em algumas plantas a aproximadamente 0,50 US\$/m³. Custo semelhante ao das águas tratadas por outros métodos, incluindo o tratamento convencional.

Na osmose reversa boa parte do custo, que varia entre 45% e 55%, é proveniente do consumo de eletricidade necessário para a operação da planta sendo que o custo das bombas representa de 80 a 90% destes valores (MOLINA & CASAÑAS 2010).

2.4 O EMPREGO DE MEMBRANAS

A cada dia a água se torna um recurso mais escasso e com maior valor econômico. Na Europa e no Brasil o *stress* hídrico vem se tornando comum, em especial em locais com baixa pluviosidade, sem um regime de chuvas definido (MOLINA & CASANÃS, 2010).

Na Espanha em 2005 foram elaboradas estratégias para o reúso da água, que começaram a entrar em prática em 2007. Nesta data foi publicado o decreto real para promover o reúso da água (MOLINA & CASANÃS, 2010).

O papel da Osmose Reversa foi fundamental para o tratamento da água extraída do mar e das águas salobras, além disso, foi desenvolvido em conjunto pós-tratamento de efluentes provenientes de estações de tratamento de efluentes sanitários visando o reúso e a recarga de aquíferos (MOLINA & CASANÃS, 2010).

De acordo com Xu *et al.* (2013) e Greenlee *et al.* (2010) a disposição e o gerenciamento do concentrado pode ser considerado o desafio na implementação de sistemas de dessalinização, em especial para implementações em áreas não costeiras, distante de mares e oceanos, onde há regulamentações e limites para o lançamento do concentrado.

Para localidades não costeiras, especialmente em regiões áridas o emprego da responsabilidade ambiental e econômica para o gerenciamento da disposição do concentrado e do uso da água possui fundamental importância (XU *et al.*, 2013).

Nesse sentido, López-Ramírez *et al.* (2006) desenvolveram estudos comparativos de desempenho de membranas de osmose reversa para o pós tratamento de efluentes, visando a recarga de aquíferos. O experimento em escala piloto serviu para definir as condições ótimas da água de alimentação, que era proveniente do efluente secundário de uma ETE cujo objetivo era recarregar os aquíferos.

As membranas utilizadas foram produzidas a partir de acetato de celulose e a sua eficiência foi acompanhada através de resultados que proporcionaram a remoção de poluentes e de micropoluentes. Devido à alta qualidade do efluente produzido estes efluentes poderiam ser utilizados para a recarga de aquíferos ou até mesmo para o reúso sem restrições (LÓPEZ-RAMÍREZ *et al.* (2006).

Alturki *et al.* (2010) fizeram um estudo comparativo cujo objetivo era demonstrar que tratamentos complementares ao biorreator de membranas (MBR) poderiam remover contaminantes orgânicos, micro poluentes, e assim o efluente tratado teria potencial para o reúso indireto. Os tratamentos complementares avaliados foram membranas de nanofiltração e de osmose reversa após o tratamento de esgoto sanitário sintético com MBR. Ao esgoto sintético foi adicionado 40 micropoluentes em quantidades superiores aos limites de detecção de cada método. Para realizar a avaliação foram comparadas quatro membranas distintas. O experimento foi realizado em escala da bancada com um tanque de 9L para o MBR e duração de 25 horas de operação para os conjuntos de membranas. Os autores concluíram que a escolha da membrana varia de acordo com o objetivo do pós-tratamento.

No estudo realizado por Karhanechi *et al.* (2014) foram comparadas duas membranas idênticas para osmose reversa a baixa pressão fornecidas pela empresa Nitto Denko, modelo ES20. Ambas as membranas possuíam uma camada seletiva de poliamida aromática.

Em uma das membranas empregou-se dopamina, que em contato com a poliamida polimerizou de forma espontânea, formando um filme de ágar dextrose (PDA “*potato dextrose agar*”). O objetivo do estudo comparativo era verificar se a membrana modificada possuía maior resistência à criação de biofilme na superfície externa, tendo este um papel semelhante ao tratamento com o uso de anti-incrustantes, que podem ser adicionados a membrana para evitar a proliferação do filme biológico. Os autores concluíram que a membrana modificada acumulou menor quantidade de matéria orgânica no seu interior que a membrana original (KARHANECHI *et al.* 2014).

Farias *et al.* (2014) estudaram o efeito do tempo de retenção de sólidos provenientes de efluente doméstico tratados em um reator biológico de membranas (MBR) seguido de osmose reversa (OR) para verificar o efeito da colmatação nas membranas de osmose reversa. O objetivo da osmose reversa foi a produção de água de reúso, o estudo foi realizado em escala de bancada. O MBR era alimentado com efluente doméstico proveniente do decantador primário da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) municipal. A unidade piloto foi instalada na própria ETE para facilitar a operação do sistema bem como a alimentação. O efluente tratado pelo MBR era encaminhado para uma membrana de osmose reversa que tinha como principal função o polimento desta para o reúso. O concentrado da membrana de osmose reversa retornava para o tanque de alimentação da osmose reversa. O estudo avaliou o desempenho desse conjunto de membranas no tocante ao tempo de detenção para 2, 10 e 20 dias. Como resultados foram obtidos valores que comprovam a eficiência do sistema de membranas, sendo que o importante foi a qualidade do efluente final para o reúso não potável, incluindo a água de lavagem, de caldeiras, e outros.

Liu *et al.* (2011) realizaram estudos tendo como água de alimentação para membranas de nanofiltração e osmose reversa a água proveniente da estação de tratamento de águas residuárias (ETAR) de uma indústria têxtil. O efluente tratado, alimentação, foi caracterizado em termos dos parâmetros: condutividade; pH; demanda química de oxigênio (DQO); demanda bioquímica de oxigênio (DBO); cor e dureza total.

As membranas utilizadas foram NF90 e BW30 de nanofiltração e osmose reversa, respectivamente. Inicialmente os autores realizaram o teste de capacidade de filtração e permeabilidade adicionando cloreto de sódio e com essa adição foi possível medir a rejeição do sal em um condutivímetro. A perda da capacidade de filtração e a consequente redução da mesma no decorrer do período de operação apresentou comportamento típico do PSM. Como consequência verificou-se que as membranas testadas eram apropriadas para o uso empregado, pois removeram a cor e reduziram a DBO e DQO e no período de teste o concentrado produzido representou 25% do volume total (LIU *et al.*, 2011).

A hidrodinâmica das membranas de nanofiltração e osmose reversa foram avaliadas no trabalho proposto por Liu *et al.* (2011). Como resultados obtidos a membrana NF90 de nanofiltração apresentou melhores resultados quanto ao decai-

mento da taxa de filtração quando comparada com a membrana BW30 de osmose reversa. Cabe destacar que o resultado apresentado pela segunda membrana foi mais eficiente para a condutividade e para a remoção de sais que a primeira membrana avaliada. A baixa remoção de DBO da BW30 pode ser justificada pela redução na tensão de cisalhamento superficial, aumento pressão de trabalho e aumento no tamanho dos poros, em especial quando comparada com a NF90 (LIU *et al.*, 2011).

Segundo Pereira *et al.* (2014) a utilização de membranas de osmose reversa para a dessalinização da água extraída de poços existentes no semiárido brasileiro é uma alternativa viável uma vez que estes poços possuem uma grande quantidade de água com elevado teor de sais, o que inviabiliza o seu consumo direto necessitando de um tratamento posterior. No estudo foram coletadas amostras da água de alimentação e do permeado com a finalidade de monitorar a qualidade da água consumida e identificar os principais constituintes. Foram determinados os parâmetros: dureza total $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$, Sódio mg Na L^{-1} , Cloro mg Cl L^{-1} e sólidos dissolvidos totais mg L^{-1} . Verificou-se que a eficiência do processo utilizado uma vez que os valores de permeado encontravam-se dentro da Portaria 2914/2011 – MS e que a água de alimentação apresentava para os parâmetros analisados valores superiores aos máximos permitidos.

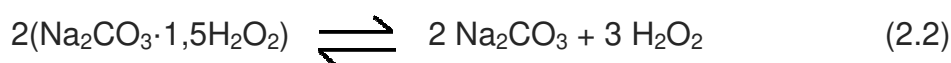
Oliveira *et al.* (2013) estudaram a utilização de membranas de microfiltração para o tratamento de águas cinza, provenientes do uso em máquinas de lavar roupa e de chuveiros e de águas negras provenientes do uso de bacias sanitárias das assepsia dos lavatórios, visando o potencial reúso de efluentes.

Neste trabalho avaliou uma residência um sistema hidráulico que permitia a separação das águas cinzas e negras. Desta forma as amostras de águas cinzas foram obtidas em separado das águas negras. As águas cinzas coletadas foram encaminhadas ao laboratório para ser tratada pelo PSM. Foi utilizada estrutura de MBR capaz de tratar o efluente em escala de bancada e era composta por membranas de microfiltração em poliamida de fibra oca submersa, fornecida pela PAM – Membranas Ltda. Neste estudo foi observado ainda o efeito da colmatação nas membranas filtrantes e o aumento do entupimento com o tempo de avaliação. A eficiência média de remoção obtida para sólidos suspenso totais foi de cerca de 87% e para cor e turbidez de aproximadamente 90%.

Carvalho *et al.* (2013) avaliaram um sistema piloto de MBR para a concentração de vinhoto na indústria do etanol. A preocupação no tratamento do vinhoto deve-se à alta Demanda Química de Oxigênio (DQO) e a alta quantidade de efluente produzido para um litro de álcool produzido, na ordem de 13:1. Neste contexto os autores avaliaram por 200 horas o desempenho de uma planta piloto de MBR com membranas de microfiltração como pré-tratamento para o vinhoto, conhecendo as características físico-químicas do concentrado do vinhoto. O permeado do vinhoto foi encaminhado para o tratamento específico e o concentrado foi avaliado para a reutilização no canavial, como fertilizante.

Os autores avaliaram os seguintes parâmetros: pH, temperatura, cor, condutividade, DQO e teor de sólidos, do vinhoto bruto, no permeado e no concentrado. Os resultados obtidos demonstraram a perda da capacidade de filtração da membrana, a redução da taxa ao longo do experimento e como consequência o aumento da pressão de trabalho no equipamento. No tocante aos parâmetros monitorados no permeado e no concentrado não houve variação para os parâmetros de condutividade e pH, no entanto outros parâmetros como a cor, DQO e sólidos apresentaram redução no permeado e acréscimo no concentrado. Como consequência o PSM funcionou para este segmento industrial.

Motta *et al.* (2013) estudaram o tratamento de efluentes oleosos utilizando o PSM e MBR visando o reúso. A membrana utilizada foi de microfiltração de fibra oca produzida a partir de polieterimida e fornecida pela PAM membranas. Para a redução da colmatação foram utilizadas duas técnicas, o borbulhamento de ar e a retro lavagem periódica. Além disso, realizou-se a limpeza química das membranas de acordo com a queda de vazão do permeado. O produto comercial adicionado na limpeza foi o Vanish ação O₂, que possui como princípio ativo o peróxido de carbonato de sódio também conhecido como percarbonato de sódio que pode ser visualizado na Reação 2.2.



Como o objetivo era a avaliação da remoção de óleos e graxas, foi produzido efluente sintético com óleos e graxas emulsionados em água. O tamanho de partículas foi variado de macromoléculas até micropartículas.

Os resultados obtidos para o permeado foram de $5,6 \text{ mgL}^{-1}$ de óleos e graxas, para o concentrado superior a $29,5 \text{ mgL}^{-1}$. O resultado do permeado encontra-se dentro dos limites definidos pela Resolução CONAMA 430/2011. Para a proposta de reúso a que se destinou este trabalho os valores observados do permeado para óleos e graxas foram aceitáveis tanto para o uso subsequente ou para eventual lançamento nos corpos hídricos, pois cumpre a legislação vigente. Quanto à destinação, tratamento ou disposição final do efluente os autores não fizeram menção. A perda da capacidade filtrante e da vazão foi observada no decorrer do tempo, como em nos outros trabalhos disponíveis na literatura.

De forma similar ao trabalho desenvolvido por Motta *et al.* (2013), Melo *et al.* (2010) avaliaram membranas de nanofiltração e osmose reversa para de água de reúso de um campo de produção de petróleo – plataforma. O conjunto avaliado, pré-tratamento, era composto de separador água e óleo, filtros de areia, trocador iônico e filtro de cartucho. O teste foi realizado com dois valores de pH, 7 e 9,5. Os resultados obtidos na avaliação indicam o potencial da água para o reúso industrial não sendo recomendado o reúso para irrigação, agricultura, não sendo recomendado devido à possibilidade da existência de elementos tóxicos presentes nas amostras. O desempenho das membranas de filtração foi superior ao esperado, pois foram removidos íons e sais trivalentes e bivalentes, o que dificultaria o reúso na agricultura sem a adição destes sais.

Nos estudos realizados por Greenlee *et al.* (2010) a taxa de recuperação para águas salobras varia de 65 a 90% dependendo da qualidade e da composição da água de alimentação, quando a salinidade aumenta, a taxa de recuperação diminui para cerca de 50% devido a presença de sais. Para a água doce, a taxa de recuperação pode ser superior a 99%.

Não foram encontrados trabalhos recentes relacionando a caracterização do concentrado provenientes de PSM, tanto para o tratamento de água como para o de efluentes. Dentre os trabalhos encontrados vale ressaltar os trabalhos de Dialynas *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2013, Joo, 2014 que tiveram como objetivos testar métodos de tratamento para o concentrado, proveniente de efluentes domésticos, visando à sua disposição final.

Esta escassez pode estar relacionada ao fato do tratamento de água ser visto como inofensivo ao meio ambiente, conceito este que ao longo do tempo vem se modificando. Neste sentido vale ressaltar a Resolução SEMA – PR 21/09 que determina prazos, de acordo com o porte da estação, para o tratamento e a destinação adequada de resíduos produzidos nas ETA's, como o lodo, a água de lavagem de filtros e de decantadores.

Devido aos PSM não serem utilizados ainda em larga escala no Brasil o resíduo não se tornou um problema de dimensões significativas. No entanto encontrou-se na literatura estudos publicados e trabalhos relativos ao desenvolvimento e aplicação de membranas de filtração, cabendo salientar que o enfoque dado a estes é o tratamento de água em regiões de grande escassez hídrica, de reúso e de tratamento de efluentes industriais, em especial os provenientes da indústria petroquímica.

2.4.1 Tratamento e destinação de rejeitos provenientes de membranas

Nas últimas décadas a destinação e disposição do concentrado de PSM tem despertado o interesse de pesquisadores em varias partes do mundo.

Squire (2000) estudou a disposição do concentrado no Reino Unido. O crescimento do uso de osmose reversa trouxe a preocupação de o que fazer com o concentrado produzido. Neste trabalho ela aponta o crescimento do uso dos PSM em especial da osmose reversa no Reino Unido, na época o concentrado era disposto das seguintes formas:

- i. lançamento direto do concentrado no corpo receptor;
- ii. lançamento indireto do concentrado no corpo receptor;
- iii. disposição do concentrado em ETE's; e
- iv. reutilização do concentrado como água de irrigação.

Squire (2000) avaliou cada uma das quatro formas de disposição. Para a primeira foram analisadas as legislações vigentes e a característica do concentrado.

O corpo receptor no caso do Reino Unido eram os oceanos, visto que a osmose reversa dessaliniza a água do mar. O lançamento indireto do concentrado no mar foi avaliado fazendo um composto da produção da osmose reversa com as águas das lavagens dos filtros de uma ETA, a dificuldade encontrada foi conciliar a produção em linha da osmose reversa com a produção em batelada dos filtros da ETA e assim equilibrar a composição do novo fluido (*blend*) para o atendimento a legislação. Para a reutilização do concentrado em culturas de irrigação a autora recomenda atenção aos compostos químicos a fim de não causar prejuízo ao solo e a cultura envolvida, pela característica salina do concentrado. A disposição do concentrado de osmose reversa em ETE's a era alternativa aplicada na época do estudo. Insta salientar que no Reino Unido o concentrado era classificado como efluente industrial, que deveria ser tratado antes do lançamento.

No sentido do trabalho de Squire, 2000, Subramani & Jacangelo, 2014 realizou uma revisão das tecnologias para a minimização do volume de concentrado produzido por membranas de osmose reversa. As tecnologias revistas foram a eletrocoagulação, tecnologias baseadas na oxidação, redução biológica intermediária e de alta eficiência, precipitação do lodo com recirculação, filtração em filtros de disco, eletrodialise e eletrodialise reversa.

O trabalho de Dialynas *et al.* (2008) teve como objetivo a investigação do concentrado proveniente de uma membrana de osmose reversa que concentra o efluente doméstico proveniente de um MBR. Apresentam como possíveis soluções para o concentrado a coagulação com cloreto férrico, sulfato de alumínio, adsorção por carvão ativado granular, oxidação eletrolítica, fotocatalise e ultrassom. Na pesquisa eles concluíram que para o tratamento do concentrado proveniente do MBR os métodos mais indicados foram à coagulação e a adsorção por carvão ativado granular (remoção de 91,3%), pois apresentaram maior eficiência de remoção de matéria orgânica contida na água. Os três métodos oxidativos tiveram comportamento similar e removeram de forma moderada a matéria orgânica a uma taxa lenta de remoção (oxidação eletrolítica 36%, ultrassom 34% e fotocatalise 50%). Os autores ainda analisaram a faixa de absorção no espectrofotômetro, e que o carvão foi o responsável por uma maior gama de absorção.

Wei *et al.* (2014) estudaram o tratamento do concentrado proveniente de membranas de osmose reversa com o uso de carvão ativado em pó (PAC²) em um sistema combinado de microfiltração desenvolvido para a remoção da matéria orgâ-

nica. Os resultados obtidos para a remoção do carbono orgânico total foi superior a 70% e o consumo de PAC² em dupla torre de filtração foi cerca de 20% menor quando comparado com uma torre filtração.

Para Joo (2014) o tratamento do concentrado de osmose reversa possui complicações devido ao custo, a visibilidade e eficiência na remoção de contaminantes. Os materiais adsorventes, como o carvão ativado, carvão e cinza podem remover a parte orgânica do concentrado, porém não possuem a capacidade de remover de forma efetiva os nutrientes e sais que promovem o crescimento de material biológico, como algas e bactérias. Além disso, no que diz respeito ao tratamento físico, a remoção de contaminantes utilizando adsorventes pode não ser apropriada, uma vez que os poluentes tóxicos e não-biodegradáveis não são transformados ou degradados em formas não-tóxicas.

Devido ao uso crescente de membranas de osmose reversa, em especial para a dessalinização da água, Jeppesen *et al.* (2009) estudaram o potencial econômico para a extração de fósforo e rubídio utilizando osmose reversa, foram analisados também os custos potenciais para a produção de água potável para níveis diferentes de cloreto de sódio. O estudo da recuperação de metais partiu da disposição do concentrado proveniente das plantas de dessalinização, que retornava aos mares e oceanos, eventualmente era encaminhado a uma estação de tratamento de efluentes. A planta de osmose reversa em que se realizou o estudo tinha capacidade de tratamento de 100.000 m³/dia. Os resultados obtidos indicaram que a recuperação do cloreto de sódio do concentrado apresentou baixo custo de produção quando empregado em conjunto com processos térmicos. Quanto à recuperação de rubídio de águas salinas o estudo evidenciou que esta pode ser uma fonte potencial que necessita de futuros estudos.

No estudo desenvolvido por Xu *et al.* (2013) foi estudada a remoção seletiva de arsênio e de íons monovalentes provenientes da água salobra oriunda do concentrado de membranas de osmose reversa visando o uso benéfico desta água, dos metais presentes nesta e a proteção ambiental.

Devido à alta eficiência para a remoção de arsênio do concentrado de osmose reversa, foi utilizada a coagulação com sais de ferro, com o intuito de obter concentrações de arsênio próximas a da água potável. Em decorrência da demanda química do cloreto férrico ser superior a do coagulante, foi utilizado sulfeto férrico

como alternativa ao lodo proveniente do tratamento de água, por já conter ferro na ideia de um resíduo, lodo, poderia tratar outro resíduo, concentrado (XU *et al.* 2013).

Os resultados obtidos com este estudo apresentaram três tipos de resíduos, que deveriam ser dispostos de forma distinta. O resíduo que continha arsênio deveria ser disposto em aterro sanitário. O resíduo do permeado da eletrodialise, que continha cálcio e magnésio poderia ser utilizado na agricultura e o resíduo do concentrado da eletrodialise que continha sódio, cloro e níveis baixos de arsênio, poderiam ser disposto usando a recarga de aquíferos de grande profundidade. A proposta para tratamento do concentrado de osmose reversa com o uso de eletrodialise para a concentração do concentrado resultou no aumento da taxa de recuperação do sistema (XU *et al.* 2013).

O trabalho desenvolvido por Alves *et al.* (2014) considerou a destinação do concentrado proveniente dos sistemas de dessalinização de água utilizados no semiárido do Estado da Paraíba. As autoras verificaram que a instalação de sistemas de osmose reversa ameniza a problemática da escassez hídrica da região, no entanto, a destinação inadequada do resíduo gerado contribui para a desertificação e erosão das áreas onde este é destinado. O estudo não possui o objetivo de caracterizar o concentrado e sim avaliar a percepção ambiental dos moradores sobre a toxicidade deste efluente, que foi utilizado para recargas não planejadas de aquíferos e assim poderia degradar a qualidade da água do aquífero subterrâneo.

Uma série de processos que envolviam a adsorção com carvão ativado e a oxidação por hidroxilas ou radicais de sulfatos foram avaliadas como forma de tratar o concentrado de osmose reversa. Os materiais orgânicos não biodegradáveis e os nutrientes em forma de íons não são removidos com o tratamento convencional. Estes podem ser removidos fisicamente com o uso de carvão ativado e por métodos de remoção química usando radical de oxidação, no caso o persulfato. A remoção efetiva de fósforo, de nitrogênio e material não biodegradável foi verificada. O tratamento do concentrado resultou na necessidade de pré-tratamento do concentrado com carvão ativado (JOO, 2014).

2.4.2 Incrustações e limpeza química

A eficiência de qualquer sistema de filtração depende dos materiais que compõem a camada filtrante e das características dos fluidos que o atravessarão. Ambas são essenciais para a ocorrência ou não da colmatção, também denominada como “*fouling*” quando esta ocorre em membranas de filtração (COHEN & PROBSTEIN, 1986).

A colmatção, que inclui a formação da matéria orgânica e biológica e das partículas coloidais pode ser evitada com o uso de pré-tratamento este deverá remover o material que seria colmatado. Dependendo da qualidade do fluido a ser tratado pode ocorrer mais de uma categoria de “*fouling*” (QURESHI *et al.* 2013; COHEN & PROBSTEIN, 1986).

Qureshi *et al.* (2013) observou que as incrustações que ocorrem no interior da membrana provocam a redução da qualidade e da vazão de permeado. Devido aos altos custos de energia e a substituição da membrana faz-se necessário o tratamento da causa da incrustação, isto é, o pré-tratamento, que varia de acordo com a combinação e composição dos elementos presentes na água. As fontes de incrustações podem ser divididas em quatro categorias:

- i. partículas inorgânicas;
- ii. bactérias e outros organismos;
- iii. compostos orgânicos; e
- iv. compostos incrustantes.

A utilização de produtos anti-incrustantes e dispersantes podem ocorrer na corrente de alimentação da OR e visam à redução da colmatção e da formação de depósitos. A adição destes produtos possui o objetivo de retardar o processo de precipitação, mantendo as partículas repelidas e dispersas, inibindo o crescimento de cristais e micro-organismos (BRADLEY, 1992).

A fim de minimizar a incrustação orgânica em membranas de osmose reversa, usadas para o tratamento de águas salinas, são utilizados no pré-tratamento filtros de areia para a remoção dos sólidos suspensos. Para os filtros de membranas

de fibra oca a velocidade de filtração chega a ser 10 vezes superior que o filtro de areia (LEE *et al.*, 2010; LIU *et al.*, 2011).

A fixação de bactérias, partículas e compostos orgânicos, como o óleo pode prejudicar mais intensamente os módulos iniciais dos sistemas de membranas. Em decorrência da colmatação ocorre a formação de um precipitado composto normalmente por íons metálicos fracos e solúveis. Esse precipitado aumenta e ocasiona a redução da vazão à medida que a concentração de íons na água de alimentação aumenta (QURESHI *et al.*, 2013).

Ang & Elimelech (2008) estudaram a influência da matéria orgânica do efluente para o “*fouling*”, em membranas de osmose reversa. Para o experimento foi utilizado ácido octanóico que simulou a concentração do íon cálcio. Os objetivos foram investigar como a alimentação com uma solução química contribuiu para a incrustação de membranas de osmose reversa. Para isto foi utilizada a membrana LFC-1 da *Hydranautics* e o ácido octanóico foi escolhido por representar melhor os ácidos graxos presentes na matéria orgânica do efluente doméstico. Os resultados obtidos evidenciaram que a operação de osmose reversa com o ácido octanóico, em pH ácido foram mais significativo devido às alterações do pKa.

Neste contexto Antony *et al.* (2012) compararam perfis de colmatação provenientes de quatro estações de tratamento de efluentes municipais e de uma estação de tratamento de efluente industrial, localizadas na costa leste da Austrália. Das quatro ETE's duas tratavam o efluente por meio de digestão anaeróbia e o pós-tratamento ocorria aerobicamente, uma ETE municipal recebia tratamento terciário e outra convencional. A estação de tratamento de efluentes industrial tratava o efluente de uma planta piloto de moinho de trigo, que era misturado com efluente doméstico para o tratamento biológico. Os efluentes foram filtrados com membranas de fibra oca, hidrofílicas de 0,04µm de poro, produzidas a partir de fluoreto de polivinilideno (PVDF). Os resultados obtidos para o carbono orgânico dissolvido (COD) das quatro ETE's municipais variou de 5 a 8 mgL⁻¹, enquanto o efluente industrial continha 59mgL⁻¹ de COD.

De acordo com Zhu & Elimelech (1997) durante a incrustação os colóides podem se acumular na superfície e dentro dos poros da membrana de osmose reversa e assim prejudicar a capacidade de filtração e a redução da vazão além de prejudicar a qualidade do permeado. Ao analisar a incrustação coloidal de membranas foi possível fazer a distinção entre dois casos. O primeiro se aplica para mem-

branas de osmose reversa, de nanofiltração e de ultrafiltração, pois a incrustação ocorre pela acumulação de partículas sobre a superfície das membranas em uma camada denominada de torta de filtração (*cake*). Esta camada ocasiona o aumento da resistência hidráulica da membrana e, assim, reduz a vazão de água. Devido às membranas de osmose reversa ser consideradas isenta de poros, o mecanismo de formação coloidal ocasiona a formação da torta (XU *et al.*, 2013).

Para Qureshi *et al.* (2013) a fim de compreender e modelar o início da formação da colmatação superficial, pode-se fazer a previsão da polarização da concentração de solutos que possui importância para a concepção de processos de osmose reversa. Para isso tem-se utilizado a teoria da camada limite como indicador confiável para a concepção de processos industriais. A magnitude da concepção de processos possui quatro fatores principais:

- i. Espessura da camada limite;
- ii. Vazão de permeado;
- iii. Enriquecimento da membrana; e
- iv. Coeficiente de difusão do soluto no fluido da camada limite.

De acordo com Pessoa *et al.* (2014), que estudaram a utilização de uma membrana de osmose reversa para a produção de água industrial em uma indústria têxtil, a limpeza química nas membranas aumentou a quantidade de permeado disponível para o processo. Essa quantidade era reduzida com o decorrer do uso do equipamento, devido ao “*fouling*” causado por agentes biológicos e físicos. Após a realização da limpeza química e a remoção dos agentes incrustantes a quantidade de permeado era superior àquela existente antes da limpeza química, mantidas as mesmas condições de trabalho.

Lin *et al.* (2014) estudaram membranas de osmose reversa (XLE) e nanofiltração (NF90 e NF270), que foram colmatadas com sílica para avaliar os efeitos da redução de vazão e da remoção de seis micropoluentes. As membranas foram caracterizadas por propriedades físico-químicas que incluem a hidrofília, a morfologia da superfície e a capacidade de remoção dos micropoluentes avaliados com e sem a presença de sílica. A hidrofília proporcionou a adsorção de três dos seis micropoluentes testados; o ibuprofeno, o triclosan e o sulfametazina.

A incrustação com sílica resultou na diminuição dos poros das membranas e esta pode ter sido a causa da adsorção de parte dos micropoluentes nas membranas. A fim de se controlar o “*fouling*” faz-se necessário à limpeza regular das membranas (LIN, 2014; QURESHI, 2013).

Baudequin *et al.* (2014) estudaram a remoção de surfactantes fluorados por eletrocoagulação após a osmose reversa. A remoção foi necessária devido a presença de surfactante na água de combate a incêndio. Os surfactantes fluorados podem ser considerados uma classe especial de surfactantes devido ao poder de reduzir a tensão superficial da água. O objetivo do trabalho foi demonstrar a eficiência do PSM em especial da osmose reversa para essa classe de surfactantes. Como resultados foram obtidos a redução da concentração de surfactantes de 30 mgL^{-1} para $0,1 \text{ mgL}^{-1}$.

Madaeni & Samieirad (2010) estudaram os efeitos dos produtos de limpeza química utilizados em membranas de osmose reversa, para a redução dos efeitos causados pelo “*fouling*”. O objetivo era encontrar produtos com maior capacidade de limpeza e definir as condições ótimas de operação de membranas de osmose reversa incrustadas por compostos orgânicos e minerais provenientes do efluente doméstico. Os efeitos dos produtos adstringentes ácido, base e surfactantes foram elucidados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A unidade piloto de osmose reversa utilizada para a coleta de dados experimentais deste trabalho foi instalada na Estação de Tratamento de Água Industrial (ETAI) da SANEPAR, localizada no município de Araucária – PR.

Na FIGURA 3.1 pode-se observar a localização e o entorno desta estação.



FIGURA 3.1 – FOTO DA LOCALIZAÇÃO DA ETAI

Fonte: Google 2014

Esta estação possui capacidade de tratamento de água de aproximadamente $1.152 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ e atende a quatro grandes indústrias da região de Araucária – PR

sendo estas, siderurgia, termoeletrica, madeireira e de fertilizantes nitrogenados, que utilizam a água tanto em equipamentos de processos industriais como, torres de resfriamento, caldeiras, trocadores de calor e outros.

A TABELA 3.1 apresenta de forma resumida a capacidade de tratamento da ETAI e da unidade piloto instalada.

TABELA 3.1 – CAPACIDADE DE TRATAMENTO DA ETAI E DA UNIDADE PILOTO DE OSMOSE REVERSA

Capacidade:	Ls^{-1}	Lh^{-1}	m^3h^{-1}	m^3dia^{-1}
da ETAI	320	1.152.000	1.152	27.648
da unidade piloto	0,11	400	0,4	9,6
de produção de permeado pela unidade piloto	0,083	300	0,3	7,2
de produção de concentrado da unidade piloto	0,027	100	0,1	2,4

A ETAI pode ser classificada como unidade de ciclo completo uma vez que possui os processos de floculação, decantação e filtração podendo operar de forma continua por um período de até 24 horas.

3.1 DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO DA ETAI

Na estação de tratamento de água ETAI, a água bruta é conduzida do corpo hídrico a um canal artificial construído em concreto e o nível da água permanece o mesmo do rio Iguaçu. Neste canal foi instalada uma grade grossa manual e uma grade fina mecanizada, três bombas submersíveis compõem a captação, sendo duas bombas em operação e uma bomba de reserva. Cada bomba possui 56 kW de potência o que equivale a cerca de 75 hp e capacidade de sucção individual de $140 L s^{-1}$, a capacidade máxima de sucção é de $280 L s^{-1}$.

Do canal de captação a água bruta é aduzida diretamente do corpo hídrico para o tanque de mistura rápida por meio de tubulações com diâmetro nominal de

600 mm e bombas. Durante a adução e antes do tanque de mistura rápida se adiciona à água bruta o dióxido de cloro (ClO_2) como pré-oxidante devido à presença de matéria orgânica contida na água, e na etapa seguinte de floculação foi adicionado o cloreto de poli alumínio denominado como (PAC^1).

Da unidade de mistura rápida a água foi encaminhada aos floculadores, onde os sólidos suspensos foram aglutinados para a etapa posterior de decantação. A água decantada foi conduzida aos filtros contendo carvão antracito e areia, e em seguida encaminhada ao reservatório apoiado. Na ETAI foram utilizados decantadores de alta taxa

O diagrama esquemático do tratamento da água utilizada na ETAI pode ser visualizado na FIGURA 3.2.

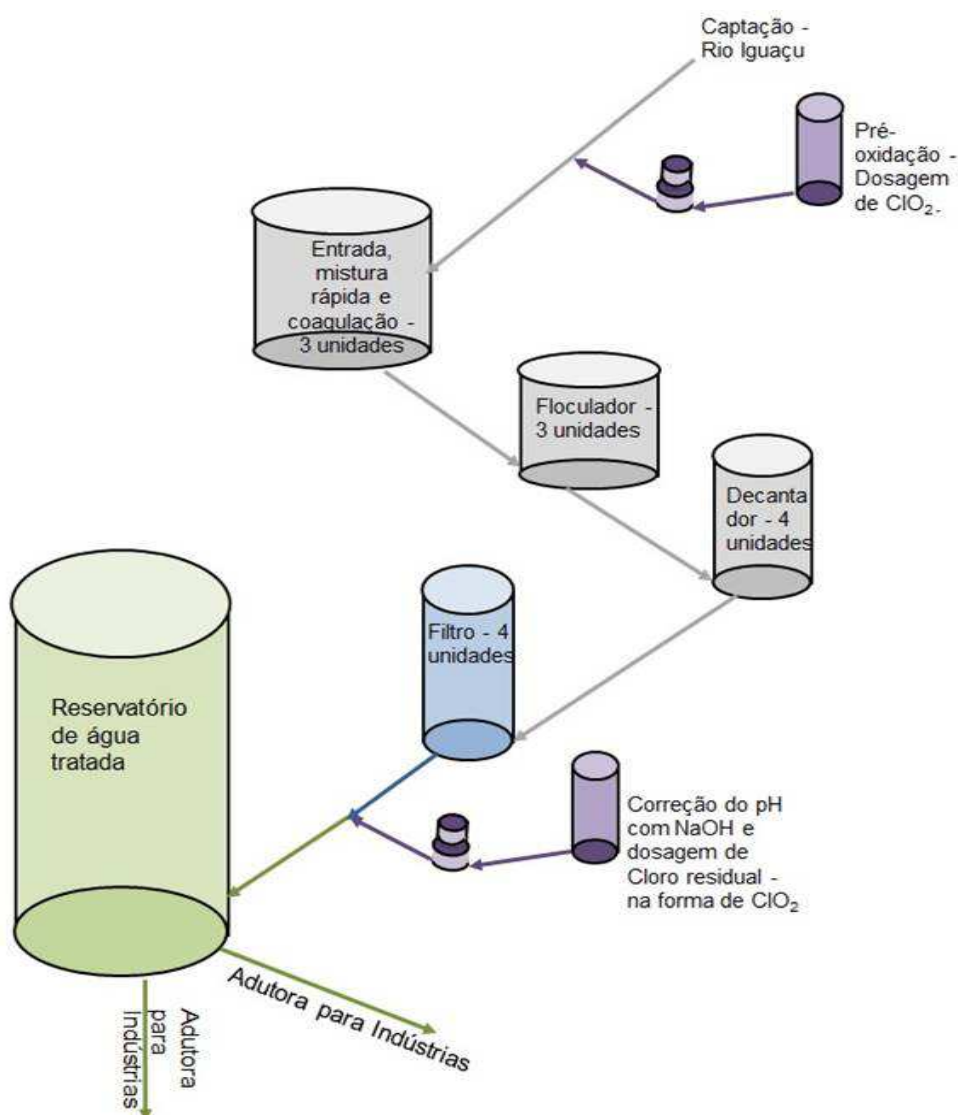


FIGURA 3.2 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DA ETAI

Fonte: a autora

3.2 DESCRIÇÃO DA UNIDADE PILOTO DE OSMOSE REVERSA

A unidade piloto de osmose reversa utilizada para a realização dos procedimentos experimentais deste trabalho constitui-se por uma unidade de purificação de água que utiliza membranas de osmose reversa e possui as seguintes características:

- i. capacidade de tratamento líquida: $0,5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$; e
- ii. vazão máxima de entrada: $0,67 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ a temperatura de 25°C .

As características da membrana utilizada estão apresentadas no ANEXO 1. Os valores máximos para a operação da membrana, especificados pelo fabricante são:

- i. pressão de operação: $4,16 \text{ MPa}$;
- ii. temperatura máxima: 45°C ;
- iii. SDI: 5,0; e
- iv. turbidez: $1,0 \text{ NTU}$.

A água utilizada para a alimentação da unidade piloto era proveniente do reservatório apoiado de água tratada da ETAI.

O sistema de alimentação da unidade piloto foi composto por um filtro de carvão ativado granular (GAC) com a finalidade de reter os óleos e graxas, cloro livre na forma de dióxido de cloro, turbidez, cor e sólidos dissolvidos.

Do início do experimento até 700 horas de operação foi utilizado GAC de origem vegetal, fornecido pela Carbomafra, modelo carbono 119 cujas características encontram-se no Anexo 2. Após o tempo de 700 horas de operação foi necessária à manutenção do filtro de GAC com a substituição do elemento filtrante por car-

vão de origem animal fornecido pela empresa Bonecheer do Brasil cujas características encontram-se no Anexo 3.

Após o filtro foi adicionado uma solução de metabissulfito de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) a 5% por meio de uma bomba dosadora com a finalidade de neutralizar o efeito do cloro livre sobre as membranas de osmose reversa. Em seguida a água de alimentação foi conduzida por meio de tubulações em PVC com diâmetro nominal de 25,4mm para a unidade piloto contendo os medidores de pressão, vazão, painel de controle, pré-filtro de cartucho de polipropileno de 5 μm referência *ABS – HB004165484* fornecido pela empresa *3M do Brasil* e para o controle da vazão de entrada foi utilizada uma válvula solenoide.

As medidas de pressão foram feitas em pressostatos e manômetros de aço inoxidável, utilizando como fluido manométrico a glicerina e a escala de pressão variando de 0 a 0,6 MPa. As pressões foram medidas antes e após o filtro de cartucho, na saída da bomba de alta pressão, no 1° vaso e no 2° vaso de pressão.

A água passa pelo filtro (1) e em seguida é bombeada para o 1° vaso de pressão (2) que contém o elemento filtrante, osmose reversa, deste vaso a água é separada em duas correntes, uma de permeado (3) e outra de rejeito (4). O rejeito do 1° vaso segue ao 2° vaso de pressão (5) onde é gerado outro permeado e concentrado.

As medidas de vazão foram realizadas utilizando rotâmetros graduados de 0 a 600 Lh^{-1} da marca *Stüble*. O concentrado produzido no 2° vaso passa pelo rotâmetro, bem como o permeado produzido no 1° e no 2° vaso.

Após a passagem dos fluidos pelos rotâmetros estes foram conduzidos a dois reservatórios com capacidade de 1000 L para o permeado e 500 L para o concentrado. Os reservatórios possuíam válvulas abre e fecha para a retirada de amostra e válvula controladora de nível para a manutenção da vazão do concentrado. O fluxograma simplificado da unidade piloto pode ser visualizado na FIGURA 3.3.

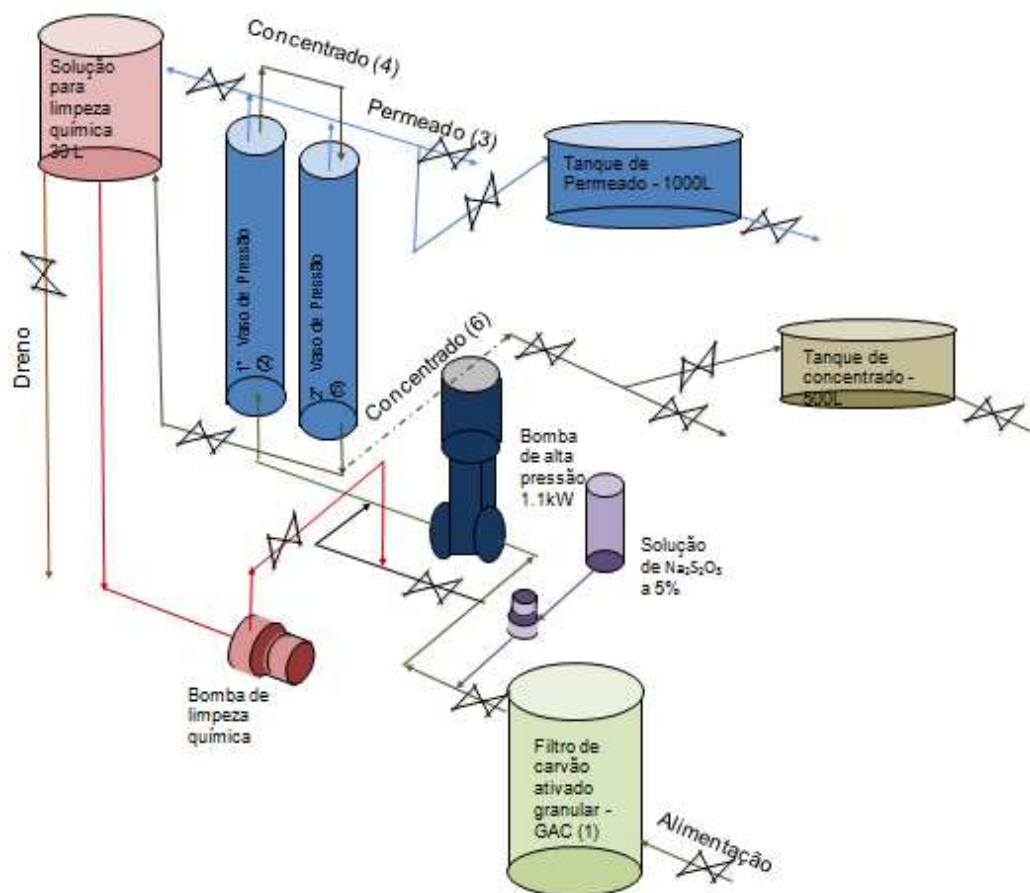


FIGURA 3.3 – ESQUEMA SIMPLIFICADO DA UNIDADE PILOTO DE OSMOSE REVERSA

Fonte: a autora

3.2.1 Sistema de filtração

A filtração foi realizada com a utilização de dois vasos de pressão onde foram inseridas individualmente as membranas com área de filtração de $7,9 \text{ m}^2$ cada, totalizando $15,8 \text{ m}^2$ e uma bomba centrífuga de alta pressão em aço inoxidável 304.

Como a unidade piloto continha dois vasos, de pressão o equipamento filtrava a água de alimentação em duas etapas. A primeira etapa era alimentada com água de alimentação e nela era produzido o permeado e o concentrado, este era novamente filtrado no segundo passo, gerando o permeado e o concentrado. O fluxograma simplificado do funcionamento das membranas utilizadas no processo pode ser visualizado na FIGURA 3.4.

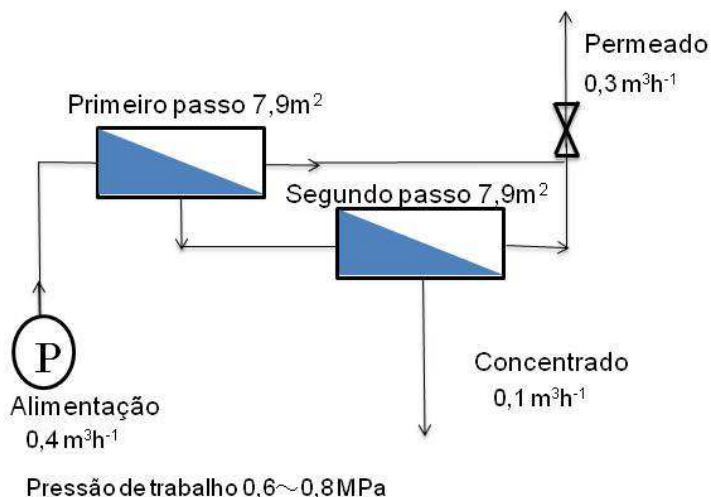


FIGURA 3.4 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DAS UTILIZAÇÃO DE MEMBRANAS NA UNIDADE PILOTO

Fonte: a autora

A membrana utilizada no experimento foi o modelo ESPA1-4040, espiralada produzida pela *Hydranautics Nitto Denko*, composta por polímeros como a poliamida, o poliéster e a polisulfona, dispostos em camadas como pode ser visualizada na FIGURA 2.3. De acordo com o fabricante, para esta membrana a rejeição de sais esperada varia de 99,0 a 99,3%.

No teste realizado antes do início da operação do equipamento, a turbidez da água de alimentação era maior que a turbidez máxima recomendada pelo fabricante, bem como o SDI, desta maneira acredita-se que a eficiência desta membrana para a rejeição de sal bem como para a produção do permeado produzido pode ser inferior à descrita pelo fornecedor.

Para os experimentos realizados, em virtude das características da água de alimentação utilizou-se uma vazão máxima de entrada igual a 0,4 m³h⁻¹ sendo 0,3 m³h⁻¹ de permeado e 0,1 m³h⁻¹ de concentrado.

Desta maneira calculou-se a taxa de recuperação, a taxa de filtração e o coeficiente de permeabilidade. A taxa de recuperação definida como a razão entre a vazão de permeado e vazão total, descrita pela EQUAÇÃO 3.1.

$$\text{taxa de recuperação} = \frac{(\text{vazão de permeado})}{(\text{vazão total})} = 0,75 \quad (3.1)$$

A taxa de filtração pode ser calculada por meio do produto da vazão de permeado com o tempo de operação, em horas, dividido pela área de filtração das membranas, em m², conforme a EQUAÇÃO 3.2.

$$\text{taxa de filtração} = \frac{(\text{vazão de permeado}) \cdot (\text{horas de operação por dia})}{(\text{área de filtração das membranas})} \quad (3.2)$$

$$\text{taxa de filtração} = 0,46 \cdot \left(\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}} \right)$$

O coeficiente de permeabilidade é definido como a razão entre a taxa de filtração e a pressão mínima de operação da membrana EQUAÇÃO 3.3.

$$\text{coeficiente de permeabilidade} = \frac{(\text{taxa de filtração})}{(\text{pressão mínima de operação})} \quad (3.3)$$

$$\text{coeficiente de permeabilidade} = 0,076 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{kgf}} \right)$$

A unidade piloto pode ser visualizada na FIGURA 3.5. Podendo-se observar:



- 1 – conjunto dosador da solução de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$;
2 – torre de adsorção contendo GAC ;
3 – unidade de filtração;
4 – reservatório para o permeado; e
5 – reservatório para o concentrado.

FIGURA 3.5 – UNIDADE PILOTO DE OSMOSE REVERSA

Na FIGURA 3.6 pode-se visualizar em detalhes os manômetros, os rotâmetros, o painel de controle e a chave geral da unidade piloto de filtração.



1. Painel de controle
2. Chave geral liga desliga
3. Manômetros de aço inox com glicerina
4. Rotâmetro – permeado
5. Rotâmetro – concentrado

FIGURA 3.6 – PAINEL DE CONTROLE

Na FIGURA 3.7 pode-se visualizar a válvula solenoide dosadora de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ (1), a válvula abre e fecha da unidade piloto (2), o filtro de cartucho (3), a válvula solenoide da unidade piloto (4), a bomba de baixa pressão (5), a válvula abre e fecha “dreno” (6) e os vasos de pressão (7).



1. Válvula solenoide dosadora da solução de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$
2. Válvula abre fecha
3. Filtro de cartucho
4. Válvula solenoide
5. Bomba de baixa pressão
6. Válvula "dreno"
7. Vasos de pressão – 1º e 2º estágio de filtração

FIGURA 3.7 – ESQUEMA DA UNIDADE PILOTO DE OSMOSE REVERSA

3.2.2 Descrição do sistema de limpeza da membrana de osmose reversa

Para a limpeza química das membranas de osmose reversa foi utilizada uma bomba de baixa pressão em aço inoxidável 304, um tanque em PVC para a introdução das soluções de limpeza, válvulas esfera para o desvio do permeado e do concentrado e um dreno para a remoção do fluido no tanque.

Antes do início da limpeza foi feita uma inversão parcial das válvulas para que a água proveniente do permeado fosse direcionada diretamente ao tanque de limpeza química. Após esta inversão parcial foi efetuada a inversão total das válvulas para que a água utilizada na limpeza química fosse recirculada sem perdas no processo.

O tanque para a dosagem de metabissulfito de sódio (1) foi instalado antes da entrada da água no equipamento e o tanque para a limpeza química foi instalado atrás do painel de controle (2). Estas estruturas podem ser visualizadas na FIGURA 3.8.

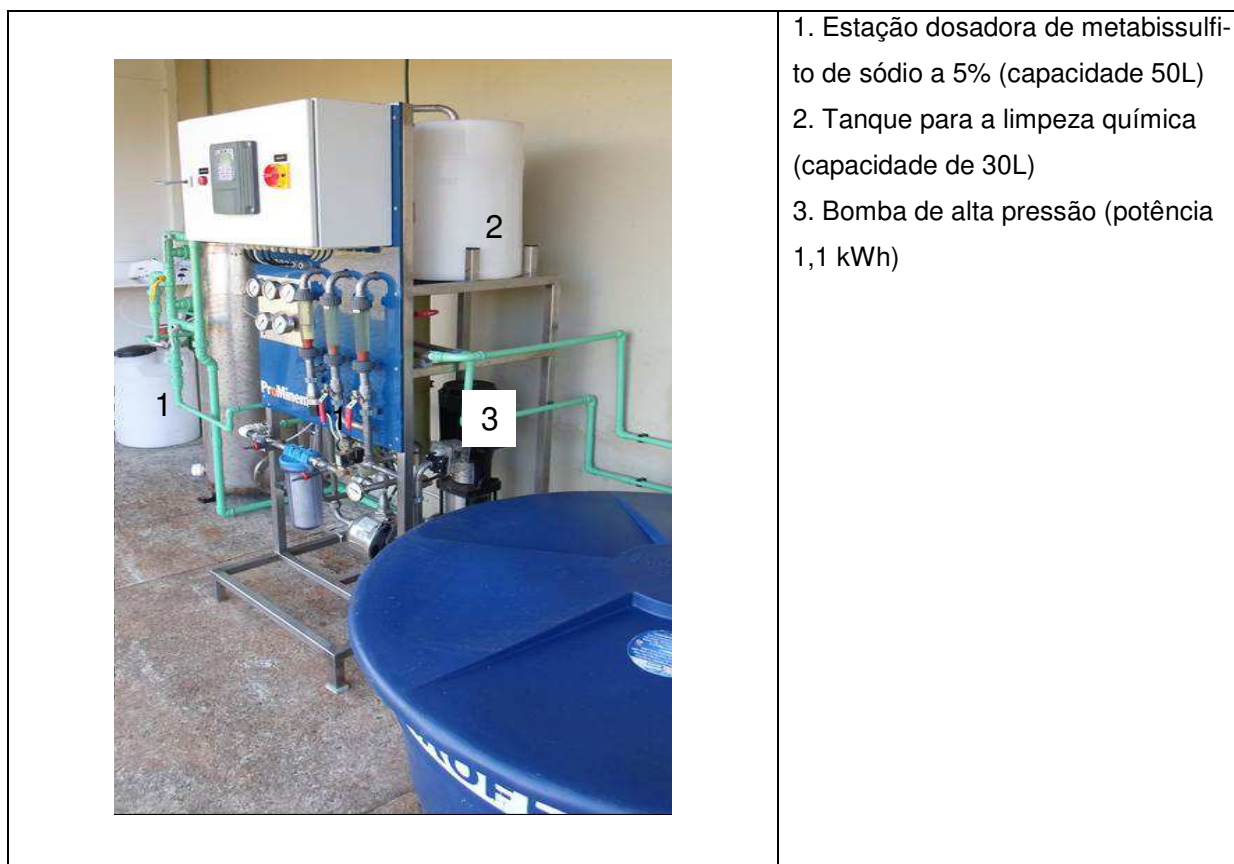


FIGURA 3.8 – DETALHES DA UNIDADE PILOTO DE OSMOSE REVERSA

3.3 ANÁLISES PARA A CARACTERIZAÇÃO DO CONCENTRADO

As amostras coletadas, de concentrado, de permeado bem como de água de alimentação seguiram os procedimentos experimentais contidos no “*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMWW, 2012)*” e “*International Standard Organization (ISO)*” e estão relacionadas a seguir:

- i. Determinação da condutividade elétrica;
- ii. Determinação do pH;
- iii. Determinação da turbidez;
- iv. Determinação da cor;
- v. Determinação da concentração de cloro livre;
- vi. Determinação da concentração de fluoretos;
- vii. Determinação da concentração de cloretos;
- viii. Determinação da dureza total; e
- ix. Determinação da concentração de surfactantes como mBAS;

Estas análises foram definidas com base no custo individual e em parâmetros significativos de processos industriais, como água de processo ou águas utilizadas em equipamentos como caldeiras e torre de resfriamento.

As determinações analíticas seguiram as recomendações apresentadas na literatura quanto aos métodos aplicados. As amostragens realizadas variaram de acordo com a disponibilidade operacional diária. No total foram realizadas 381 amostragens divididas em:

- i. 127 análises para a água de alimentação;
- ii. 127 análises para o permeado; e
- iii. 127 análises para o concentrado.

Com o objetivo de complementar as análises efetuadas foram ainda realizadas as análises de surfactantes (mABS) e SDI para a verificação do desempenho da torre de adsorção contendo carvão ativado granular.

Para as determinações de cloretos e da dureza total as amostras de concentrado foram diluídas cinco vezes para tornarem-se perceptíveis aos métodos analíticos descritos na literatura.

As análises de determinação da cor, de concentração de fluoretos, de cloro livre e de surfactantes foram realizadas utilizando o espectrofotômetro de ultravioleta a luz visível (UV visível). O equipamento utilizado foi da marca *HACH* modelo *DR 3900*, que opera dentro de uma faixa de comprimento de onda, 320 a 1100 nm, que pode ser visualizado no QUADRO 3.1.

Parâmetro	Comprimento de onda nm	Faixa de operação	Resultados
Cor	455	5-500	uH
Flúor	580	0,20-1,40	mgL ⁻¹ .
Cloro livre	515	0,20-2,00	mgL ⁻¹ .
Surfactantes - ABS	650	0,05-2,00	mgL ⁻¹ .

QUADRO 3.1 – FAIXA DE OPERAÇÃO DO ESPECTROFÔTOMETRO DE UV VISÍVEL *HACH DR3900*

Para as análises de cor e de fluoretos foi necessária a utilização do padrão branco de reagente com água deionizada e uma cubeta de quartzo para posterior leitura no equipamento.

3.3.1 Determinação da cor

Para as análises de cor foi utilizado o programa COR 455 nm para a leitura em todas as amostras de permeado, de concentrado e de água de alimentação e os resultados expressos em unidades Hazen – uH.

3.3.2 Determinação da concentração de íons fluoretos

Para a determinação de íons fluoretos foi adicionado 2 mL de corante zircônio em cada amostra. O fluoreto com o corante zircônio forma um complexo incolor (ZrF_6^{-2}). No equipamento foi selecionado o programa FLUORETO para a realização da leitura das amostras, as que continham cloro necessitaram da adição de 0,2 ml ou 4 gotas de arsenito de sódio (Na_2HAsO_4) com concentração 0,01N, pois, o cloro é um interferente nas determinações de flúor. Este método se denomina SPADNS.

3.3.3 Determinação da concentração de cloro livre

Para a determinação de cloro livre foi utilizado o espectrofotômetro de UV visível. O padrão branco de reagente foi obtido com a leitura da própria amostra. Esta análise foi realizada seguindo a metodologia e o kit de análises fornecido pela empresa Merk®.

Para determinar a quantidade de cloro livre na água foi necessário realizar a conversão da quantidade de dióxido de cloro em cloro livre residual na amostra.

3.3.4 Determinação da concentração de íons cloretos

A determinação de íons cloretos presente na água foi realizada por meio do método argentométrico. Para isso foi necessário 100 mL de amostra em um erlenmeyer com pH entre 7 e 10, se distinto o pH da amostra era necessário o ajuste com uma solução hidróxido de sódio com concentração de 1 N. Posteriormente foi adicionado 1mL de cromato de potássio (K_2CrO_4), o qual torna a solução amarelada. A amostra foi titulada com solução de nitrato de prata (AgNO_3) com concentração de 0,0141 N padronizada até o aparecimento de um leve tom amarelo-avermelhado. A

realização do padrão “branco de reagentes” de cloretos era necessária como referência e foi realizada com água deionizada adicionado o cromato de potássio nas mesmas proporções das demais amostras. O cálculo da quantidade de íons cloretos presentes na amostra é descrita na EQUAÇÃO 3.4.

$$Cl^{-} = \left[\frac{(A - B) \cdot N \cdot k}{(V)} \right], \quad \left(\frac{mg}{L} \right) \quad (3.4)$$

sendo:

A: volume titulado para a amostra em mL;

B: volume titulado para o padrão branco, em mL;

N: normalidade do $AgNO_3$ (0,0141 N);

V: volume da amostra em mL;

k: massa atômica do cloro em $mg \cdot mol^{-1}$ (35450)

3.3.5 Determinação de dureza total

A dureza total é definida como sendo a concentração total de cálcio e magnésio expressa em termos de $CaCO_3$. Para realizar essa titulação foram necessários 100 mL de amostra, 1 mL de solução tampão para dureza total e uma gota do indicador negro de eriocromo T e como agente titulante foi utilizado uma solução de EDTA com concentração 0,01 N.

A concentração total de cálcio e magnésio contida na amostra analisada foi determinada pela EQUAÇÃO 3.5.

$$dureza = \left[\frac{A \cdot 1000}{V} \right], \quad \left(\frac{mg}{L} CaCO_3 \right) \quad (3.5)$$

sendo:

A: Volume do titulante gasto em mL

V: volume da amostra em mL

3.3.6 Determinação do potencial hidrogeniônico – pH e da temperatura

Para a determinação do pH e da temperatura foi utilizado um medidor potenciométrico, pHmetro, da marca *Gehaka*, modelo *PG1800*. Este equipamento opera dentro da faixa de medição de (-2 a 20) unidades de pH. A verificação da calibração do equipamento ocorreu com solução padrão de concentrações conhecidas de pH em 3 valores, (4,01; 6,86 e 9,18) e o repouso do eletrodo em solução de +KCl, conforme recomendação do fornecedor do equipamento. A precisão do equipamento varia $\pm 0,02\%$ pH e a resolução 0,01 pH.

Para as medições de temperatura o equipamento opera dentro da faixa de medição de 0° a +100 °C, precisão de $\pm 0,2\%$ da leitura e resolução a 0,1°C.

3.3.7 Determinação de turbidez

Para a determinação da turbidez foi utilizado um turbidímetro portátil *HACH*, modelo *2100Q*. Este equipamento realiza leituras de turbidez segundo o princípio nefelométrico e opera dentro da faixa de medição de 0 a 1000 NTU. A precisão do equipamento é de $\pm 2\%$ da leitura mais luz de espúria de 0 a 1000 NTU, possui resolução 0,01 NTU. A verificação da calibração do equipamento ocorreu com solução padrão com concentrações conhecidas de turbidez a 20, 100 e 800 NTU, conforme recomendação do fornecedor.

3.3.8 Determinação da condutividade elétrica

A determinação da condutividade elétrica foi realizada com o uso de condutímetro marca *QUIMIS*, modelo Q795M. A calibração do equipamento foi verificada utilizando um padrão com condutividade conhecida de $1412 \mu\text{Scm}^{-1}$. Segundo o fornecedor o valor verificado da solução padrão poderá conter variação, na leitura, máxima de 10%. Todas as análises foram realizadas após a verificação da calibração do equipamento.

3.3.9 Determinação da concentração de surfactantes

Para a determinação de surfactantes foi utilizado o método e kit da Merck® em espectrofotômetro de UV visível. Para a realização da análise foi utilizado o branco que já vinha com o kit, e o preparo das amostras de água de alimentação, de permeado e de concentrado.

3.4 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE DENSIDADE DE SEDIMENTOS

A realização do teste do índice de densidade de sedimentos – SDI ocorreu no início da operação 20 horas e ao final após 2000 horas. Neste período foram medidos o SDI da água de alimentação e da água após o filtro de carvão ativado, localizado antes da unidade OR.

O procedimento para a realização do teste de SDI utilizou equipamento específico, consistindo em sistema de filtração pressurizado equipado com filtros de $0,45 \mu\text{m}$ de porosidade e 47 mm de diâmetro. A pressão para a realização do teste permaneceu constante e igual 0,21 MPa, além disso, será necessário o uso de cronômetro, proveta de 500 mL e pinça.

O esquema do equipamento utilizado no experimento pode ser visualizado na FIGURA 3.9.

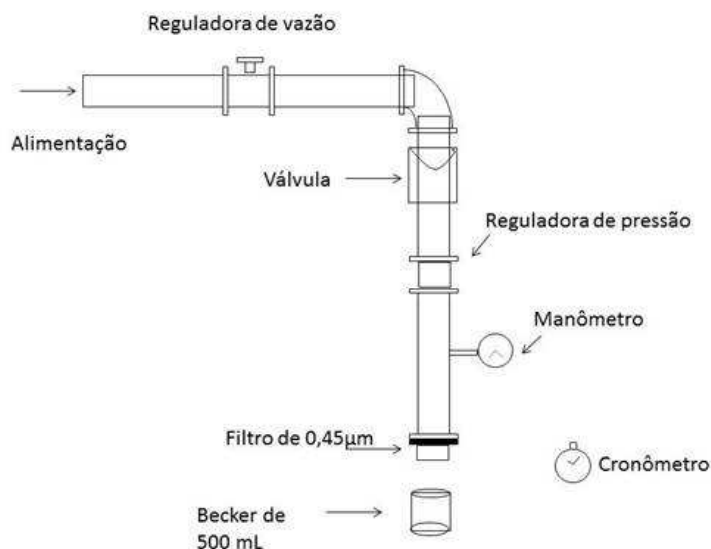


FIGURA 3.9 – ESQUEMA DO EQUIPAMENTO PARA A MEDIDA DO SDI

Fonte: Taylor & Jacobs, 1996 – tradução livre

Para a execução do teste era necessário de uma tomada de água com manômetro e regulador de pressão, além do equipamento e outros dispositivos já citados.

Para o cálculo do índice, consideram-se três intervalos de tempo, sendo:

- i. o tempo necessário para a coleta dos primeiros 500 mL da água a ser avaliada, T_0 ;
- ii. o intervalo de tempo pode variar entre 5, 10 ou 15 minutos, com a tomada da água corrente; e
- iii. o tempo necessário para a coleta dos últimos 500 mL, T_f .

Os resultados de SDI obtidos neste trabalho foram calculados pela EQUAÇÃO 3.6.

$$SDI = \left\{ \frac{\left[1 - \left(\frac{T_0}{T_f} \right) \right]}{f} \right\} * 100 \quad (3.6)$$

sendo:

T_0 : tempo que o filtro novo leva para filtrar 500 ml de água ou de qualquer outro fluido

T_f : tempo que o filtro após f minutos de filtração leva para filtrar 500 ml de água ou qualquer outro fluido

f : tempo total do teste, de filtração 5, 10 ou 15 minutos.

3.5 PROCEDIMENTO DE LIMPEZA QUÍMICA DAS MEMBRANAS DE OSMOSE REVERSA

As membranas de filtração necessitam de limpeza mecânica e as de osmose reversa necessitam apenas de limpeza química, de acordo com a recomendação do fabricante. A necessidade de limpeza química é evidenciada pelos seguintes parâmetros:

- a) quando a redução na capacidade de filtração da membrana for igual ou superior a 10%;
- b) quando o aumento da diferença de pressão entre os 2 manômetros for igual ou superior a 15%; e
- c) quando o aumento da condutividade elétrica for superior a 10%.

Para a realização do procedimento de limpeza química o sistema de membranas deve ser desligado e esta deverá ser realizada inicialmente com uma solução alcalina e posteriormente com uma solução ácida.

Para a limpeza alcalina foi utilizado 60 mL de uma solução hidróxido de sódio a 50% (1 N) podendo a solução alcançar temperatura máxima de 40°C e pH em torno de 12. Para a limpeza ácida foi utilizado 200 mL de uma solução de ácido clorídrico a 33% (0,33 N), com temperatura mínima de 30°C e pH em torno de 2. O procedimento de cada limpeza teve duração de 1 hora.

3.6 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O conjunto de dados obtido neste trabalho foi igual a 127 análises para cada parâmetro. Os dados foram tratados com a utilização do teste Z que removeu pontos anormais, permitindo uma melhor correlação entre os resultados. Com a aplicação deste teste restou 81 conjunto de dados em que foram desconsiderados os valores superiores a dois desvios padrão. A EQUAÇÃO 3.4 apresenta o teste Z:

$$Teste(Z) = \frac{dado - media do dado}{desvio padrão} \quad (3.4)$$

3.7 ANÁLISES DO RESÍDUO PROVENIENTE DA LIMPEZA QUÍMICA

Após a avaliação os resíduos das limpezas alcalinas e ácidas foram descartados através da válvula abre e fecha ou “dreno” e coletadas as amostras. Após cada limpeza a membrana foi alimentada com água corrente despressurizada por 10

minutos com a finalidade realizar um enxágue e remover os produtos utilizados na limpeza.

As amostras dos resíduos foram coletadas em frascos, dispostos em caixas térmicas e encaminhadas aos laboratórios para as análises e determinações analíticas constantes no QUADRO 3.2.

PARÂMETRO	LIMITE DE QUANTIFICAÇÃO	MÉTODO DE ANÁLISE
Carbono Orgânico	0,1	SMWW:2012 4110
Cálcio	1	SMWW:2012 3500-Ca
Nitrogênio Kjeldahl total	0,1	SMWW:2012 4500-Norg
Nitrogênio total	0,01	SMWW:2012 4500-NO2
Fósforo total	0,01	SMWW:2012 4500-P
Enxofre	0,01	SMWW:2012 3500-S
Sódio	0,01	SMWW:2012 3500-Na
Potássio	0,01	SMWW:2012 3500-K
Magnésio	1	SMWW:2012 3500-Mg
Alumínio	0,5	ISO 10566 E30
Arsênio	0,1	SMWW:2012 3111
Bário total	1,0	SMWW:2012 2012
Cádmio Total	0,01	SMWW:2012 3500-Cd
Cromo total	0,1	SMWW:2012 3500-Cr
Cobre total	0,05	SMWW:2012 3500-Cu
Ferro total	0,5	SMWW:2012 3500-Fe
Mercúrio Total	0,01	SMWW:2012 3111
Molibdênio Total	1,0	SMWW:2012 3500-Mo
Níquel Total	0,01	SMWW:2012 3500-Ni
Chumbo Total	0,1	SMWW:2012 3500-Pb
Selênio Total	0,01	SMWW:2012 3111
Estanho Total	1,0	SMWW:2012 3500-Sn
Zinco total	0,01	SMWW:2012 3500-Zn

QUADRO 3.2 – PARÂMETROS ANALISADOS NO RESÍDUO QUÍMICO

Fonte: AWWA-APHA-WPCI - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2012).
SMWW

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões obtidos neste trabalho, após o tratamento estatístico, serão apresentados sob a forma de gráficos e tabelas.

Os resultados apresentados nesta seção são provenientes das determinações realizadas no laboratório, após 1000 horas de operação contínua da unidade piloto e serão apresentados por parâmetro analisado. As tabelas contendo os dados dos resultados obtidos podem ser consultadas no APÊNDICE 1 ao 9.

4.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Nas TABELAS 4.1, 4.2 e 4.3 podem-se verificar as médias, medianas, desvios padrão, coeficiente de variação, a análise do coeficiente de variação e a incerteza expandida para 95,45% do tempo para os parâmetros avaliados da água de alimentação, do permeado e do concentrado. Os dados necessitaram de tratamento, tendo em vista a ocorrência de falhas no sistema de bombeamento do produto e falhas operacionais na bomba de dosagem. Desta forma serão apresentados resultados juntamente com a análise estatística dos mesmos. A FIGURA 4.1 mostra uma destas falhas, quando ocorreu dosagem insuficiente de metabissulfito de sódio devido ao aumento da dosagem de dióxido de cloro.



FIGURA 4.1 – AMOSTRA DE ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO (A), PERMEADO (P) E CONCENTRADO (C) EM ÉPOCA DE BAIXA PLUVIOSIDADE E DOSAGEM DE DIÓXIDO DE CLORO INSUFICIENTE

4.1.1 Análise Do Coeficiente De Variação

Os resultados do estudo sem o tratamento de dados apresentou em suma alta dispersão dos valores medidos, tanto para a água de alimentação, para o permeado e para o concentrado. Para o coeficiente de variação, com baixa dispersão, inferior a 15% o que demonstra resultados homogêneos, de média dispersão entre 15 e 30%, mas o predomínio foi de alta dispersão acima de 30%, o que significa dados heterogêneos.

Após o tratamento de dados empregado cerca de 64% dos resultados permaneceram. Caso fosse utilizado um tratamento de dados mais severo restariam pouco mais de 20% dos dados originais. Desta forma se optou pelo primeiro para não alterar a representatividade do experimento.

Na TABELA 4.1 – Água de Alimentação – Dados Brutos pode-se observar que dos nove parâmetros analisados 7 apresentaram alta dispersão entre os dados e dois baixa dispersão, vazão e pH. Na mesma tabela, Água de alimentação – Dados Tratados podemos observar que após o tratamento de dados seis parâmetros continuavam a apresentar alta dispersão, dois baixa dispersão e um média disper-

são. A incerteza expandida sofre variação e na maioria dos parâmetros a incerteza foi reduzida, o que indica que o processo de ciclo completo pode ser aperfeiçoado.

Na TABELA 4.2 – Permeado, pode-se observar que dos nove parâmetros analisados um deles não foi possível determinar o coeficiente de variação, e dos oito parâmetros restantes seis apresentaram alta dispersão e dois baixa dispersão. Após o tratamento dos dados foi verificado que a proporção se manteve. A incerteza expandida praticamente não sofreu alteração, tendo em vista que os valores eram baixos e a retirada dos pontos acima de 3 desvios-padrão não influenciou para esta água.

Na TABELA 4.3 – Concentrado, pode-se observar que dos parâmetros avaliados, sem e com o tratamento de dados, apenas um sofreu mudanças de alta dispersão para média dispersão. No tocante a incerteza expandida praticamente não houve mudanças entre o conjunto de dados sem o tratamento e com o tratamento..

TABELA 4.1 – RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO, SEM E COM O TRATAMENTO DE DADOS CONTENDO VALORES DA MÉDIA, DO DESVIO PADRÃO, O COEFICIENTE DE VARIAÇÃO, A ANÁLISE DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO E A INCERTEZA EXPANDIDA DE CADA PARÂMETRO

Parâmetro	Água de Alimentação - Dados Brutos						Água de Alimentação - Dados Tratados					
	média	mediana	desvio padrão amostral	coeficiente de variação (%)	Análise do coeficiente de variação	incerteza expandida 95,45%	média	mediana	desvio padrão amostral	coeficiente de variação (%)	Análise do coeficiente de variação	incerteza expandida 95,45%
Vazão ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	0,29	0,30	0,03	8,51	baixa dispersão	0,00	0,40	0,40	0,03	6,65	baixa dispersão	0,00
Condutividade (uS cm^{-1})	348,58	330,00	107,41	30,81	alta dispersão	4,72	318,02	289,00	96,37	30,30	alta dispersão	5,26
pH (pH)	6,65	6,60	0,21	3,10	baixa dispersão	0,01	6,67	6,65	0,19	2,88	baixa dispersão	0,01
Turbidez (NTU)	1,20	1,03	0,64	52,97	alta dispersão	0,03	1,03	0,88	0,53	51,67	alta dispersão	0,03
Cor ($^{\circ}\text{H;PtCo}$)	27,98	17,00	26,75	95,59	alta dispersão	1,18	19,75	14,00	16,27	82,36	alta dispersão	0,89
Cloro livre (mg L^{-1})	0,33	0,30	0,15	45,89	alta dispersão	0,01	0,30	0,30	0,11	35,84	alta dispersão	0,01
Cloretos (mg L^{-1})	38,22	34,90	14,30	37,42	alta dispersão	0,63	33,95	30,51	11,56	34,04	alta dispersão	0,63
Fluoretos (mg L^{-1})	0,25	0,25	0,11	41,41	alta dispersão	0,00	0,23	0,23	0,10	41,86	alta dispersão	0,01
Dureza (mg L^{-1})	57,07	56,00	14,79	25,91	alta dispersão	0,65	53,57	52,00	13,54	25,28	média dispersão	0,74

TABELA 4.2 – RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PERMEADO, SEM E COM O TRATAMENTO DE DADOS CONTENDO VALORES DA MÉDIA, DO DESVIO PADRÃO, O COEFICIENTE DE VARIAÇÃO, A ANÁLISE DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO E A INCERTEZA EXPANDIDA DE CADA PARÂMETRO

Parâmetro	Permeado - Dados Brutos						Permeado - Dados Tratados					
	média	mediana	desvio padrão amostral	coeficiente de variação (%)		incerteza expandida 95,45%	média	mediana	desvio padrão amostral	coeficiente de variação (%)		incerteza expandida 95,45%
Vazão ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	0,20	0,20	0,02	12,56	baixa dispersão	0,00	0,30	0,30	0,03	8,60	baixa dispersão	0,00
Condutividade (uS cm^{-1})	18,32	17,05	6,28	34,26	alta dispersão	0,28	16,68	15,66	5,32	31,88	alta dispersão	0,29
pH (pH)	5,84	5,72	0,41	7,04	baixa dispersão	0,02	5,82	5,80	0,29	4,91	baixa dispersão	0,02
Turbidez (NTU)	0,35	0,31	0,18	51,53	alta dispersão	0,01	0,32	0,29	0,16	50,45	alta dispersão	0,01
Cor ($^{\circ}\text{H;PtCo}$)	1,40	0,00	2,45	175,24	alta dispersão	0,11	0,89	0,00	1,55	174,28	alta dispersão	0,08
Cloro livre (mg L^{-1})	0,00	0,00	0,00	n/d		0,00	0,00	0,00	0,00	n/d		0,00
Cloretos (mg L^{-1})	1,83	1,50	1,68	91,91	alta dispersão	0,07	1,49	1,50	1,12	75,02	alta dispersão	0,06
Fluoretos (mg L^{-1})	0,02	0,00	0,04	181,04	alta dispersão	0,00	0,01	0,23	0,10	41,86	alta dispersão	0,01
Dureza (mg L^{-1})	1,40	1,00	1,40	100,45	alta dispersão	0,06	1,22	1,00	1,28	104,97	alta dispersão	0,07

TABELA 4.3 – RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DO CONCENTRADO, SEM E COM O TRATAMENTO DE DADOS CONTENDO VALORES DA MÉDIA, DO DESVIO PADRÃO, O COEFICIENTE DE VARIAÇÃO, A ANÁLISE DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO E A INCERTEZA EXPANDIDA DE CADA PARÂMETRO

Parâmetro	Concentrado - Dados Brutos						Concentrado - Dados Tratados					
	média	mediana	desvio padrão amostral	coeficiente de variação (%)		incerteza expandida 95,45%	média	mediana	desvio padrão amostral	coeficiente de variação (%)		incerteza expandida 95,45%
Vazão ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	0,10	0,10	0,00	2,65	baixa dispersão	0,00	0,10	0,10	0,00	2,23	baixa dispersão	0,00
Condutividade (uS cm^{-1})	1459,95	1350,00	393,34	26,94	média dispersão	17,28	1339,79	1249,00	304,34	22,72	média dispersão	16,61
pH (pH)	6,93	6,85	0,32	4,56	baixa dispersão	0,01	6,94	6,89	0,26	3,78	baixa dispersão	0,01
Turbidez (NTU)	4,87	1,52	9,20	189,03	alta dispersão	0,40	3,38	1,52	4,15	122,81	alta dispersão	0,23
Cor ($^{\circ}\text{H;PtCo}$)	57,05	22,00	95,47	167,34	alta dispersão	4,19	40,74	19,00	50,37	123,63	alta dispersão	2,75
Cloro livre (mg L^{-1})	0,00	0,00	0,01	1118,03	alta dispersão	0,00	0,00	0,01	0,00	894,43	alta dispersão	0,00
Cloretos (mg L^{-1})	167,87	154,90	54,34	32,37	alta dispersão	2,39	153,77	142,61	45,48	29,58	média dispersão	2,48
Fluoretos (mg L^{-1})	0,58	0,48	0,34	58,38	alta dispersão	0,01	0,51	0,43	0,29	56,57	alta dispersão	0,02
Dureza (mg L^{-1})	243,62	244,00	55,38	22,73	média dispersão	2,43	235,69	240,00	46,91	19,90	média dispersão	2,56

4.1.2 Análise do coeficiente de determinação (R^2)

Para determinar se os resultados obtidos continham correlação foi realizada análise do coeficiente de determinação (R^2) para cada parâmetro. Esta possuía o objetivo de avaliar se o tratamento de dados aplicado colaborou para a melhoria do coeficiente de determinação, foi analisado o coeficiente de determinação sem o tratamento de dados, com o tratamento de dados e com o tratamento de dados de 0 a 700 h e de 700 a 1200 h de operação.

Os resultados do tratamento dos dados da água de alimentação podem ser visualizados na TABELA 4.4, pode-se observar que o tratamento dos dados não contribuiu para a melhoria do coeficiente de determinação dos parâmetros condutividade, pH, cloro livre, fluoretos e dureza na água de alimentação.

TABELA 4.4 – RESULTADOS DA MÉDIA, MEDIANA, DESVIOS PADRÃO, MODA, MÁXIMO, MÍNIMO E COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO PARA CADA PARÂMETRO DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO

Água de alimentação	R^2 - sem tratamento de dados	R^2 - com o tratamento de dados
Condutividade ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	0,68	0,67
pH (pH)	0,54	0,57
Turbidez (NTU)	0,48	0,60
Cor ($^{\circ}\text{H;PtCo}$)	0,39	0,66
Cloro livre (mg L^{-1})	0,33	0,03
Cloreto (mg L^{-1})	0,69	0,72
Fluoretos (mg L^{-1})	0,43	0,33
Dureza (mg L^{-1})	0,69	0,68

Na TABELA 4.5 pode-se observar que o tratamento dos dados não contribuiu para a melhoria do coeficiente de determinação dos cloretos. Para a condutividade, pH, turbidez, cor, íons fluoretos e dureza, TABELA 4.5, pode-se observar que o tratamento dos dados contribuiu sim para o aumento do coeficiente de determinação do concentrado com o tratamento dos dados ou com o tratamento dos dados e a separação dos períodos de utilização de carvão de origem diferentes.

TABELA 4.5 – RESULTADOS DA MÉDIA, MEDIANA, DESVIOS PADRÃO, MODA, MÁXIMO, MÍNIMO E COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO PARA CADA PARÂMETRO DO CONCENTRADO

Concentrado	R ² - sem tratamento de dados	R ² - com o tratamento de dados
Condutividade (uS cm ⁻¹)	0,36	0,46
pH (pH)	0,35	0,57
Turbidez (NTU)	0,01	0,03
Cor (°H;PtCo)	0,00	0,01
Cloro livre (mg L ⁻¹)	0,03	nd
Cloretos (mg L ⁻¹)	0,51	0,48
Fluoretos (mg L ⁻¹)	0,29	0,33
Dureza (mg L ⁻¹)	0,14	0,17

Insta salientar que para o pH no período em que foi utilizado carvão de origem animal o resultado (0 a 700 h) foi negativo, o que indica que o polinômio de grau dois utilizado possuía números complexos. A divisão dos dados tratados em dois períodos ora contribuiu para a melhoria do coeficiente de determinação em um período, ora em outro período, ora em nenhum dos períodos e ora em ambos os períodos. O coeficiente de determinação do cloro livre foi nulo para o tratamento de dados e para o período de utilização do primeiro carvão (de 0 a 700 h de operação).

Com o tratamento dos dados os erros experimentais, incertezas e demais fatores que contribuíram para os dados acima e abaixo de dois desvios foram retirados.

4.2 ANÁLISE GRÁFICA DOS RESULTADOS

A fim de compreender melhor os resultados foi elaborada uma tabela com limites máximos e mínimos para cada parâmetro analisado. Esta tabela foi construída a partir da resolução 2914/11 que estabelece os padrões de qualidade da água, livros, artigos e manuais que estabelecem a qualidade mínima para água de caldeira, trocador de calor, torre de resfriamento para o processo industrial. A TABELA 4.6 pode ser visualizada abaixo.

TABELA 4.6 – LIMITE INFERIOR E SUPERIOR PARA CADA PARAMETRO DE ÁGUA INDUSTRIAL GENÉRICA

Parâmetro	Limite Inferior - Superior
Condutividade	80-250
pH	6-9
Turbidez	0-2
Cor	0-5
Cloro residual livre	0,1-1
Cloreto	0-15
Fluoreto	0-0,2
Dureza	8-50
Surfactante	0,2-0,8

Com base nesta tabela, os gráficos apresentados a seguir, a linha LI representa os valores mínimos permitidos para aquele parâmetro e a segunda linha LS representa o valor máximo permitido para o parâmetro. Os gráficos apresentados mostram a ocorrência de dados acima do limite. Durante o experimento foi calculada a eficiência de remoção para cada parâmetro analisado. Devido à quantidade de amostras realizadas foi realizado o tratamento dos dados, os gráficos apresentados neste trabalho já receberam tratamento, que representa o resultado em 95,45% do período avaliado.

4.2.1 Resultados das determinações de condutividade elétrica

A determinação da condutividade elétrica foi utilizada como parâmetro de controle da eficiência do PSM visto a representatividade deste parâmetro para a avaliação da osmose reversa o qual retém algas, vírus, micro-organismos, bactérias, compostos orgânicos e sais bivalentes. A baixa condutividade do permeado quando comparado com a da água de alimentação revela o alto poder de remoção de sais da membrana, ou seja, foi superior a 97% bem como o uso da tecnologia empregada.

Na FIGURA 4.2 pode ser visualizada a eficiência do PSM, a média e a incerteza expandida para 95,45% do período avaliado. Para o permeado era esperado valores de condutividade em torno de 5% dos valores da água de alimentação e que o concentrado apresentasse valores quatro vezes superiores ao valor contido na água de alimentação, devido à taxa de recuperação. Com o tratamento de dados aplicados conforme a metodologia descrita no item 3.5, Equação 3.4 foram utilizados 81 dados para cada parâmetro e não mais 127. A redução na quantidade de dados era esperada para a retirada de valores medidos em condições anormais de operação.

A condutividade da água de alimentação apresentou média de 318,02 $\mu\text{S cm}^{-1}$, do permeado 16,68 $\mu\text{S cm}^{-1}$, redução média de 94,75% em relação a água de alimentação e do concentrado apresentou condutividade de 1339,79 $\mu\text{S cm}^{-1}$, 4,21 vezes superior a água de alimentação. Isto ocorreu em decorrência do tratamento de dados, pela redução da quantidade de análises, buscando a redução da incerteza e maior confiabilidade dos resultados e do processo.

No tocante a este parâmetro a Resolução CONAMA 430/2011 não apresenta valores máximos limitantes, indicando como possível o lançamento de efluentes sem o controle dos íons dissolvidos.

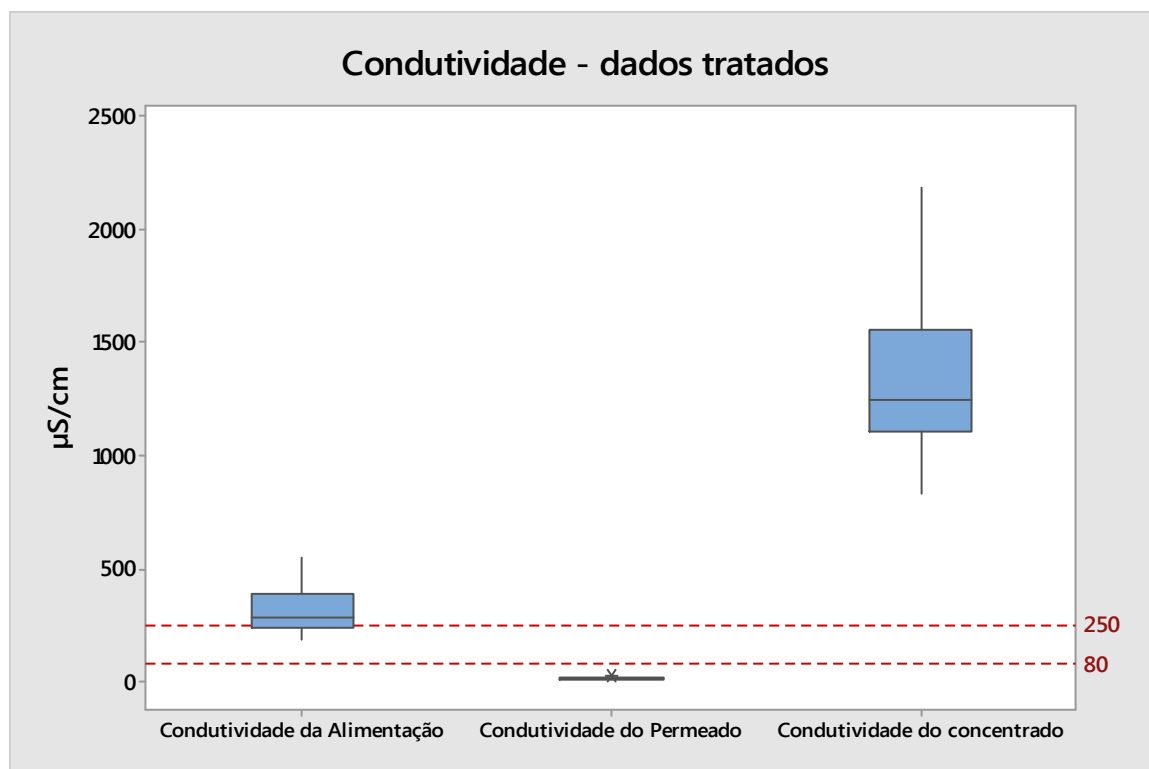


FIGURA 4.2 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

4.2.2 Resultados das determinações de turbidez

Os resultados das medidas de turbidez da água industrial em média de repetições foram inferiores às medidas de turbidez do concentrado, este resultado pode ser atribuído existência da adsorção de parte das partículas sólidas no filtro de carvão ativado granular e outra parte pode ter se acumulado na área superficial de contato da membrana de osmose reversa.

Na FIGURA 4.3 pode-se visualizar os resultados das determinações de turbidez com os dados tratados seguindo a metodologia descrita no item 3.5 e usada no item 4.1.1. Com o tratamento dos dados os erros experimentais, incertezas e demais fatores que contribuíram para os dados acima e abaixo de dois desvios foram retirados, dessa forma os desvios-padrão, coeficiente de variação reduziram e o coeficiente de determinação aumentou. Os asteriscos que podem ser visualizados na FIGURA 4.3 são devido a pontos fora da média, da mediana, do primeiro e do terceiro quartil que ocorreram aos o tratamento de dados.

A turbidez no permeado apresentou redução de 69% passando, em média, de 1,03 NTU para 0,32 NTU. Para o concentrado o fator de concentração foi de 3,29 vezes superior a média da água de alimentação. Neste parâmetro o PSM não apresentou eficiência superior a 90% como o que aconteceu com a condutividade, isto se deve a dificuldade de redução de um parâmetro quando a concentração, turbidez já é baixa e ao fato de não ter sido utilizada o pré-tratamento com membranas de ultra-filtração. Os asteriscos que podem ser visualizados na figura são devido a pontos fora da média, da mediana, do primeiro e do terceiro quartil. O tratamento de dados reduziu a incerteza expandida aumentando a confiabilidade no PSM.

Na resolução CONAMA 430/2011 este parâmetro não possui limites de concentração para o lançamento de efluentes, indicando a permissão do lançamento de efluentes com a presença de sólidos dissolvidos.

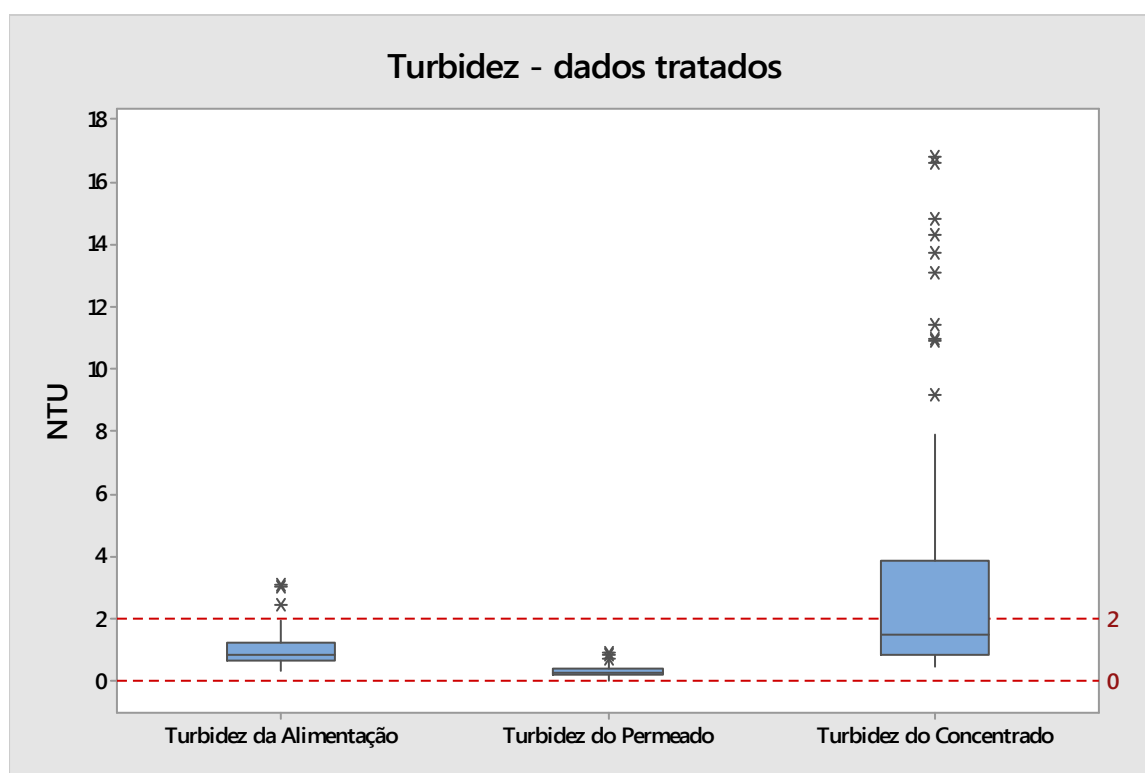


FIGURA 4.3 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE TURBIDEZ

4.2.3 Resultados das determinações do pH

Os valores médios de potencial hidrogeniônico (pH) após o tratamento dos dados (FIGURA 4.4) apresentou pouca variação para os dados analisados sem e com o tratamento de dados. Para o concentrado entre 6,94 e 6,96, para a água de alimentação entre 6,65 e 6,67 e para o permeado entre 5,84 e 5,82. A redução do pH do permeado não é desejada, especialmente para processos de tratamento de água. Quando comparado os resultados deste parâmetro com e sem o tratamento de dados, os resultados mostram a regularidade do PSM para este parâmetro, na água de alimentação, no permeado e no concentrado, fenômeno semelhante foi também evidenciado por Carvalho *et al.* (2013).

Os asteriscos que podem ser visualizados na figura são devido a pontos fora da média, da mediana, do primeiro e do terceiro quartil. O tratamento de dados reduziu a incerteza expandida aumentando a confiabilidade no PSM.

A resolução CONAMA 430/2011 estabelece valores limites entre 5 e 9 para este parâmetro e os valores obtidos na água de alimentação como no concentrado encontram-se dentro do pré-definido na legislação.

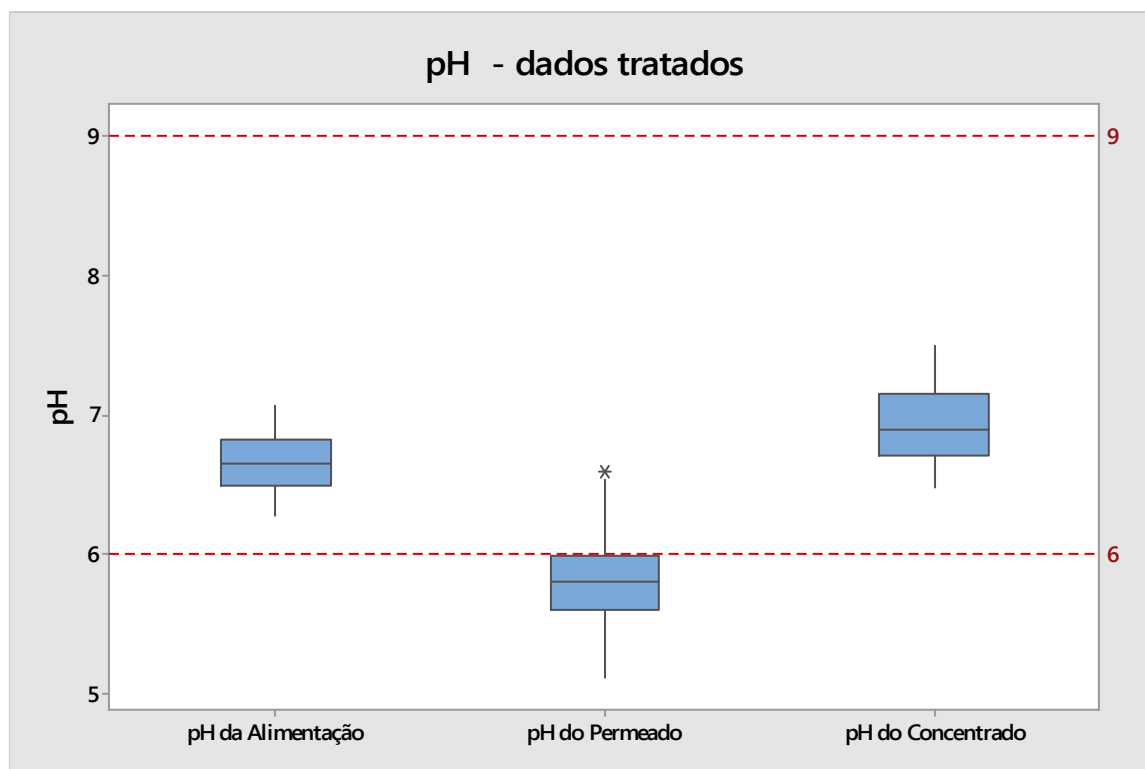


FIGURA 4.4 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE pH

4.2.4 Resultados das determinações de cor

Os resultados das determinações de cor podem ser visualizados na FIGURA 4.5, pode-se observar a remoção de parte dos desvios, melhorando a qualidade dos dados obtidos, reduzindo os desvios-padrão da água de alimentação, do permeado e do concentrado, além de reduzir o coeficiente de variação e determinação das águas avaliadas. No entanto o tratamento de dados para o parâmetro cor, assim como foi para o de pH, não interferiu nos resultados de eficiência do processo, apresentando remoção da cor de 95% quando comparada com a água de alimentação e para o concentrado o fator de acréscimo foi de 2,06 vezes quando comparado com a água de alimentação. Apesar de apresentar resultados próximos o tratamento de dados reduziu a incerteza expandida aumentando a confiabilidade no PSM.

Na resolução CONAMA 430/2011 a cor não possui limites para o lançamento de efluentes, indicando a permissão do lançamento de efluentes com presença e sem limitações de cor.

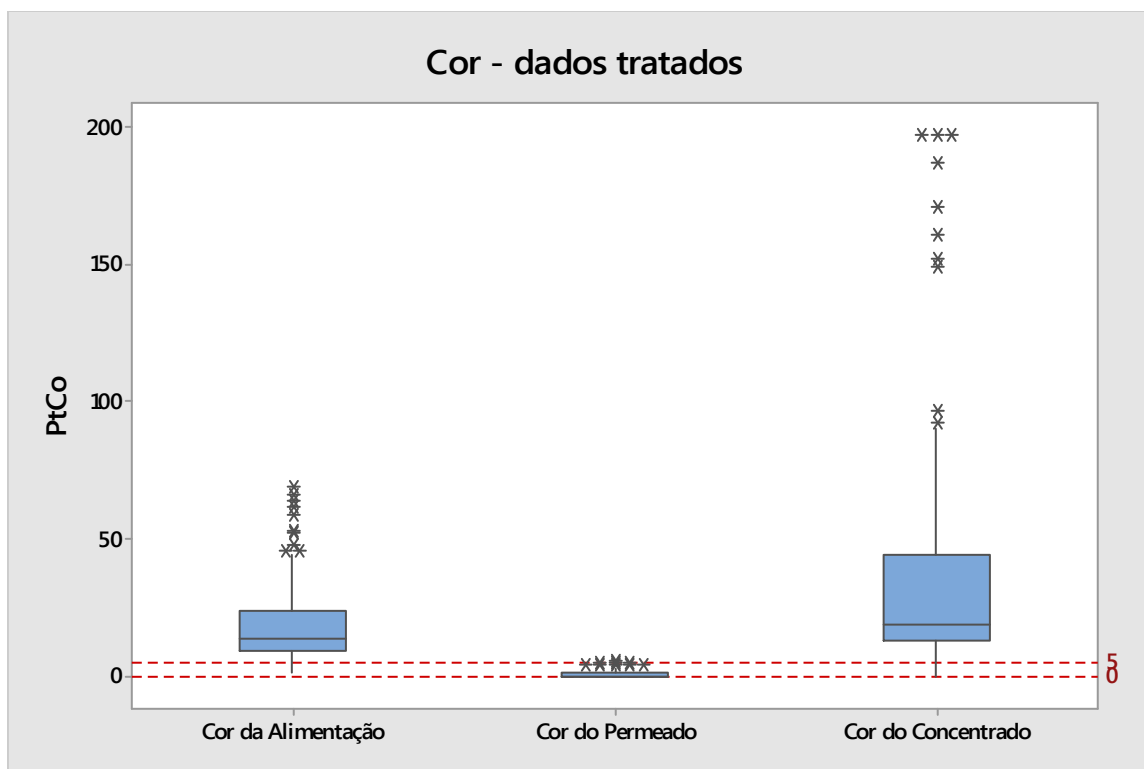


FIGURA 4.5 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE COR

4.2.5 Resultados das determinações da concentrações de cloro livre

A utilização do dióxido de cloro no processo se deve pela capacidade de oxidação do composto, que disponibiliza residual de cloro livre na rede, adutoras e tubulações por um longo período evitando a proliferação de micro-organismos. Normalmente se insere este produto após o processo de tratamento e antes da distribuição para evitar a proliferação de micro-organismos na rede de distribuição dessa água e assim evitar possíveis problemas nos processos de utilização da água.

Visando o aumento da durabilidade das membranas de poliamida a neutralização do dióxido de cloro torna-se importante devido à estrutura molecular e reatividade dos compostos clorados eles podem alterar, modificar, quebrar as moléculas de poliamida. A presença do cloro no concentrado indica que o pré-tratamento não foi eficiente, a durabilidade e a eficiência da membrana pode ter sido comprometida pela colmatção.

Na FIGURA 4.6 pode-se observar os resultados das determinações de cloro livre com o tratamento de dados, o permeado e o concentrado apresentaram valores iguais ou próximos de zero enquanto a água de alimentação apresentou maior variação. Esta variação se deve a variação da qualidade da água bruta (manancial) durante o tempo de operação, que eleva ou reduz a quantidade de dióxido de cloro utilizada no processo de tratamento de ciclo completo.

Os resultados de Cloro Residual Livre nos leva a concluir que a remoção foi praticamente de 100% para o permeado quando comparado com a água de alimentação. Esta eficiência pode ser explicada pelo PSM, mas não podemos nos esquecer da utilização da torre de adsorção na forma de filtro de carvão ativado e da adição de metabissulfito de sódio a 5% para neutralizar os efeitos do cloro sobre a superfície das membranas. Apesar de apresentar resultados próximos o tratamento de dados reduziu a incerteza expandida aumentando a confiabilidade no PSM.

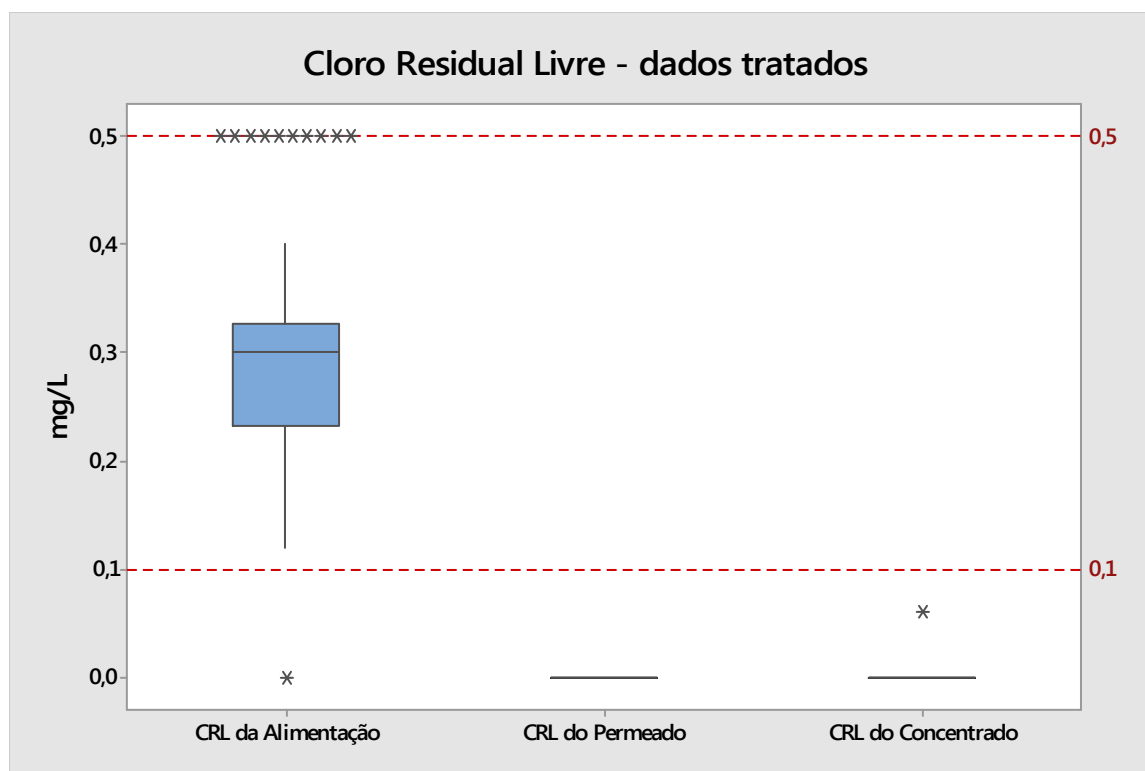


FIGURA 4.6 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE CLORO LIVRE

4.2.6 Resultados das determinações das concentração de íons fluoreto

Os íons de fluoreto podem ser nocivos à saúde humana, em especial quando em contato com matéria orgânica, formando os trihalometanos (THM). Para as instalações industriais o fluoreto contribui para a corrosão em estruturas metálicas, em especial das que trabalham sobre pressão mesmo em baixas concentrações devido à alta reatividade do flúor.

Com a finalidade de avaliar com maior precisão o comportamento dos íons de fluoreto, recomenda-se o monitorar comportamento por um período maior e pela utilização comparativa de dois métodos de análises, o adotado, SPADNS e o método do eletrodo de íon seletivo.

Com relação aos resultados das determinações da concentração de flúor, FIGURA 4.7, obteve-se eficiência de 95% para o permeado e acréscimo de 2,18 vezes na concentração do permeado, quando comparados com a água de alimentação. Apesar de apresentar resultados próximos o tratamento de dados reduziu a incerteza expandida aumentando a confiabilidade no PSM.

Para o fluoreto total a resolução CONAMA 430/2011 limita o valor máximo para lançamento em 10 mgL^{-1} . O concentrado no período analisado apresentou valor máximo medido de $1,6 \text{ mgL}^{-1}$ de íons fluoreto, atendendo assim a legislação vigente.

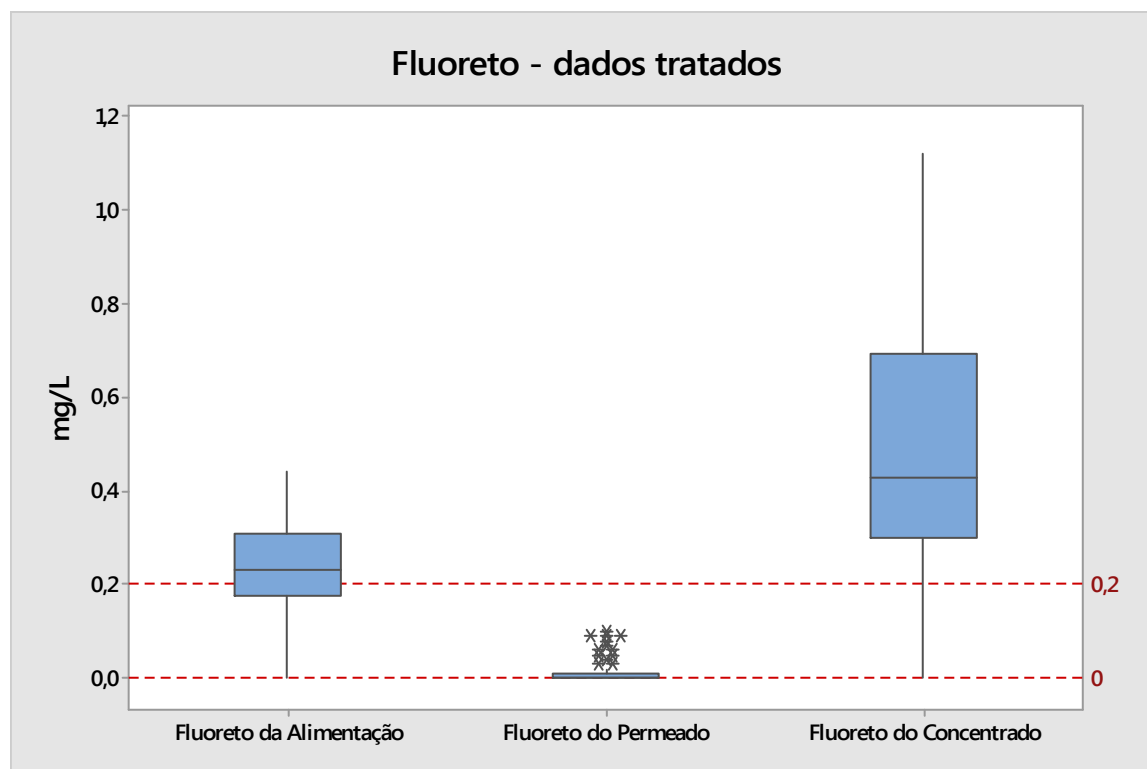


FIGURA 4.7 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE FLUORETO

4.2.7 Resultados das determinações das concentração de cloreto

Os íons de cloreto podem ser nocivos à saúde humana, em especial quando em contato com matéria orgânica, formando os trihalometanos (THM), assim como os íons de fluoreto. Para as instalações industriais o cloreto, assim como o fluoreto contribuem para a corrosão em estruturas metálicas, em especial das que trabalham sobre pressão, como condensadores, trocadores de calor, torres de resfriamento, mesmo em baixas concentrações devido à alta reatividade do cloro.

Os resultados das determinações de cloreto apresentaram desvio padrão de aproximadamente 40% do valor médio na água de alimentação, no permeado tratado cerca de 80% de desvio e no concentrado também. Na FIGURA 4.8 pode-se observar as variações de cloreto, para o permeado a eficiência foi de 94% e o acréscimo do permeado foi de 4,53 vezes, resultados muito próximos aos das determinações de cloreto sem o tratamento de dados, demonstrando para este parâmetro a conformidade, regularidade e confiabilidade do PSM. Apesar de apresentar resulta-

dos próximos o tratamento de dados reduziu a incerteza expandida aumentando a confiabilidade no PSM.

A resolução CONAMA 430/2011 não apresenta este parâmetro como limitante para o lançamento de efluentes o que contribui para a degradação do corpo hídrico.

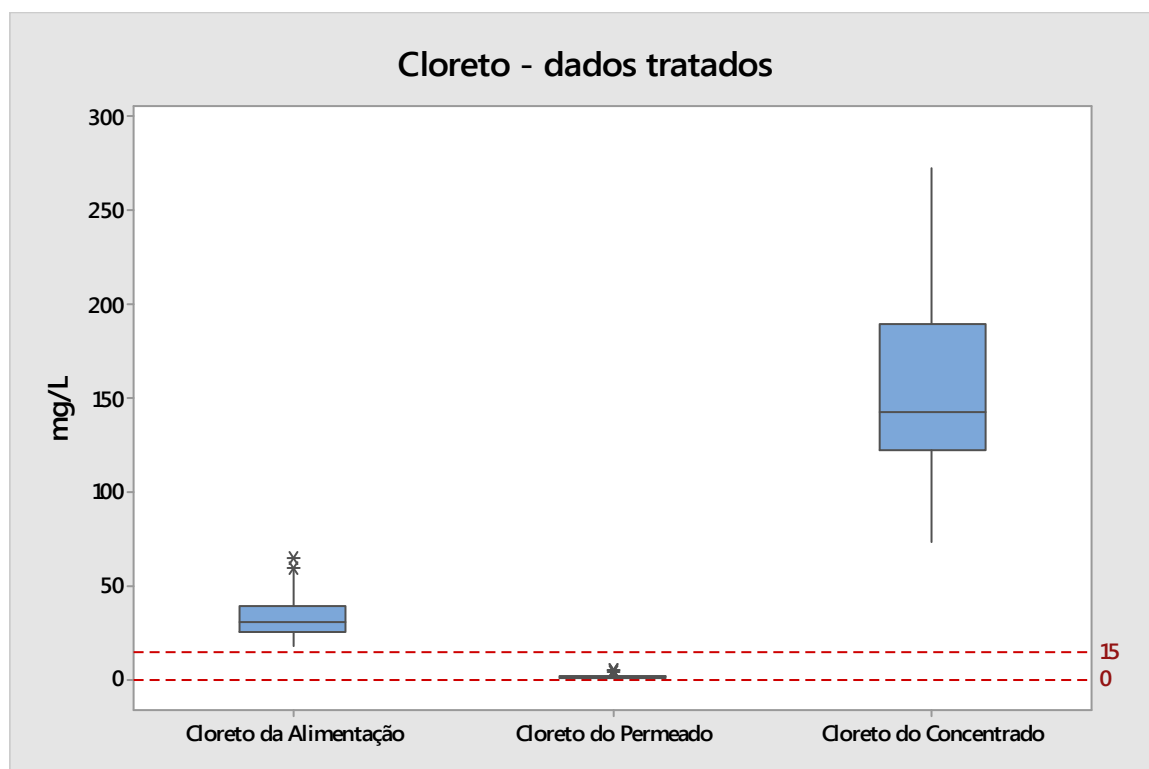


FIGURA 4.8 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE CLORETO

4.2.8 Resultados das determinações de dureza total

A dureza total colabora para a formação de incrustações formadas principalmente por cálcio e magnésio. No experimento em questão, para o concentrado, as determinações de dureza de dureza total apresentaram valores médios para a água de alimentação dentro dos valores recomendados pela EPA para água de re-úso.

Na FIGURA 4.9 pode-se observar os resultados das determinações de dureza, a variação dos desvios da água de alimentação, permeado e concentrado diminuiu bem como o coeficiente de variação e de determinação destas águas. O resultado das determinações de dureza total após o tratamento de dados foi de aproximadamente 98% de eficiência, redução da concentração, quando comparado com a água de alimentação. Já para o concentrado o fator de multiplicação foi de 4,27. Com a aplicação do tratamento de dados houve redução na incerteza expandida, que resultou no aumentando a confiabilidade no PSM.

Para a dureza total a resolução CONAMA 430/2011 não delimita concentração máxima de lançamento, provavelmente por esta ser um parâmetro mais relacionado a incrustações e obstruções em tubulações.

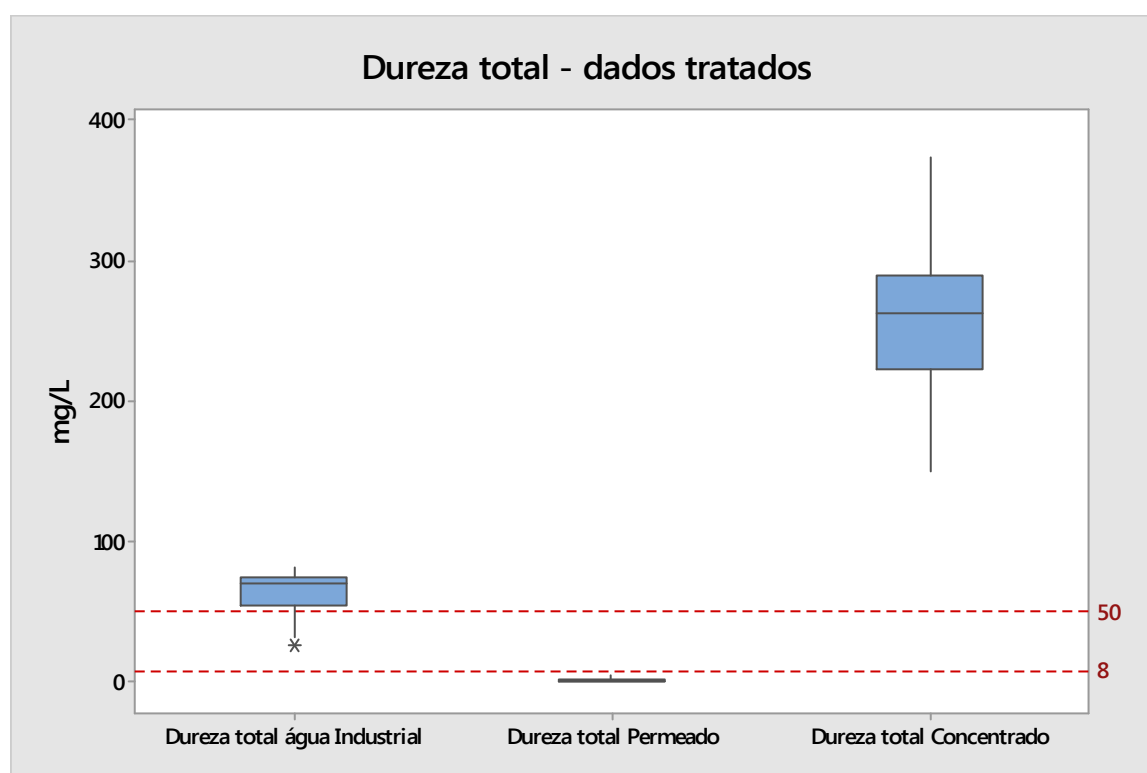


FIGURA 4.9 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE DUREZA TOTAL

4.2.9 Resultados das determinações de concentração de surfactantes

Em decorrência da indisponibilidade de kit's de análises, foram realizadas oito determinações de surfactantes e os resultados obtidos não foram tratados, visto que não possuem a mesma representatividade das 127 repetições realizadas para os parâmetros de condutividade, cor, turbidez, pH, cloro livre, fluoretos e cloretos.

Os efluentes domésticos e industriais possuem os surfactantes, na forma de detergentes que representados pelo lauril sulfato de sódio (IBAS) e pelo metil sulfato de sódio (mBAS), provém do uso de detergentes e são difíceis de serem tratados.

Para este parâmetro a resolução CONAMA 430/2011 novamente foi silente, não o incluindo como parâmetro controlado para o lançamento de efluentes o que dificulta o controle e contribui para a degradação dos recursos hídricos.

A FIGURA 4.10 apresenta os resultados das determinações de surfactantes ao longo do tempo de operação do piloto.

A tecnologia avaliada reduziu a concentração de surfactantes em 95%, atendendo as especificações contratuais.

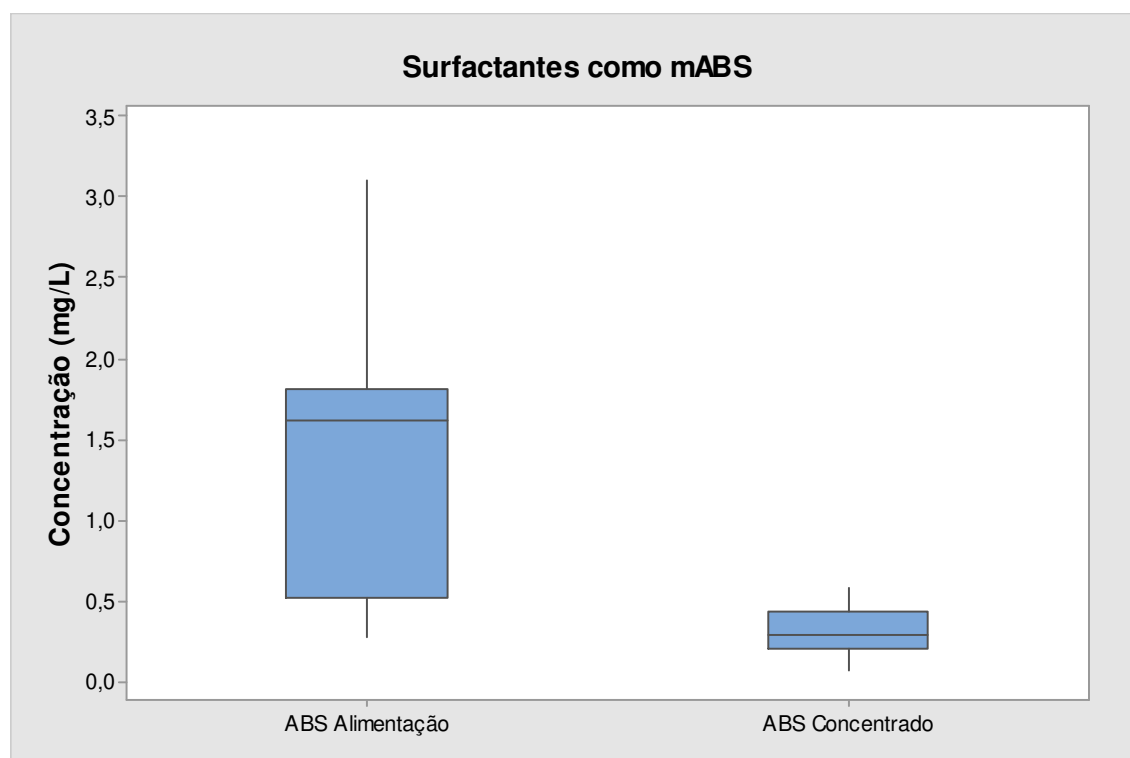


FIGURA 4.10 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE SURFACTANTES (mBAS)

4.3 RESULTADO DO ÍNDICE DE DENSIDADE DE SEDIMENTOS

Os resultados do índice de densidade de sedimentos (SDI) realizado no início da operação para a água de alimentação foi de 7. Outro teste foi realizado com cerca de 2000 horas de operação utilizando a água de alimentação e a água após o filtro GAC, os resultados foram de 6,50 para a primeira e 6,21 para a segunda. Com os valores obtidos de SDI pode-se afirmar que para a utilização de membranas de osmose reversa na ETAI faz-se necessário o uso de pré-tratamento.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO QUÍMICO

Os resultados da caracterização do resíduo proveniente da limpeza química estavam de acordo com a metodologia apresentada no QUADRO 3.2 e podem ser visualizados na TABELA 4.7.

TABELA 4.7 – ANÁLISES DO EFLUENTE APÓS A LIMPEZA QUÍMICA DAS MEMBRANAS

PARÂMETRO	Limpeza Alcalina 550 horas	Limpeza Àcida 550 horas	Limpeza Alcalina 1250 horas	Limpeza Àcida 1250 horas	Unidade	CONAMA 430/2011
Carbono Orgânico	19,7	19,6	12	10	mgL ⁻¹	
Cálcio	8,01	16,03	6	18,3	mgCaCO ₃ . L ⁻¹	
Nitrogênio Kjeldahl total	4,2	1,12	3,64	2,8	mgN.L ⁻¹	
Nitrogênio total	5,04	10,08	4,48	3,36	mgN. L ⁻¹	20
Fósforo total	7,22	1,14	19,2	50,1	mgP.L ⁻¹	
Enxofre	121	47,2	103	49,5	mgS. L ⁻¹	

(continua)

TABELA 4.4 – RESULTADO DAS ANÁLISES PROVENIENTES DA LIMPEZA QUÍMICA

PARÂMETRO	Limpeza Alcalina 550 horas	Limpeza Acida 550 horas	Limpeza Alcalina 1250 horas	Limpeza Acida 1250 horas	Unidade	CONAMA 430/2011
Sódio	489	59,7	432	60,8	mgNa. L ⁻¹	
Potássio	2,77	2,42	234	2,86	mgK. L ⁻¹	
Magnésio	7,8	25,3	7,5	23,4	mgCaCO ₃ . L ⁻¹	
Alumínio	6	3	3,2	3,2	mgL ⁻¹	
Arsênio	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	mg As.L ⁻¹	0,5
Bário total	< 1,0	< 1,0	< 1,0	2,5	mgBa.L ⁻¹	5,0
Cádmio Total	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	mgCd.L ⁻¹	0,2
Cromo total	0,17	0,9	0,1	3,5	mgCr.L ⁻¹	0,1 Cr+3;1,0 Cr+6
Cobre total	0,78	1,04	0,1	0,66	mgCu.L ⁻¹	1,0 – dis- solvido
Ferro total	14,38	41,38	0,84	20,08	mgFe.L ⁻¹	15,0 – dissolvido
Mercúrio Total	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	mgHg.L ⁻¹	0,01
Molibdênio Total	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	mgMo.L ⁻¹	
Níquel Total	0,24	0,5	0,08	1,02	mgNi.L ⁻¹	2,0
Chumbo Total	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,36	mgPb.L ⁻¹	
Selênio Total	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	mgSe. L ⁻¹	0,3
Estanho Total	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	mgSn.L ⁻¹	4,0
Zinco total	0,46	0,63	0,06	0,92	mgZn.L ⁻¹	5,0

4.5 ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE MEMBRANAS PARA O ATENDIMENTO DA ETAI

Caso as membranas utilizadas na unidade piloto instalada na ETAI fossem utilizadas para a implantação de uma unidade de filtração com osmose reversa seriam necessários 5819 módulos de membrana com 7,9m² cada uma, atendendo a capacidade nominal da estação que era cerca de 320 Ls⁻¹.

A quantidade de equipamentos como bombas de alta pressão, bombas de limpeza química, válvulas abre e fecha, solenoides, controladores de pressão, controladoras de vazão, manômetros, rotâmetros, filtros de cartucho e outros elementos que não foram utilizados na unidade piloto irão variar de acordo com o desenho, o modo de operação e funcionamento da planta.

4.6 ALTERNATIVAS PARA O TRATAMENTO DO CONCENTRADO

Como sugestões para o tratamento do concentrado proveniente do PSM pode-se recomendar em primeiro plano a análise da membrana após o uso, que deverá identificar os principais elementos que provocaram a colmatção. Estes elementos podem ser compostos orgânicos, compostos inorgânicos, matéria orgânica e micro-organismos e possuem fundamental importância tanto para a indicação do pré-tratamento mais apropriado, nos produtos químicos a ser utilizados nas limpezas químicas, quanto na orientação da forma e da tecnologia mais propícia para o tratamento do concentrado.

Como pré-tratamento, da água de alimentação pode-se indicar a utilização de membranas de ultrafiltração e nanofiltração antecedendo a membrana de osmose reversa. No entanto devido à alta carga orgânica e inorgânica da água bruta da ETAI pode ser viável a utilização de processos aeróbios para o tratamento da água bruta, combinado ou não com MBR. Os processos anaeróbios para tratamento da água bruta não seriam recomendados, para as lagoas seria necessário grandes áreas e os reatores anaeróbios apesar de produzirem menor quantidade de lodo possuem menor eficiência na remoção de carga orgânica.

Esta forma de tratamento visa aperfeiçoar a eficiência do processo de tratamento de ciclo completo e assim reduzir os custos de pré-tratamento para a membrana após o tratamento de ciclo completo. O esquema simplificado pode ser visualizado na FIGURA 4.11.

A indicação de produtos, dispersantes, para a minimização dos compostos incrustados poderá aumentar a eficiência da limpeza e buscar a redução da degradação da membrana filtrante.

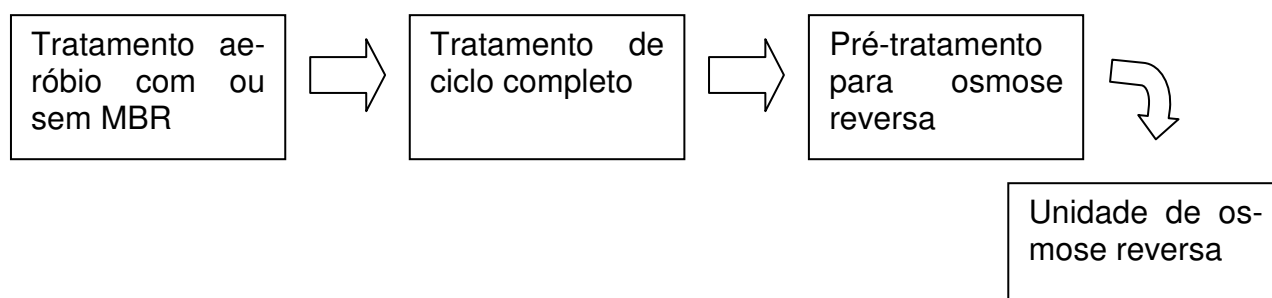


FIGURA 4.11 – ESQUEMA PARA O APERFEIÇOAMENTO DO TRATAMENTO DA ETAI

Quanto à forma e a tecnologia mais apropriada para a concentração do rejeito pode-se basear em dados da literatura e em experimentos locais para a verificação. O concentrado proveniente da osmose reversa poderia destinado ao uso agrícola, à recarga de aquíferos, ao retorno ao mar ou oceanos, a aterros sanitários industriais e ao tratamento em ETE's.

Para o uso agrícola e a recarga de aquíferos deste produto deve se ater aos limites máximos estipulados pelo ministério da agricultura ou da saúde. Caso estes órgãos sejam silentes deve-se buscar referências internacionais de países e instituições que já aplicam com segurança esta forma de destinação do concentrado da osmose reversa.

O retorno aos mares e oceanos bem como o lançamento em corpos hídricos deve respeitar aos parâmetros estabelecidos, hoje em vigor a Resolução CONAMA 357/2005 modificada pela Resolução CONAMA 430/2011.

O envio do concentrado a aterros sanitários industriais deve seguir os protocolos existentes de envios de resíduos químicos a aterros classe I.

Para as ETE's o envio do concentrado do rejeito pode ser uma alternativa viável no Brasil, insta salientar que este produto quando adicionado ao processo biológico de tratamento de efluentes pode encontrar dificuldade na degradação, devido ao esgoto sanitário possuir características que o fazem assemelhar a uma solução tampão.

Outro fator importante antes de considerar esta forma de tratamento seria a redução do volume de concentrado antes de ser enviado a ETE. Se for enviado apenas o concentrado de PSM a uma ETE cerca de $\frac{1}{4}$ do volume tratando pelo PSM seria enviado a ETE. Considerando o concentrado do rejeito, utilizando PSM seguido de eletrodialise este volume poderá ser reduzido para $\frac{1}{16}$ do volume total trata-

do pelo PSM. No caso da ETAI que possui capacidade de tratamento de $1152\text{m}^3\text{h}^{-1}$, o PSM produziria $288\text{m}^3\text{h}^{-1}$ e a utilização de eletrodialise para o tratamento do concentrado iria produzir um volume de $72\text{m}^3\text{h}^{-1}$ para ser encaminhado a ETE.

Transformando estes valores em equivalente populacional o efluente produzido pela eletrodialise equivaleria a uma população de 9.600 habitantes ante a 38.400 habitantes para o tratamento direto do concentrado proveniente do PSM.

Para atender a segunda população a ETE localizada ao lado da ETAI teria que dobrar de tamanho, quatro reatores, já para atender a primeira população a construção de apenas um reator atenderia a demanda. Quanto à eficiência do processo recomenda-se que sejam feitos estudos posteriores uma vez que o processo de tratamento da ETE ser anaeróbio não ocorrendo à remoção de nitrogênio e fósforo.

4.7 MELHORIAS PARA A ETAI

A fim de melhorar o processo de tratamento empregado da ETAI seria necessário o controle rigoroso do processo e dos elementos que o influenciam, pois possuem importância no produto final, à água industrial. As operações unitárias de mistura rápida, floculação, decantação e filtração devem ser controladas e monitoradas em tempo real, para se obter melhor eficiência no processo, com manutenção periódica preditiva e preventiva pode-se contribuir para a obtenção de uma água industrial com melhor qualidade.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados desta pesquisa apontaram para possibilidade de utilização e a viabilidade técnica da tecnologia empregada, no entanto houve considerações importantes que não podem ser desprezadas, devido ao objetivo deste trabalho.

O enfoque deste trabalho foi direcionado no sentido de analisar e caracterizar o concentrado proveniente de uma membrana de osmose reversa bem como o resíduo químico que ela produz. O resíduo químico do processo de separação por membranas, produzido normalmente é coletado e disposto de forma correta, no entanto o concentrado produzido usualmente não é conduzido ao destino adequado.

Os resultados obtidos nos experimentos deste trabalho, caracterização da água de alimentação, do permeado e do concentrado além da caracterização do resíduo químico proveniente da limpeza química em membranas de osmose reversa levaram-nos a concluir que:

- i. O processo de pré-oxidação adotado na ETA-I auxilia na redução da quantidade de matéria orgânica contida na água bruta e contribui para a formação de compostos monovalentes contendo cloro;
- ii. Devido à matéria orgânica e inorgânica presente na água bruta, recomenda-se a avaliação de processo biológico anterior ao tratamento convencional de água, que pode ocupar uma área padrão ou reduzida (small footprint) devido a escassez de área no complexo da ETA-I e da ETE Cachoeira;
- iii. Visando a durabilidade, custo de operação, custo de manutenção e o controle de qualidade da água produzida o uso de pré-tratamento da água industrial é requisito obrigatório para a água de alimentação de sistemas de osmose reversa.
- iv. O pré-tratamento possui a finalidade de adequar a água de alimentação aos parâmetros mínimos requeridos pelo sistema, para não conter: cloro residual livre, SDI, matéria orgânica, sílica, bário e outros compostos. A negligência deste reduz a durabilidade das membranas

de osmose reversa, necessitando de substituição em intervalos de tempo menores, encarecendo o uso desta tecnologia.

- v. Devido à agressividade do cloro e de suas variações, sendo o CRL uma delas, à superfície das membranas este foi neutralizado por meio da filtração com carvão ativado granular e da adição de solução de metabissulfito de sódio a 5%;
- vi. O uso da tecnologia de osmose reversa ocasionou a redução no pH, que pode ser corrigido com a adição de hidróxido de sódio (NaOH) ou outra solução básica;
- vii. Como todo processo de tratamento este também produz efluente, o concentrado, onde estão presentes os sais que pela forma, estrutura ou tamanho não foram capazes de atravessar a membrana filtrante de osmose reversa. Este efluente necessita de tratamento, disposição ou retornar ao início do processo de ciclo completo, a fim de minimizar o impacto deste resíduo sobre o meio ambiente;
- viii. A manutenção das membranas é realizada com limpeza química, isto é, utilizando bases e ácidos específicos para a limpeza do elemento filtrante. O fluido proveniente desta limpeza deve ser tratado e disposto em aterro industrial;
- ix. A vida útil das membranas de osmose reversa pode variar entre 2 e 5 anos dependendo das características da membrana, da qualidade da água de alimentação, da forma e do modo de operação;
- x. A operação deste equipamento requer manutenção preventiva e preditiva, além de treinamento de mão de obra, como operadores e de equipe de manutenção;
- xi. Trata-se de uma tecnologia que necessita de maior investimento quando comparada com outras, no entanto esta diferença de investimento retorna no custo de manutenção, operação e valoração do produto;
- xii. Se o intuito for viabilizar o emprego da tecnologia por membranas na ETA-I, as tarifas aplicadas às empresas consumidoras devem ser revisadas visto o nível de aprimoramento e de qualidade da água produzida, o valor agregado do novo produto e a redução dos custos de pré-tratamento que os consumidores finais irão ter;

- xiii. Esta tecnologia poderá ser utilizada em sistemas subterrâneos para a redução da concentração de íons monovalentes e bivalentes, em especial o Flúor, o Selênio, e o Bário;
- xiv. Para a ETA – I o local para a inserção da membrana deve ser anterior à dosagem de dióxido de cloro, com a finalidade de evitar a oxidação da membrana, protegendo-a. Devido ao atendimento dos parâmetros, com o uso da tecnologia poderá ser realizada mistura da água industrial com a água tratada pela osmose reversa. No entanto, os estudos realizados mostram que em um curto prazo esta mistura não será viável, indicando a necessidade de melhoria do manancial, aprimoramento ou substituição do processo de ciclo completo.
- xv. Os resultados obtidos para a água de alimentação, permeado e concentrado foram tratados e não se pode afirmar a existência de uma relação entre os valores da água de alimentação, do permeado, do concentrado ocorrido no período, pois os valores de correlação (R^2) obtidos foram baixos quando comparados com demais publicações científicas e os valores do coeficiente de variação foram altos indicando majoritariamente alta dispersão entre os dados analisados;
- xvi. a eficiência do tratamento do PSM osmose reversa varia de acordo com a qualidade da água bruta, do processo de tratamento de ciclo completo e as características do concentrado variam de forma independente destas variáveis;
- xvii. verificou-se que os procedimentos de limpeza química contribuem para o processo de “rejuvenescimento” das membranas, no entanto dependendo do grau e tipo do “*fouling*” o emprego apenas da limpeza química não seria suficiente podendo ser indicado testes com anti-incrustantes e dispersantes a fim de evitar o crescimento de micro-organismos e acúmulo de materiais inorgânicos sobre a superfície da membrana;
- xviii. a concentração de metabissulfito de sódio, que reage com o dióxido de cloro, deve ser readequada a variação de concentração de dióxido de cloro e da qualidade da água bruta na ETAI;
- xix. o uso do carvão ativado granular de origem vegetal se comportou de forma distinta do carvão ativado granular de origem animal, como ad-

sorvente, resultou em diferentes curvas de adsorção para o: cloro livre e fluoretos, para os parâmetros cor e turbidez o segundo carvão apresentou melhor eficiência, no entanto com picos durante a operação;

Durante o desenvolvimento deste trabalho foi confirmada a importância de sistemas de dessalinização aplicados ao tratamento de água, sistemas com grande relevância para regiões que apresentam situação de escassez hídrica tanto qualitativa quanto quantitativa.

Parte dos pesquisadores estudados sinalizou preocupação com a eficiência da osmose reversa em especial com a qualidade do permeado. No entanto outros pesquisadores confirmaram a preocupação com o concentrado e o seu destino final. A preocupação com o concentrado vem crescendo nos últimos e recebe mais ou menos importância de acordo com a localização da unidade de tratamento.

As diversas formas de tratamento do concentrado foram apresentadas no referencial teórico e estas podiam ser convencionais ou alternativas. As formas convencionais que foram consideradas pelos pesquisadores seriam o tratamento em torres de adsorção de carvão, floculação com polímeros, recondução ao início do processo, encaminhamento do concentrado a uma ETE, recarga de aquíferos e uso na agricultura. As formas alternativas seriam os tratamentos com o uso de membranas de eletrodialise, oxidação eletrolítica, catálise e ultrassom.

Para trabalhos futuros recomenda-se estudos no tratamento do concentrado e no tratamento dos resíduos químicos gerados pelo processo, visto que a caracterização já ocorreu. As causas do *"fouling"* podem ser investigadas com análise da membrana utilizada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de microscopia eletrônica de transmissão (MET). A primeira técnica pode ampliar a imagem em até 300.000 vezes e a segunda pode verificar os elementos químicos que contribuíram para o entupimento.

Estudos subsequentes podem ser feitos com a membrana a fim de verificar a presença e capacidade de remoção de micropoluentes presentes na água bruta, no permeado e no concentrado.

Neste sentido, o presente trabalho visa contribuir com a literatura para a caracterização do concentrado proveniente de um PSM de osmose reversa, bem como as variáveis que o influenciam.

REFERÊNCIAS

ALLISON, Robert P. Electrodialysis reversal in water reuse applications. **Desalination**, Swansea, v. 1, n. 103, p.11-18, 1995. Mensal.

ALTURKI, Abdulhakeen Ali.; TADKAEW, Nichanan.; MCDONALD, James A.; KHAN, Stuart J.; PRICE, Willian E.; NGHIE, Long D. Combining MBR and NF/RO membrane filtration for the removal of trace organics in indirect potable water reuse applications. **Journal of Membrane Science**, v.365, p.206-215, 2010. Mensal.

ALVES, Isaura Macedo.; FERREIRA, Weruska Brasileiro.; ARAÚJO, Hélvia Waleska Casullo de.; ALMEIDA, Olga Elisabeth Lucena.; BRITTO, Yohanna Jamila Vilar de. **SUSTENTABILIDADE SOCIOAMBIENTAL DOS SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUAS SALOBRAS IMPLANTADOS NO MUNICÍPIO DE BOA VISTA NA REGIÃO SEMIÁRIDA DA PARAÍBA**. In: Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, XII, 2014, Natal – RN Brasil. Anais do XII SIBESA. 2014. Meio digital.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Disponibilidades e demandas de recursos hídricos no Brasil**, 2007. (Caderno de recursos hídricos 2).

ANG, Wui Seng.; ELIMELECH, Menachem. Fatty acid fouling of reverse osmosis membranes: Implications for wastewater reclamation. **Water Research** v. 42 pg. 4393-4403, ago 2008, mensal.

ANTONY A., SUBHI N., HENDERSON R.K., KHAN S.J., STUETZ R.M., LE-CLECH P., CHEN V., and LESLIE G. (2012) Comparison of reverse osmosis, membrane fouling profiles from Australian water recycling plants. **Journal of Membrane Science**, 407–408, 8–16.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS TÉCNICOS TÊXTEIS disponível em: <<http://www.abtt.org.br/boletim/boletim07/reciclagem.htm>> acesso em 20 out 2014

AWWA-APHA-WPCI - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2012). SMWW

BAUEQUIN, Clement.; MAI, Zhaohuan.; RAKIB, Mohammed.; DEGUERRY, Isabelle. Removal of fluorinated surfactants by reverse osmosis – Role of surfactants in membrane fouling. **Journal of Membrane Science**, v. 458, p.111-119, 2014. Mensal.

BIENATI, Barbara et al. Characterization and performance of different types of hollow fibre membranes in a laboratory-scale MBR for the treatment of industrial wastewater. **Desalination**, Swansea, v. 231, p.133-140, 2008. Mensal.

BJERKE, B. Membrane technology and costs: the state of art. **Desalination**, Amsterdam: Elsevier Science Publisher B.V, v. 35, p. 375 – 382, 2002.

BÓDALO-SANTOYO, A; GÓMEZ-CARRASCO, J.L.; GÓMEZ-GÓMEZ, E.; MÁXIMO-MARTÍN, F.; HIDALGO-MONTESINOS, A.M.. Application of reverse osmosis to reduce pollutants present in industrial wastewater. **Desalination**, Swansea, v. 2, n. 155, p.101-108, 2003. Mensal.

BRADLEY, R.; In: AMJAD, Z. **Reverse Osmosis – Membrane Technology**, Water Chemistry and Industrial Applications, Chapman & Hall, Chapter 4, 1992.

BRASIL, Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA 430, 13 de maio de 2011 Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005.

BROWN, Theodore L.; LEMAY, H. Eugene; BURSTEN, Bruce E.. **Química a ciência central**. 9. ed. São Paulo: Editora Prentice Hall, 2005.

CARVALHO, Roberto Bentes de.; RAMOS, Gabriela Marques dos.; BRAGA JÚNIOR, Walter Bom.; BORGES, Cristiano Piacksek. In: **Teste piloto de microfiltração submersa para concentração de vinhoto da indústria de etanol**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, XVII, 2013, Goiânia GO. Anais do XVII CBESA. 2013. Meio digital.

CASANÃS GONZÁLVEZ, Antonio.; ATAZ, Joan Sanz.; CAMPRUBI, Elisenda Taberna.; GALLEGÓ, Leopoldo Guerrero.; DIAZ, Juan Manuel Ortega. **Predicción del ensuciamiento coloidal en sistemas de ósmosis inversa y nanofiltración. Aplicación del índice de atascamiento modificado (MFI)**. Disponível em:<<http://www.veoliawatertechnologies.es/vwst-iberica/ressources/documents/1/19856,AT-PREDICCION-4.pdf>> acesso em 20 set 2014.

CASSINI, Aline Schilling., Estudos de processos alternativos no pré-tratamento de efluentes provenientes da produção de isolados protéicos. Tese de doutorado apresentado ao programa de pós-graduação em engenharia química. Escola de engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), P.195, 2008.

CHERYAN, M. **Ultrafiltration Handbook**, Technomic Publusing Ind., p. 1-2, 1986

COHEN, R. D.; PROBSTEIN, R. F..Colloidal fouling of reverse osmosis membranes. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 114, p. 194-207, 1986. Mensal

CWATER disponível em:< <http://www.swansea.ac.uk/cwater/>> acesso em 20 fev 2014.

DIALYNAS, Emmanuel.; MANTZAVINOS, Dionissios.; DIAMADOPOULOS, Evan. Advanced treatment of the reverse osmosis concentrate produced during reclamation of municipal wastewater. **Water Research** v.42, p.4603-4608, 2008. Mensal.

DI BERNARDO, Luiz.; SABOGAL PAZ, Lyda Patricia. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água** – São Carlos: Editora LDIBE LTDA, 2008. Vol1.

FARIAS, Elizabeth L.; HOWE, Kerry J.; THOMSON, Bruce M. Effect of membrane bioreactor solids retention time on reverse osmosis membrane fouling for wastewater reuse. **Water Research** v.49, p.53-61, 2013. Mensal.

FOUST, Alan S., WENZEL, Leonard A., CLUMP, Curtis W., MAUS, Louis., ANDERSEN, L. Bryce. **Princípios das Operações Unitárias**. Rio de Janeiro – RJ. Guanabara Dois S.A. 1960.

GLATER, Julius. The early history of reverse osmosis membrane development. **Desalination**, Swansea, v. 117, n. 117, p. 297-309, 1998. Mensal.

GREENLEE, Lauren F.; TESTA, Fabrice.; LAWLER, Desmond F.;FREEMAN, Benny D.. The effect of antiscalant addition on calcium carbonate precipitation for a simplifies synthetic brackish water reverse osmosis concentrate. **Water Research**, v.44, p. 2957-2969, 2010. Mensal.

GRUPO ÁGUA disponível em:< http://www.grupo-agua.com/ep_Equipos-Purificadores-Nanofiltracion-Laboratorios.html> acesso em 20 out 2014.

HACH disponível em:< <http://www.hach.com/asset-get.download-en.jsa?id=7639984187>> acesso em: 19 abr 2014.

HO, W.S.Winston.; SIRKAR, Kamalesh K. **Membrane Handbook**, Part I and VI, Springer Science + Business Media, New York, 1992 reimpressão, Netherlands Kluwer Academic Publishers, 2001.

HOUAISS, Antonio.; VILLAR, Mauro de Salles. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2001.

HUANG, R.R.; HOINKIS, J.; HU, Q.; KOCH. F., treatment of dyeing wastewater by fiber membrane microbiological reactor, **Desalination and Water Treatment**, v.11, p. 288-293, 2009. Mensal.

JEPPSEN, P.; SHU, L.; KEIR, G.; JEGATHEESAN, V. Metal recovery from reverse osmosis concentrate. **Journal of Cleaner Production**, v.17, p.703-707, 2009. Mensal.

ITALIAN CERAMIC disponível em:< <http://italian.ceramic-substrate.com/sale-1302021-porous-ceramic-membrane-filter-tube-sic-high-temperature-for-water-treatment.html> >Acesso em: 20 out 2014.

JOO, Sung Hee. Advanced treatment of reverse osmosis concentrate by integrated activated carbon and iron-activated persulfate oxidation. **Water Air Soil Pollut**, 225:2076, 2014. Mensal.

KARKHANECHI, Hamed.; TAKAGI, Ryosuke.; MATSUYAMA, Hideto. Biofouling resistance of reverse osmosis membrane modified with polydopamine. **Desalination**, Swansea, v. 336, n. 336, p.87-96, 2014. Mensal.

LEE, J.J. ; JOHIR K.H.; SHON, H.K.; VIGNESWARAN, S.; KANDASAMY, J.; KIM, C.W.; SHAW, K. Novel pre-treatment method for seawater reverse osmosis: fibre media filtration. **Desalination**, Swansea, v. 250, p. 557-561, 2010. Mensal.

LEE, Y.; ZIMMERMANN, S.G.; KIEU, A.T. and VON GUNTEN, U. Ferrate (Fe(VI)) application for municipal wastewater treatment: A novel process for simultaneous micropollutant oxidation and phosphate removal. **Environmental Science Technology**, v. 43 pg. 3831-3838, 2009. Mensal.

LEIKNES, TorOve., The effect of coupling coagulation and flocculation with membrane filtration in water treatment: A review. **Journal of Environmental Sciences**, v. 21, pg 8-12, 2009. Mensal.

LIN, Yi-Li.; CHIOU, Jheng-Hong.; LEE, Chung-Hsiang. Effect of silica fouling on the removal of pharmaceuticals and personal care products by nanofiltration and reverse osmosis membranes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 277, p. 102-109, 2014. Mensal.

LIU, Meihong.; LÜ, Zhenhua.; CHEN Zhihai.; YU, Sanchuan.; GAO.; Congjie. et al. Comparison of reverse osmosis and nanofiltration membranes in the treatment of biologically treated textile effluent for water reuse. **Desalination**, Swansea, v. 281, p.372-378, 2011. Mensal.

LÓPEZ-RAMÍREZ, Juan A.; OVIEDO, M. D. Coello.; ALONSO, J. M. Quiroga. Comparative studies of reverse osmosis membranes for wastewater reclamation. **Desalination**, Swansea, v. 191, p.137-147, 2006. Mensal.

McCABE. Warren L.; SMITH, Julian Cleveland.; HARRIOTT, Petter. **Unit operations of chemical engineering** 6th ed. McGrawHill, 2001.

MADAENI, S.S.; SAMIEIRAD, S.; Chemical cleaning of reverse osmosis membrane fouled by wastewater. **Desalination**, v.257, p. 80-86, 2010.

MELO, Marcel.; SCHLUTER, Helga.; FERREIRA, Jailton.; MAGDA, Rosana.; JÚNIOR, Agenor.; AQUINO, Oswaldo de. Advanced performance evaluation of a reverse osmosis treatment for oilfield produced water aiming reuse. **Desalination**, Swansea, v. 250, p. 1016-1018, 2010. Mensal.

MEMBRANAS CERÂMICAS disponível em :
<<http://www.likuidnanotek.com/pt/membranas-cartuchos/membranas/membranas-ceramicas/>> acesso em 20 abr 2014.

MEMBRANE SPECIALIST disponível em:<<http://www.membranespecialists.com/global/ptb/choosing-the-right-membrane.php>> acesso em: 21 mai 2014

MILLER, J. E. **Review of water resources and desalination technologies** SANDIA, 2003 acesso em 19/05/2014 disponível em: www.sandia.gov/water/docs/MillerSAND2003_0800.

MOLINA, Verónica García.; CASAÑAS, Antonio. Reverse osmosis, a key technology in combating water scarcity in Spain. **Desalination**, Swansea, v.250, p.950-955, 2010. Mensal.

MOTTA, Albérico Ricardo Passos da.; BORGES, Cristiano Piacksek.; ESQUERRE, Karla Patrícia de Oliveira.; KIPERSTOK, Ascher.; FLORES, Rafaela Oliveira. **Tratamento de efluentes oleosos por processos de separação por membranas visando o reúso: considerações experimentais.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, XVII, 2013, Goiânia GO. Anais do XVII CBESA. 2013. Meio digital.

MULDER, Marcel. **Basic Principle of Membrane Technology**, Netherlands, Kluwer Academic Publishers Groups, 1996.

OLIVEIRA, Taísa Machado de.; BENATTI, Cláudia Telles.; CARVALHO, Roberto Bentes de.; TAVARES, Célia Regina Granhen.; SANTOS, Alessandra Zacarias dos. **Membranas de microfiltração para o tratamento de águas cinzas.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, XVII, 2013, Goiânia GO. Anais do XVII CBESA. 2013. Meio digital.

PARANA, Secretaria estadual de meio ambiente – SEMA. Resolução nº 21/2009 de 22 de abril de 2009 - *Dispõe sobre licenciamento ambiental, estabelece condições e padrões ambientais e dá outras providências, para empreendimentos de saneamento.* Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao_ambiental/Legislacao_estadual/RESOLUCO-CO-ES/RESOLUCAO_SEMA_21_2009_LICENCIAMENTO_PADROES_AMBIENTAIS_SANEAMENTO.pdf> acesso em 20 abr 2014.

PEREIRA, Deybedy Illan dos Santos.; SILVA, Robson Rogaciano Fernandes da.; PESSOA, Julyanna Damasceno.; FERNANDES NETO, José Theódulo.; GUIMARÃES, Bruna da Silveira. **ESTUDO FÍSICO-QUÍMICO DA QUALIDADE DA ÁGUA ORIUNDA DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO LOCALIZADO NO SEMIÁRIDO PARAIBANO.** In: Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, XII, 2014, Natal – RN Brasil. Anais do XII SIBESA. 2014. Meio digital.

PESSOA, Julyanna Damasceno.; PEREIRA, Deybedy Illan dos Santos.; SILVA, Robson Rogaciano Fernandes da.; FERNANDES NETO, José Theódulo.; GUIMARÃES, Bruna da Silveira. **LIMPEZA QUÍMICA NAS MEMBRANAS DE OSMOSE REVERSA E SEUS EFEITOS.** In: Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, XII, 2014, Natal – RN Brasil. Anais do XII SIBESA. 2014. Meio digital.

PAM-MEMBRANAS SELETIVAS disponível em:< <http://www.pam-membranas.com.br/#!microfiltracao/cg64>> acesso em 20 out 2014.

PETROLEO E ENERGIA disponível em: <
<http://www.petroleoenergia.com.br/petroleo/agua-de-injecao-membranas-de-nanofiltracao-removem-sulfato-da-agua-do-mar-para-melhorar-extracao-em-plataformas-offshore/4/>> Acesso em 20 out 2014.

POLLUTION ENGINEERING Aspectos técnicos e operacionais da EPAR Capivari II, ROSSETTO, R.; PAGOTTO JUNIOR, R.; SANTOS, M. A.; GASPERI, R. L. P.; ANDRADE, J. P. M.. Edição jan/mar 2014. Disponível em: <
<http://www.revistape.com.br/artigo-tecnico/aspectos-tecnicos-e-operacionais-da-epar-capivari-ii/2206>> acesso em 10 out 2014.

PRANEETH K.; MANJUNATH D.; SURESCH K.; BHARGAVA, JAMES TARDIO, SRIDHAR S. Economical treatment of reverse osmosis reject of textile industry effluent by electrodialysis-evaporation integrated process. **Desalination**. Swansea. V 333, p. 82-91, 2014. Mensal.

QUEVEDO, Noelia.; SANZ, Joan.; LOBO, Amaya.; TEMPRANO, Javier.; TEJERO, Iñaki. Filtration demonstration plant as reverse osmosis pretreatment in an industrial water treatment plant. **Desalination**, Swansea, v.286, p. 49-55, 2012. Mensal.

QURESHI, Bilas A.; ZUBAIR, Syed M.; Sheikh, Anwar K.; BHUJLE, Aditya; DUBOWSKIY, Steven. Design and performance evaluation of reverse osmosis desalination systems: An emphasis on fouling modeling. **Applied Thermal Engineering**, v. 60, p. 208-217, 2013. Mensal.

ROVANI, Michele Zanin. Estudo da osmose inversa na produção de água desmineralizada para caldeiras. Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Alimentos da UFPR, 71f. Curitiba, 2012.

SANEPAR. Sanepar em Número. Disponível em: <http://site.sanepar.com.br/a-sanepar/sanepar-em-numeros> Acesso em: 28 out 2014.

SCHNEIDER, Ivo André H. **Tratamento primário de um efluente contendo proteínas de soja por flotação por ar dissolvido e sedimentação**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais da UFRGS, 120 p., 1991.

SCHNEIDER, René Peter.; TSUTIYA, Milton Tomuyuki. **Membranas Filtrantes para o Tratamento de Água, Esgoto e Água de Reúso**. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001

SHREVE, R. N.; BRINK JR., J. A. **Indústrias de Processos Químicos**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2008

SILVA, Sidinei Kleber da.; MONTEIRO, Giovanna de Sousa.; SILVA, José Nilton.; FERREIRA, Brasileiro.; FRANÇA, Kepler Borges. Estudo do índice de densidade de sedimentos em águas oriundas de poços tubulares aplicadas a sistemas de dessalinização via osmose inversa. **Centro científico conhecer – Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, Vol. 5, n.8, 2009.

SQUIRE, Deborah. Reverse osmosis concentrate disposal in the UK. **Desalination**, v. 132, p. 47-54, 2000. Mensal.

SUBRAMANI, Arun.; JACANGELO, Joseph G.. Treatment Technologies for reverse osmosis concentrate volume minimization: A review. **Separation and Purification Technology**, v. 122, p. 472-489, 2014. Mensal.

TAHERI, A.H.; SIM, S.T.V.; SIM, L.N.; CHONG, T.H.; KRANTZ, W.B.; FANE, A.G.. Development of a new technique to predict reverse osmosis fouling. **Journal of Membrane Science**, v. 448, p. 12-22, 2013. Mensal.

TAYLOR, J.S., JACOBS, E. P., *Reverse osmosis and nanofiltration*. In: Joel Mallevialle et al. (eds), *Water Treatment Membrane Processes*, pp. 9.1-9.70. McGraw Hill, New York, 1996.

Tecnologia HF– Membranas de fibra oca, disponível em: <<http://www.europashoppinghouse.com.br/filtros-europa/tecnologia-hf.php>> acesso em 20 out 2014.

VARGAS, Gabriela Marques dos Ramos. Investigação de alguns parâmetros operacionais e de rejuvenescimento na performance do processo de osmose reversa. Dissertação de mestrado apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2003.

WEI, Xiaozhu.; GU, Ping.; ZHANG, Guanghui. Reverse osmosis concentrate treatment by a PAC countercurrent four-stage adsorption/MF hybrid process. **Desalination**, Swansea, v.352, p. 18-26, 2014. Mensal.

WEF – Water Environment Federation. **Membrane Systems for Wastewater Treatment**. McGraw-Hill: Alexandria, Virginia, 2006

XU, Pei.; CAPITO, Marissa.; CATH, Tzahi Y. Selective removal of arsenic and monovalent ions from brackish water reverse osmosis concentrate. **Journal of Hazardous Materials**, v. 260, p 885-891, 2013. Mensal.

ZHU, Xiaohua.; ELIMELECH, Manachem. Colloidal fouling of reverse osmosis membranes: Measurements and fouling mechanisms. **Environmental Science & Technology**, v. 31, p.3654-3662, 1997. Mensal

ANEXO

ANEXO 1 – CARACTERISTICAS DA MEMBRANA

Nitto

HYDRANAUTICS

Nitto Group Company

Membrane Element		ESPA1-4040
Performance:	Permeate Flow:	2600 gpd (9.8 m ³ /d)
	Salt Rejection:	99.3 % (99.0 % Minimum)
Type	Configuration:	Spiral Wound
	Membrane Polymer:	Composite Polyamide
	Membrane Active Area:	85 ft ² (7.9m ²)
Application Data*	Maximum Applied Pressure:	600 psig (4.18 MPa)
	Maximum Chlorine Concentration:	< 0.1 PPM
	Maximum Operating Temperature:	113 °F (45 °C)
	pH Range, Continuous (Cleaning):	2-10 (1-12)*
	Maximum Feedwater Turbidity:	1.0 NTU
	Maximum Feedwater SDI (15 mins):	5.0
	Maximum Feed Flow:	18 GPM (3.6 m ³ /h)
	Minimum Ratio of Concentrate to Permeate Flow for any Element:	5:1
	Maximum Pressure Drop for Each Element:	10 psi

* The limitations shown here are for general use. For specific projects, operating at more conservative values may ensure the best performance and longest life of the membrane. See Hydronautics Technical Bulletins for more detail on operation limits, cleaning pH, and cleaning temperatures.

Test Conditions

The stated performance is initial (data taken after 30 minutes of operation), based on the following conditions:

1500 PPM NaCl solution
 150 psi (1.05 MPa) Applied Pressure
 77 °F (25 °C) Operating Temperature
 15% Permeate Recovery
 6.5 - 7.0 pH Range
 (Data taken after 30 minutes of operation)



A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)	Weight, lbs. (kg)
40.0 (1016)	3.95 (100.3)	0.75 (19.1)	8 (3.6)

Core tube extension = 1.85" (46.7 mm)

Notes: Permeate flow for individual elements may vary + or - 15 percent. All membrane elements are supplied with a brine seal, interconnector, and o-rings. Elements are encased in a sealed polyethylene bag containing less than 1% sodium meta-bisulfite solution and 10% preservative glycol and then packaged in a cardboard box.

Hydronautics believes the information and data contained herein to be accurate and useful. The information and data are offered in good faith, but without guarantee, as conditions and methods of use of our products are beyond our control. Hydronautics assumes no liability for results obtained or damages incurred through the application of the presented information and data. It is the user's responsibility to determine the appropriateness of Hydronautics products for the user's specific end uses.

1/15/14

Hydronautics Corporate: 401 Jones Road, Oceanside, CA 92058
 1-800-CPA-PURE Phone: 760-901-2500 Fax: 760-901-2578 info@Hydronautics.com

ANEXO 2 – CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO ATIVADO GRANULAR CARBOMAFRA CARBONO
119**CARVÃO ATIVADO GRANULAR PARA LEITO FILTRANTE**

O carvão ativado é uma forma de carbono puro de grande porosidade, que contém microporos que adsorvem moléculas, contudo sem modificar a composição química do produto tratado. Tem a capacidade de coletar seletivamente gases, líquidos ou impurezas no interior dos seus poros, apresentando portanto um excelente poder de clarificação, desodorização e purificação de líquidos ou gases.

Este tipo de carvão é obtido a partir da queima controlada com baixo teor de oxigênio de certas madeiras, a uma temperatura de 800°C a 1000°C, tomando-se o cuidado de evitar que ocorra a queima total do material de forma a manter sua porosidade. O carvão ativado deverá apresentar uma resistência à abrasão tal que não se perca material após lavagem.

Tipo = Casca de côco

tamanho efetivo = 1,00 mm

coeficiente de uniformidade = < 1,30

diâmetro máximo = 1,68 mm

diâmetro mínimo = 0,84 mm

partículas maiores que 1,68 mm = 3% máx.

partículas menores que 0,84 mm = 5% máx.

diâmetro médio da partícula = 1,2 mm

espessura da camada = 200 cm

dureza do carvão (ASTM) = > 95

densidade aparente = 0,55 g/cm³

área superficial = 900 m²/g

Nº IODO mínimo = 850 mg/g

Nº Fenofaleína mínimo = 800 mg/g

pH = básico

ANEXO 3 – CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO ATIVADO BONECHAR

	BONECHAR CARVÃO ATIVADO DO BRASIL LTDA. Escritório: Rua Pioneira Maria Cavalcanti Ruy, 980 - Parque Industrial II CEP: 87065-090 Fone: (44) 3266-1517 Fax: (44) 3266-3673 MARINGÁ - PARANÁ - BRASIL CNPJ: 80.017.387/0001-28 Inscrição Estadual: 708.00097-33 E-mail: bonechar@bonechar.com.br Site: www.bonechar.com.br	 
---	---	--

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

PROPRIEDADE	ESPECIFICAÇÃO
CARBONO (%)	9 - 11
CINZA SOLÚVEL EM ÁCIDO (%)	<3
FOSFATO TRICÁLCICO (%)	70-76
CARBONATO DE CÁLCIO (%)	-9
SULFATO DE CÁLCIO (%)	0,1-0,2
ÍNDICE DE IODO (mg ⁱ² /g carvão)	150
UMIDADE (%)	5,0
DENSIDADE APARENTE (g/cm ³)	0,60-0,70
pH	BÁSICO
GRANULOMETRIA MESH	20x50
ÁREA SUPERFICIAL TOTAL (m ² /g)	200

The European Standard BS EN 14456:2004 has the status of a British Standard

ANEXO 4 – ALTURAS DIÁRIAS DE PRECIPITAÇÃO – 2014

Alturas diárias de precipitação (mm)												
2014												
Estação:	UNIVERSIDADE		Código:	2549126				Entidade:	AGUASPARANÁ			
	POSITIVO											
Município:	Curitiba		Instalação:	14/04/2000				Extinção:				
Tipo:	P		Bacia:	Iguaçu				Sub-bacia:	1			
Altitude:	930,000 m		Latitude:	25° 26' 58"				Longitude:	49° 21' 23"			
DIA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1	8,7	0,0	0,0	2,7	0,0	11,5	0,0	0,0	-	-	-	-
2	32,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-
3	0,0	0,0	0,0	10,7	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-
4	0,0	0,0	0,0	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-
5	0,0	4,0	23,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-
6	0,0	23,5	5,9	0,0	0,0	55,0	0,0	0,0	-	-	-	-
7	16,9	0,0	0,0	0,0	0,0	75,1	0,0	0,0	-	-	-	-
8	0,0	0,0	1,9	0,0	0,0	59,0	0,0	0,0	-	-	-	-
9	0,0	5,4	0,0	4,8	0,0	8,4	0,0	0,0	-	-	-	-
10	0,0	0,0	16,2	12,8	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-
11	0,0	0,0	7,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-
12	0,0	0,0	6,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-
13	39,0	0,0	23,2	18,8	0,0	0,0	0,0	25,1	-	-	-	-
14	9,7	0,0	15,5	0,0	0,0	0,0	0,0	5,3	-	-	-	-
15	5,5	22,8	0,0	0,0	2,1	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-
16	52,2	6,3	0,0	13,8	1,3	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-
17	1,7	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,2	-	-	-	-
18	0,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	29,0	0,0	-	-	-	-
19	0,0	4,1	8,7	0,0	0,0	15,7	0,0	0,0	-	-	-	-
20	0,0	0,0	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-
21	0,0	0,0	4,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-
22	0,0	0,0	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-
23	0,0	5,5	0,0	0,0	12,3	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-
24	0,0	9,6	0,0	4,3	23,5	0,0	2,0	0,0	-	-	-	-
25	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	5,0	-	-	-	-
26	0,0	0,0	0,0	0,0	33,2	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-
27	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-
28	9,1	44,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-
29	0,0	-	0,0	0,0	0,0	19,1	0,0	0,0	-	-	-	-
30	1,5	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-
31	0,0	-	12,1	-	0,0	-	0,0	0,0	-	-	-	-
Valores mensais												
TOTAL	176,7	131,0	138,1	74,1	72,4	243,8	51,0	53,6	-	-	-	-
TOT.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CONS.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MÁXIMA	52,2	44,5	23,7	18,8	33,2	75,1	29,0	25,1	-	-	-	-
DIAS	10	12	13	8	5	7	3	4	-	-	-	-
CHUVA												
Valores anuais												
243 dias observados			- dias de chuva			Máxima: -			Total: -			

ANEXO 5 – FICHA TÉCNICA – METABISSULFITO DE SÓDIO**Ficha Técnica****METABISSULFITO DE SÓDIO**

Pág. 1/1

Publicação: 14/09/10

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome do produto: metabissulfito de sódio.

Sinônimos: dissulfito de sódio, pirossulfito de sódio.

Fórmula química: $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ **CARACTERÍSTICAS GERAIS**

O metabissulfito de sódio é um agente redutor, podendo ser destacado seu uso como agente antiodor, antioxidante e agente de sulfonação.

Também apresenta um efeito inibidor da proliferação de microorganismos, propriedade que aliada a de ser antioxidante, resulta em sua ampla utilização pelo setor alimentício.

Concentração Mín. 97,00 %

Massa molar 190, g/mol

pH sol. 10 % 4,0 – 4,8

Densidade 1100 – 1200 kg/m³

Solubilidade em água 47,0 g/l

APLICAÇÃO

Como agente redutor é utilizado nos seguintes segmentos:

Caulim: reduz compostos de ferro e material orgânico, proporcionando maior alvura à argila.

Tanino: atua como agente branqueador, reduzindo substâncias coloridas presentes no tanino vegetal.

Fotográfico: atua como um dos constituintes funcionais de banhos de revelação e fixação com a função de proteger a solução contra a oxidação atmosférica.

Farmacêutico: é matéria prima para a redução de dipirona sódica e conservante das mucosas utilizadas na extração de heparina, entre outros usos.

Curtumes: é utilizado na operação de desencalagem, removendo a cal impregnada nas fibras da pele.

Ainda é utilizado nas indústrias têxtil, celulose e química em geral, bem como no tratamento de efluentes.

REGULAMENTAÇÕES LEGAIS

Não possui nenhuma regulamentação específica.

ARMAZENAGEM

Armazenar em lugar seco, bem ventilado, sobre pallets, e afastado de raios solares diretos, calor e materiais incompatíveis.

EMBALAGEM

Sacos a 25 kg

SAÚDE, SEGURANÇA E MEIO AMBIENTE.

Consultar FISPQ do produto.

Departamento Técnico Buschle & Lepper S/A

Eng^o Químico Responsável: Jorge P. Abumanssur

Fone: (47) 3461 2700; Fax: (47) 3461 2770

qualidade@buschle.com.br

ANEXO 6 – FICHA TÉCNICA – ÁCIDO CLORÍDRICO – HCL A 30%**Ficha Técnica****ÁCIDO MURIÁTICO PURO**

Pág. 1/1

Publicação: 08/11/2012

Revisão: 31/01/2013

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome do produto: Ácido Muriático Puro.

Sinônimos: ácido clorídrico, cloreto de hidrogênio.

Fórmula química: HCl.

CARACTERÍSTICAS GERAIS

Líquido fumegante claro e ligeiramente amarelo, de odor pungente e irritante. É produzido pela queima dos gases cloro e hidrogênio seguido de absorção em água.

Determinação Especificação

Concentração (HCl) (%) Mín. 30,0

Densidade 1,150 - 1,200

Aspecto Visual Límpido

APLICAÇÃO

Limpeza e tratamento de metais ferrosos, fabricação de cloretos, flotação e processamento de minérios. Acidificação de poços de petróleo, regeneração de resinas de troca iônica, construção civil, neutralização de efluentes. Indústria alimentícia, têxtil e galvânica. Para dosagens e aplicações específicas, consultar departamento técnico.

REGULAMENTAÇÕES LEGAIS

Produto controlado pela Polícia Federal.

ARMAZENAGEM

Armazenar preferencialmente em área fresca, seca, ventilada, piso impermeável e dotado de diques de contenção. Utilizar tanques de fibra de vidro e polietileno de alta densidade.

EMBALAGEM

- Bombonas de 50 kg;
- Containers de 1150 kg;
- Caminhão tanque a granel.

SAÚDE SEGURANÇA E MEIO AMBIENTE

Consultar FISPQ do produto.

Departamento Técnico - Buschle & Lepper S/A**Químico Responsável: Jorge P. Abumanssur - C.R.Q. 13300282**Fone: (47) 3461 2700 - qualidade@buschle.com.br

ANEXO 7 – FICHA TÉCNICA – HIDRÓXIDO DE SÓDIO – NaOH A 50%**Ficha Técnica
SODA CÁUSTICA LIQUIDA**

Pág. 1/1

Publicação: 14/09/10

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome do produto: Soda Cáustica, Solução 50%.

Sinônimos: Hidróxido de Sódio, Soda Líquida, Lixívia Cáustica.

Fórmula química: NaOH

Classe: 8 - corrosivo

N.º de risco: 80

Número da ONU: 1824

CARACTERÍSTICAS GERAIS

A Soda Cáustica Líquida em solução aquosa a 50%, é produzida por eletrólise da salmoura.

Apresenta-se de forma límpida e incolor, alta viscosidade e elevada alcalinidade.

Composição Mín. 49,00%

Densidade 1,520 – 1,540 g/cm³

Peso Molecular 40,01

Cloretos 1,10 %

Ferro 5 ppm

Solubilidade em água Completa - Exotérmica

APLICAÇÃO

Tratamento de águas e efluentes, indústria têxtil, alimentícia, abrasivos, detergentes, sabões.

Indústria de vidros, couro artificial, refratários, tratamento de celulose. Indústria de plásticos, bebidas, laticínios, etc.

Para dosagens e aplicações específicas, consultar departamento técnico.

REGULAMENTAÇÕES LEGAIS

Produto controlado pelo Departamento da Polícia Federal.

AUP/DOI/DIPOA nº. 2657/2002

ARMAZENAGEM

Armazenar preferencialmente em área fresca, seca, ventilada, piso impermeável e dotado de diques de contenção.

EMBALAGEM

Bombonas de 50 kg

Containeres de 1500 kg

Caminhão tanque a granel

SAÚDE, SEGURANÇA E MEIO AMBIENTE.

Consultar FISPQ do produto.

Departamento Técnico Buschle & Lepper S/A**Engº Químico Responsável: Jorge P. Abumanssur**

Fone: (47) 3461 2700; Fax: (47) 3461 2770

qualidade@buschle.com.br

www.buschle.com.br

APÊNDICE

APÊNDICE 1 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Amostra nº	Alimentação	Permeado	Concentrado
	uS/cm	uS/cm	uS/cm
1	499	28,00	1938
2	409	30,40	1925
3	511	27,50	1950
4	522	29,20	1876
5	513	26,40	1680
6	498	25,20	1772
7	509	35,10	1968
8	491	25,30	1846
9	502	25,40	1615
10	500	29,00	1823
11	506	25,00	1777
12	525	24,50	1745
13	504	23,00	1667
14	514	25,00	1914
15	382	21,00	1370
16	403	22,00	2310
17	452	20,00	1221
18	487	24,60	1520
19	475	23,30	1450
20	473	26,30	1848
21	451	24,00	1607
22	463	22,00	1638
23	493	26,80	1927
24	477	26,00	1874
25	485	25,00	1912
26	481	23,80	2110
27	478	23,20	2260
28	481	22,00	2187
29	495	26,20	2120
30	512	24,00	2195
31	528	34,40	1700
32	550	26,00	1788
33	528	27,50	2350
34	531	26,20	2070
35	549	24,10	2060
36	527	26,60	2460
37	422	21,30	1986
38	402	17,88	1167
39	417	17,42	1784
40	373	23,60	1759
41	346	16,86	1010
42	338	13,92	1561
43	357	14,00	1565
44	371	19,85	1756
45	388	16,20	1240
46	386	14,00	1739
47	287	11,00	1204
48	270	12,15	1247
49	274	13,60	830
50	268	11,00	1123
51	253	10,00	1074
52	273	13,28	1204
53	289	18,53	1231
54	275	13,00	1197
55	295	14,00	1249
56	341	14,60	1334
57	210	14,00	1347
58	233	12,26	1225
59	330	16,69	1350
60	343	16,63	1380
61	355	19,46	1205
62	351	17,47	1284
63	332	18,24	1365
64	307	16,60	1280
65	328	20,30	1302
66	312	16,30	1293
67	397	17,80	1403
68	379	16,51	1733
69	364	17,06	1252
70	408	15,00	1943
71	399	14,11	1925
72	408	19,74	1722
73	404	18,00	1722
74	405	18,75	1834
75	362	19,00	1745
76	366	20,00	1811
77	304	15,66	1326
78	290	14,00	1257
79	255	12,00	1191
80	227	13,07	1055
81	221	12,40	1095
82	218	11,00	1088
83	224	10,00	1100
84	197	10,00	1071
85	192	10,00	1112
86	204	11,83	856
87	222	12,96	1074
88	220	10,50	1049
89	202	9,00	579
90	184	12,01	945
91	187	9,01	1022
92	200	8,00	1040
93	219	11,20	966
94	202	8,94	969
95	231	12,07	1057
96	228	13,45	1121
97	214	10,67	1012

APÊNDICE 1 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CONTINUAÇÃO)

98	231	10,00	1097
99	221	9,00	1111
100	234	22,10	1220
101	242	11,87	1211
102	277	12,80	1243
103	255	14,41	1452
104	244	15,58	990
105	238	13,00	1197
106	255	14,00	1212
107	270	16,72	900
108	277	14,00	1042
109	284	14,00	1415
110	260	13,79	1251
111	273	14,86	1356
112	300	13,80	1040
113	259	14,11	1132
114	265	13,89	1249
115	276	23,50	1409
116	281	17,90	1398
117	286	15,49	1179
118	280	18,20	1140
119	302	16,28	1245
120	288	17,05	1418
121	291	21,00	1102
122	285	26,70	1458
123	295	26,40	1325
124	310	20,10	1299
125	321	38,10	2570
126	345	19,00	1440
127	361	17,00	1473

APÊNDICE 2 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE pH

Amostra nº	pH		
	Alimentação	Permeado	Concentrado
1	6,50	5,50	6,50
2	6,50	5,80	6,80
3	6,50	5,70	6,70
4	6,40	5,58	6,63
5	6,60	5,59	6,68
6	6,50	5,56	6,80
7	6,50	5,58	6,72
8	6,62	5,59	6,76
9	6,60	5,60	6,76
10	6,52	5,63	6,73
11	6,56	5,59	6,80
12	6,54	5,70	6,76
13	6,46	5,66	6,78
14	6,50	5,70	6,80
15	6,20	5,63	6,57
16	6,10	5,66	6,56
17	6,50	5,60	6,60
18	6,60	5,62	6,74
19	6,50	5,61	6,72
20	6,40	5,80	6,70
21	6,40	5,60	6,70
22	6,40	5,70	6,70
23	6,40	5,60	6,72
24	6,40	5,60	6,70
25	6,40	5,50	6,70
26	6,72	5,88	6,85
27	6,60	5,60	6,90
28	6,60	5,60	6,90
29	6,60	5,64	6,89
30	6,50	5,60	6,90
31	6,60	5,66	6,80
32	6,51	5,69	6,80
33	6,50	5,60	6,80
34	6,65	5,64	6,90
35	6,51	5,67	6,81
36	6,50	5,60	6,80
37	6,50	5,59	6,76
38	6,64	5,72	6,59
39	6,53	5,64	6,66
40	6,38	5,50	6,63
41	6,35	5,55	6,35
42	6,49	5,48	6,53
43	6,50	6,60	6,51
44	6,63	5,67	6,62
45	6,57	5,73	6,71

46	6,43	5,58	6,66
47	6,28	5,60	6,48
48	6,55	6,05	6,61
49	6,51	5,50	6,55
50	6,50	5,57	6,70
51	6,50	5,41	6,48
52	6,51	5,56	6,65
53	6,50	5,60	6,70
54	6,50	5,70	6,70
55	6,55	5,46	6,76
56	6,56	5,57	6,90
57	6,50	5,60	6,90
58	6,50	5,70	6,70
59	6,40	5,54	6,82
60	6,40	5,50	6,84
61	6,50	5,60	6,70
62	6,51	5,55	6,76
63	6,40	5,53	6,79
64	6,47	5,50	6,75
65	6,46	5,52	6,71
66	6,53	5,56	6,73
67	7,16	8,95	7,93
68	6,63	6,49	7,69
69	6,57	6,21	7,59
70	6,71	6,66	7,70
71	6,59	6,22	7,18
72	6,85	6,10	7,49
73	6,65	6,53	7,45
74	6,93	6,27	7,47
75	6,80	6,30	7,30
76	6,80	6,20	7,40
77	6,90	6,26	7,10
78	6,80	5,81	7,16
79	6,70	5,12	6,86
80	6,84	6,40	7,05
81	7,00	6,02	6,70
82	6,80	5,90	6,80
83	6,85	6,38	7,04
84	6,43	6,01	6,98
85	6,90	5,90	6,80
86	6,87	6,01	7,04
87	6,76	6,05	6,89
88	6,90	6,02	7,13
89	7,15	5,92	6,79
90	6,60	5,92	6,85
91	6,59	5,92	7,09
92	6,71	5,88	7,06
93	6,76	5,99	6,98
94	6,75	5,85	7,09

APÊNDICE 2 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE pH (CONTINUAÇÃO)

95	7,09	6,05	7,16
96	7,06	6,09	7,18
97	6,78	5,95	7,22
98	6,80	5,70	7,20
99	6,80	5,50	7,00
100	6,77	5,80	7,10
101	6,80	6,40	7,20
102	6,80	6,89	7,30
103	6,80	6,20	7,40
104	6,88	5,29	7,05
105	7,00	6,00	7,16
106	6,80	5,90	7,42
107	6,96	6,35	7,14
108	7,00	6,30	7,15
109	7,15	6,00	7,26
110	6,74	5,80	7,18
111	6,72	5,83	7,35
112	6,91	5,85	7,18
113	6,79	5,77	7,20
114	6,82	5,88	7,35
115	6,91	5,89	5,85
116	6,80	5,91	6,88
117	6,89	5,85	7,16
118	6,91	5,80	7,13
119	6,84	5,86	7,12
120	6,80	5,83	7,22
121	6,82	5,77	7,10
122	6,83	5,93	7,16
123	6,81	5,99	7,11
124	6,85	5,91	7,41
125	6,91	6,20	7,51
126	6,80	6,30	7,40
127	6,80	6,20	7,50

APÊNDICE 3 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE TURBIDEZ

Amostra nº	Turbidez		
	Alimentação	Permeado	Concentrado
	NTU	NTU	NTU
1	3,00	0,37	1,77
2	1,81	0,28	9,18
3	1,83	0,70	5,60
4	3,05	0,45	3,83
5	1,38	0,24	4,18
6	1,75	0,50	1,23
7	1,80	0,58	0,71
8	1,85	0,29	1,80
9	1,81	0,26	0,84
10	1,59	0,31	0,51
11	1,64	0,55	1,01
12	1,56	0,22	0,78
13	1,59	0,29	0,53
14	3,11	0,43	0,88
15	1,67	0,34	2,40
16	1,25	0,35	2,60
17	1,01	0,33	10,90
18	1,31	0,31	1,92
19	1,65	0,29	8,32
20	1,55	0,36	1,17
21	1,92	0,28	0,66
22	1,89	0,24	0,69
23	1,64	0,33	1,15
24	1,62	0,32	0,81
25	1,71	0,33	0,93
26	3,12	0,26	47,60
27	2,27	0,66	14,90
28	1,75	0,47	16,60
29	1,90	0,25	43,20
30	1,70	0,33	6,10
31	1,88	0,33	1,67
32	2,45	0,50	1,90
33	1,76	0,35	0,77
34	2,08	0,22	1,26
35	1,96	0,25	12,80
36	1,57	0,43	1,14
37	4,27	0,22	0,85
38	1,34	0,40	1,31
39	0,93	0,34	0,77
40	1,54	0,97	1,55
41	1,70	0,29	1,32
42	0,47	0,19	4,60
43	0,75	0,21	1,27
44	1,27	0,78	2,66
45	1,69	0,45	6,71
46	1,22	0,35	6,66
47	1,28	0,27	2,99
48	0,86	0,68	0,76
49	0,82	0,18	11,40
50	0,68	0,26	1,06
51	0,86	0,21	1,33
52	0,91	0,31	2,38
53	1,08	0,40	0,93
54	0,98	0,38	1,02
55	0,95	0,34	1,57
56	0,80	0,27	0,52
57	1,28	0,37	1,22
58	1,19	0,39	1,44
59	1,08	0,30	0,70
60	0,97	0,51	0,56
61	0,87	0,38	0,59
62	1,05	0,25	1,10
63	0,88	0,37	0,59
64	0,90	0,30	0,55
65	0,96	0,36	0,65
66	0,88	0,00	0,81
67	1,08	0,27	0,46
68	0,81	0,30	0,78
69	1,15	0,38	0,50
70	1,10	0,40	0,62
71	0,85	0,28	0,47
72	1,16	0,92	4,87
73	1,13	0,47	0,74
74	1,05	0,87	1,14
75	1,24	0,29	0,80
76	1,12	0,21	0,77
77	0,57	0,34	4,56
78	0,78	0,37	3,80
79	1,01	0,44	3,22
80	0,62	0,28	2,35
81	0,75	0,52	1,52
82	0,70	0,57	1,62
83	0,77	0,50	0,85
84	0,79	0,51	0,73
85	0,86	0,49	0,87
86	1,36	0,69	11,00
87	0,82	0,46	0,98
88	1,06	0,50	1,92
89	0,81	0,69	24,70
90	0,34	0,14	2,89
91	0,71	0,28	1,39
92	0,33	0,15	2,55
93	0,39	0,16	2,44
94	0,68	0,12	13,70
95	0,41	0,21	1,06
96	0,55	0,27	1,15

APÊNDICE 3 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE TURBIDEZ (CONTINUAÇÃO)

97	1,03	0,13	31,30
98	0,51	0,16	1,66
99	0,56	0,12	1,78
100	0,63	0,19	1,68
101	0,87	0,23	2,10
102	0,85	1,08	61,80
103	1,86	0,39	5,25
104	0,84	0,25	1,11
105	0,70	0,16	0,96
106	0,88	0,22	1,12
107	0,54	0,22	6,78
108	0,55	0,24	5,98
109	0,84	0,22	1,32
110	0,59	0,19	7,92
111	0,59	0,21	6,72
112	0,45	0,19	1,03
113	0,80	0,18	14,30
114	0,72	0,15	13,10
115	0,74	0,49	2,06
116	0,61	0,38	1,94
117	0,79	0,13	14,80
118	0,52	0,37	1,48
119	0,67	0,21	2,37
120	0,86	0,15	16,80
121	0,66	0,14	3,86
122	1,08	0,47	1,22
123	0,94	0,52	2,15
124	0,95	0,16	1,01
125	1,33	0,45	34,30
126	1,51	0,20	2,67
127	1,22	0,21	0,73

APÊNDICE 4 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE COR

Amostra nº	Cor		
	Alimentação	Permeado	Concentrado
	PbCo	PbCo	PbCo
1	37,00	0,00	10,00
2	46,00	0,00	97,00
3	55,00	14,00	38,00
4	57,00	0,00	34,00
5	58,00	0,00	39,00
6	58,00	3,00	19,00
7	49,00	0,00	31,00
8	50,00	0,00	22,00
9	64,00	0,00	21,00
10	44,00	2,00	15,00
11	62,00	0,00	22,00
12	69,00	0,00	17,00
13	31,00	0,00	14,00
14	59,00	0,00	19,00
15	48,00	0,00	38,00
16	33,00	0,00	41,00
17	29,00	4,00	197,00
18	49,00	4,00	38,00
19	51,00	5,00	195,00
20	63,00	0,00	16,00
21	52,00	0,00	13,00
22	46,00	0,00	11,00
23	51,00	7,00	22,00
24	53,00	0,00	17,00
25	62,00	0,00	19,00
26	79,00	0,00	555,00
27	51,00	1,00	168,00
28	48,00	0,00	187,00
29	50,00	0,00	452,00
30	41,00	0,00	78,00
31	49,00	0,00	40,00
32	66,00	3,00	57,00
33	48,00	0,00	25,00
34	64,00	0,00	33,00
35	66,00	1,00	173,00
36	58,00	0,00	22,00
37	226,00	0,00	21,00
38	43,00	3,00	38,00
39	41,00	0,00	17,00
40	68,00	6,00	30,00
41	69,00	7,00	29,00
42	9,00	1,00	68,00
43	12,00	2,00	19,00
44	20,00	9,00	42,00
45	34,00	0,00	34,00

46	21,00	4,00	21,00
47	13,00	0,00	45,00
48	9,00	0,00	9,00
49	14,00	0,00	197,00
50	10,00	5,00	18,00
51	11,00	7,00	24,00
52	13,00	0,00	35,00
53	16,00	0,00	15,00
54	14,00	0,00	18,00
55	13,00	2,00	18,00
56	10,00	1,00	12,00
57	15,00	2,00	16,00
58	10,00	0,00	19,00
59	17,00	0,00	18,00
60	11,00	0,00	12,00
61	24,00	0,00	3,00
62	23,00	0,00	24,00
63	18,00	4,00	16,00
64	10,00	0,00	11,00
65	15,00	0,00	13,00
66	14,00	0,00	13,00
67	28,00	1,00	4,00
68	24,00	3,00	3,00
69	21,00	0,00	2,00
70	17,00	0,00	0,00
71	19,00	0,00	11,00
72	14,00	2,00	37,00
73	25,00	5,00	14,00
74	17,00	3,00	24,00
75	40,00	1,00	5,00
76	36,00	1,30	6,20
77	16,00	0,00	55,00
78	10,00	4,00	43,00
79	12,00	5,00	51,00
80	10,00	0,00	21,00
81	15,00	0,00	0,00
82	16,00	0,00	5,00
83	8,00	1,00	6,00
84	7,00	2,00	11,00
85	10,00	2,00	14,00
86	11,00	2,00	92,00
87	8,00	1,00	15,00
88	6,00	0,00	13,00
89	7,00	0,00	228,00
90	4,00	1,00	29,00
91	7,00	0,00	14,00
92	13,00	0,00	26,00
93	12,00	0,00	33,00
94	9,00	0,00	149,00

APÊNDICE 4 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE COR (CONTINUAÇÃO)

95	4,00	0,00	13,00
96	6,00	0,00	15,00
97	16,00	1,00	302,00
98	9,00	0,00	20,00
99	8,00	0,00	2,30
100	8,00	0,00	23,00
101	18,00	2,00	20,00
102	8,00	0,00	543,00
103	21,00	5,00	55,00
104	15,00	0,00	17,00
105	18,00	6,00	9,00
106	14,00	8,00	11,00
107	13,00	0,00	80,00
108	13,00	0,00	72,00
109	22,00	10,00	35,00
110	10,00	0,00	90,00
111	11,00	0,00	81,00
112	8,00	0,00	10,00
113	9,00	1,00	152,00
114	8,00	0,00	161,00
115	9,00	4,00	38,00
116	9,00	3,00	41,00
117	11,00	0,00	171,00
118	7,00	1,00	11,00
119	9,00	1,00	12,00
120	14,00	0,00	197,00
121	3,00	0,00	41,00
122	1,00	0,00	1,00
123	8,00	0,00	48,00
124	24,00	4,00	21,00
125	29,00	0,00	379,00
126	29,00	0,00	7,00
127	21,00	0,00	6,00

APÊNDICE 5 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE CLORO RESIDUAL LIVRE

Amostra nº	Cloro Residual Livre		
	Alimentação	Permeado	Concentrado
	mg/L	mg/L	mg/L
1			
2	0,50	0,00	0,00
3	0,40	0,00	0,00
4	0,50	0,00	0,00
5	0,32	0,00	0,00
6	0,38	0,00	0,00
7	0,38	0,00	0,00
8	0,40	0,00	0,00
9	0,50	0,00	0,00
10	0,50	0,00	0,00
11	0,37	0,00	0,00
12	0,40	0,00	0,00
13	0,40	0,00	0,00
14	0,40	0,00	0,00
15	0,50	0,00	0,00
16	0,30	0,00	0,00
17	0,32	0,00	0,00
18	0,50	0,00	0,00
19	0,50	0,00	0,00
20	0,50	0,00	0,00
21	0,50	0,00	0,00
22	0,50	0,00	0,00
23	0,41	0,00	0,00
24	0,50	0,00	0,00
25	0,50	0,00	0,00
26	0,50	0,00	0,00
27	0,34	0,00	0,00
28	0,40	0,00	0,00
29	0,50	0,00	0,00
30	0,50	0,00	0,00
31	0,45	0,00	0,00
32	0,50	0,00	0,00
33	0,50	0,00	0,00
34	0,30	0,00	0,00
35	0,50	0,00	0,00
36	0,41	0,00	0,00
37	1,39	0,00	0,00
38	0,46	0,00	0,00
39	0,40	0,00	0,00
40	0,40	0,00	0,00
41	0,40	0,00	0,00
42	0,30	0,00	0,00
43	0,50	0,00	0,00
44	0,40	0,00	0,00
45	0,40	0,00	0,00
46	0,24	0,00	0,00

47	0,25	0,00	0,00
48	0,30	0,00	0,00
49	0,12	0,00	0,00
50	0,50	0,00	0,00
51	0,40	0,00	0,00
52	0,21	0,00	0,00
53	0,24	0,00	0,00
54	0,30	0,00	0,00
55	0,10	0,00	0,00
56	0,30	0,00	0,00
57	0,30	0,00	0,00
58	0,30	0,00	0,00
59	0,32	0,00	0,00
60	0,25	0,00	0,00
61	0,30	0,00	0,00
62	0,33	0,00	0,00
63	0,35	0,00	0,00
64	0,30	0,00	0,00
65	0,28	0,00	0,00
66	0,31	0,00	0,00
67	0,20	0,00	0,00
68	0,25	0,00	0,00
69	0,19	0,00	0,00
70			
71	0,31	0,00	0,00
72	0,30	0,00	0,00
73	0,25	0,00	0,00
74	0,30	0,00	0,00
75	0,20	0,00	0,00
76	0,30	0,00	0,00
77	0,19	0,00	0,00
78	0,20	0,00	0,00
79	0,30	0,00	0,00
80	0,00	0,00	0,00
81	0,31	0,00	0,00
82	0,30	0,00	0,00
83	0,40	0,00	0,00
84	0,35	0,00	0,00
85	0,32	0,00	0,00
86	0,25	0,00	0,00
87	0,28	0,00	0,00
88	0,31	0,00	0,00
89	0,27	0,00	0,00
90	0,28	0,00	0,00
91	0,31	0,00	0,00
92	0,32	0,00	0,00
93	0,34	0,00	0,00
94	0,26	0,00	0,00
95	0,13	0,00	0,00
96	0,14	0,00	0,00

APÊNDICE 5 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE CLORO RESIDUAL LIVRE (CONTINUAÇÃO)

97	0,26	0,00	0,00
98	0,17	0,00	0,00
99	0,30	0,00	0,00
100	0,30	0,00	0,00
101	0,30	0,00	0,00
102	0,30	0,00	0,00
103	0,25	0,00	0,00
104	0,14	0,00	0,00
105	0,20	0,00	0,00
106	0,30	0,00	0,00
107	0,23	0,00	0,00
108	0,20	0,00	0,00
109	0,00	0,00	0,00
110	0,25	0,00	0,00
111	0,24	0,00	0,00
112	0,30	0,00	0,00
113	0,28	0,00	0,00
114	0,25	0,00	0,00
115	0,33	0,00	0,00
116	0,26	0,00	0,00
117	0,22	0,00	0,00
118	0,15	0,00	0,00
119	0,16	0,00	0,00
120	0,19	0,00	0,00
121	0,13	0,00	0,00
122	0,20	0,00	0,00
123	0,28	0,00	0,00
124	0,20	0,00	0,06
125	0,30	0,00	0,00
126	0,15	0,00	0,00
127	0,20	0,00	0,00

APÊNDICE 6 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE CLORETO

Amostra nº	Cloretos		
	Alimentação	Permeado	Concentrado
	mg/L	mg/L	mg/L
1	50,70	1,35	206,60
2	53,73	1,49	234,10
3	51,48	1,28	201,30
4	60,68	6,70	254,25
5	60,20	5,50	292,00
6	61,70	7,00	279,25
7	76,48	8,50	283,50
8	53,12	8,50	250,25
9	57,75	2,35	195,50
10	56,28	2,45	262,42
11	59,88	5,20	206,50
12	57,50	4,28	219,50
13	59,73	2,25	206,44
14	55,78	2,05	205,69
15	42,75	4,70	164,75
16	43,39	4,75	169,32
17	48,78	1,39	162,30
18	53,80	5,50	174,10
19	73,00	2,00	228,00
20	59,48	1,99	247,42
21	49,23	2,19	194,68
22	50,51	2,43	201,23
23	53,48	3,49	235,17
24	53,42	3,51	238,37
25	54,12	3,81	249,21
26	53,28	3,59	260,42
27	53,98	1,79	274,51
28	53,44	1,88	272,26
29	60,68	3,40	239,98
30	59,54	1,34	251,38
31	59,46	2,15	198,16
32	64,80	1,50	244,75
33	63,48	1,48	239,78
34	68,47	3,55	265,17
35	67,44	2,30	279,40
36	68,99	1,99	252,44
37	54,05	1,60	278,25
38	45,15	1,25	126,75
39	49,48	1,60	191,44
40	43,13	1,03	183,28
41	39,60	0,44	114,50
42	37,73	0,50	173,95
43	39,16	0,88	183,37
44	37,23	0,69	177,21
45	38,93	1,75	144,10
46	38,25	5,35	202,50

47	31,70	3,05	138,25
48	27,49	4,92	122,19
49	30,60	0,00	87,00
50	26,74	0,00	117,46
51	23,51	0,00	109,93
52	31,60	1,55	143,50
53	32,99	0,49	129,96
54	32,63	0,00	131,52
55	34,90	2,65	165,00
56	29,99	0,49	132,45
57	29,72	0,52	135,28
58	29,12	0,13	144,00
59	37,89	1,95	210,42
60	38,49	1,49	222,89
61	39,05	1,78	214,50
62	21,79	2,50	186,44
63	21,99	1,99	195,48
64	37,25	1,80	154,00
65	38,44	2,00	166,00
66	39,49	1,95	159,00
67	38,04	0,75	152,45
68	39,59	1,60	192,94
69	38,50	0,50	129,05
70	44,75	0,00	203,45
71	39,45	0,22	198,44
72	39,85	1,40	182,25
73	45,10	2,70	170,25
74	38,75	1,57	178,25
75	34,08	0,00	175,29
76	35,11	0,00	178,23
77	26,99	0,49	114,56
78	28,09	0,00	145,10
79	23,48	0,00	141,30
80	25,49	1,70	110,47
81	21,99	0,49	102,46
82	19,38	0,00	103,50
83	24,39	1,40	112,50
84	25,95	0,00	75,25
85	17,51	0,00	72,81
86	21,19	1,35	116,21
87	25,09	1,60	122,66
88	26,49	1,49	131,48
89	20,04	0,00	53,73
90	19,49	1,05	72,98
91	20,49	1,49	81,59
92	22,19	0,00	106,16
93	23,41	0,00	113,20
94	23,09	0,85	130,00
95	26,40	2,05	130,50
96	26,15	2,17	132,75

APÊNDICE 6 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE CLORETO (CONTINUAÇÃO)

97	25,59	1,50	116,47
98	22,59	1,78	142,21
99	20,48	1,36	144,11
100	22,65	1,92	139,45
101	22,94	0,00	142,10
102	23,48	0,00	144,23
103	23,36	1,15	188,21
104	24,50	1,40	124,00
105	25,30	1,50	117,20
106	23,12	1,49	123,12
107	28,45	1,90	109,50
108	25,46	0,00	112,35
109	31,95	0,95	140,40
110	28,19	1,75	147,96
111	28,49	1,49	161,96
112	26,74	1,59	109,97
113	27,57	0,45	118,46
114	26,99	0,49	132,49
115	28,99	0,53	134,11
116	31,00	0,44	135,26
117	29,39	0,45	100,47
118	27,25	1,30	128,35
119	27,35	0,98	131,45
120	28,45	1,10	126,56
121	30,60	2,65	126,05
122	32,33	2,74	131,11
123	30,51	1,86	142,61
124	32,40	2,65	148,15
125	34,38	4,14	154,90
126	37,29	1,70	161,39
127	36,99	1,81	174,15

APÊNDICE 7 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE FLUORETO

Amostra nº	Fluoretos		
	Alimentação	Permeado	Concentrado
	mg/L	mg/L	mg/L
1	0,35	0,09	0,97
2	0,30	0,00	0,90
3	0,33	0,08	0,99
4	0,35	0,00	1,10
5	0,39	0,00	0,96
6	0,41	0,00	1,17
7	0,43	0,00	1,26
8	0,39	0,03	0,98
9	0,35	0,02	0,95
10	0,44	0,10	1,12
11	0,30	0,00	0,93
12	0,32	0,00	0,36
13	0,43	0,06	0,91
14	0,39	0,00	0,35
15	0,33	0,04	0,75
16	0,31	0,02	0,71
17	0,37	0,00	0,81
18	0,25	0,02	0,63
19	0,31	0,03	0,74
20	0,26	0,18	1,07
21	0,33	0,00	0,97
22	0,31	0,09	1,12
23	0,39	0,08	0,99
24	0,35	0,00	0,95
25	0,30	0,00	0,91
26	0,27	0,00	0,70
27	0,43	0,06	1,29
28	0,38	0,00	0,91
29	0,17	0,07	0,82
30	0,39	0,10	1,62
31	0,28	0,08	0,68
32	0,37	0,03	1,12
33	0,42	0,06	1,26
34	0,46	0,17	1,31
35	0,43	0,00	0,87
36	0,31	0,00	0,78
37	0,29	0,12	1,06
38	0,25	0,10	0,76
39	0,27	0,01	0,93
40	0,23	0,00	0,88
41	0,21	0,00	0,83
42	0,20	0,00	0,40
43	0,00	0,00	0,00
44	0,12	0,00	0,00
45	0,08	0,00	0,00
46	0,18	0,00	0,68

47	0,24	0,00	0,55
48	0,18	0,00	0,41
49	0,30	0,09	0,19
50	0,15	0,00	0,21
51	0,17	0,00	0,23
52	0,11	0,00	0,49
53	0,25	0,00	0,67
54	0,18	0,00	0,56
55	0,26	0,11	0,77
56	0,34	0,13	0,76
57	0,32	0,00	0,68
58	0,23	0,00	0,29
59	0,24	0,05	0,83
60	0,31	0,03	0,89
61	0,22	0,04	0,81
62	0,27	0,00	0,66
63	0,31	0,00	0,71
64	0,39	0,02	1,01
65	0,23	0,00	0,96
66	0,22	0,00	0,99
67	0,44	0,06	0,51
68	0,38	0,03	0,43
69	0,11	0,00	0,13
70	0,29	0,08	0,35
71	0,26	0,05	0,39
72	0,25	0,00	0,19
73	0,44	0,01	0,35
74	0,23	0,00	0,17
75	0,32	0,00	0,27
76	0,33	0,00	0,28
77	0,22	0,00	0,21
78	0,12	0,00	0,18
79	0,10	0,00	0,15
80	0,09	0,00	0,41
81	0,00	0,00	0,24
82	0,00	0,00	0,12
83	0,09	0,00	0,32
84	0,13	0,00	0,23
85	0,15	0,00	0,20
86	0,14	0,07	0,33
87	0,10	0,00	0,38
88	0,13	0,00	0,48
89	0,00	0,00	0,00
90	0,12	0,00	0,36
91	0,18	0,00	0,43
92	0,16	0,00	0,28
93	0,21	0,00	0,22
94	0,25	0,02	0,42
95	0,10	0,00	0,30
96	0,19	0,00	0,33

APÊNDICE 7 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE FLUORETO (CONTINUAÇÃO)

97	0,40	0,01	0,47
98	0,16	0,00	0,36
99	0,13	0,00	0,29
100	0,19	0,00	0,31
101	0,18	0,00	0,29
102	0,23	0,00	0,33
103	0,12	0,00	0,33
104	0,12	0,00	0,33
105	0,21	0,00	0,42
106	0,30	0,00	0,36
107	0,24	0,08	0,37
108	0,18	0,00	0,38
109	0,14	0,00	0,35
110	0,17	0,01	0,48
111	0,22	0,02	0,55
112	0,19	0,00	0,42
113	0,25	0,00	0,15
114	0,31	0,00	0,21
115	0,28	0,00	0,23
116	0,31	0,00	0,33
117	0,25	0,00	0,46
118	0,30	0,00	0,44
119	0,28	0,00	0,45
120	0,32	0,00	0,49
121	0,24	0,02	0,48
122	0,25	0,02	0,47
123	0,31	0,00	0,59
124	0,32	0,06	0,43
125	0,30	0,00	1,13
126	0,22	0,00	0,51
127	0,23	0,00	0,66

APÊNDICE 8 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE DUREZA

Amostra nº	Dureza		
	Alimentação	Permeado	Concentrado
	mg/L	mg/L	mg/L
1	74,00	3,00	74,00
2	74,00	3,00	300,00
3	76,00	3,20	306,00
4	76,00	4,00	320,00
5	74,00	2,00	230,00
6	73,00	2,00	270,00
7	76,00	3,00	278,00
8	78,00	2,00	290,00
9	74,00	2,00	245,00
10	63,00	1,00	310,00
11	71,00	1,00	290,00
12	71,00	0,00	270,00
13	72,00	0,00	250,00
14	74,00	0,00	272,00
15	62,00	1,00	235,00
16	68,00	1,00	242,00
17	75,00	3,00	203,00
18	78,00	2,00	234,00
19	73,00	3,00	228,00
20	71,00	2,00	289,00
21	74,00	2,00	258,00
22	76,00	2,00	266,00
23	71,00	1,00	298,00
24	74,00	2,00	262,00
25	77,00	3,00	264,00
26	73,00	0,00	330,00
27	70,00	1,00	338,00
28	74,00	2,00	328,00
29	74,00	1,00	270,00
30	73,00	2,00	327,00
31	75,00	1,00	255,00
32	75,00	1,00	260,00
33	77,00	1,00	272,00
34	75,00	1,00	330,00
35	81,00	1,00	350,00
36	79,00	1,00	320,00
37	64,00	2,00	315,00
38	61,00	0,00	215,00
39	73,00	0,00	260,00
40	70,00	0,00	244,00
41	55,00	0,00	170,00
42	64,00	1,00	200,00
43	64,00	0,00	227,00
44	66,00	0,00	231,00
45	60,00	0,00	205,00
46	65,00	1,00	310,00

47	57,00	1,00	235,00
48	50,00	0,00	194,00
49	58,00	1,00	190,00
50	55,00	3,00	170,00
51	53,00	3,00	168,00
52	53,00	1,00	222,00
53	49,00	1,00	214,00
54	52,00	0,00	221,00
55	50,00	0,50	180,00
56			
57			
58			
59			
60			
61			
62			
63			
64			
65			
66			
67			
68			
69			
70			
71			
72			
73			
74			
75	62,00	3,00	370,00
76	66,00	4,00	373,00
77	58,00	3,00	282,00
78	63,00	3,00	195,00
79	52,00	3,00	284,00
80	53,00	1,00	290,00
81	53,00	2,00	292,00
82	54,00	2,00	290,00
83	26,00	1,00	230,00
84	43,00	0,00	260,00
85	41,00	0,00	268,00
86	36,00	0,00	150,00
87	32,00	1,00	198,00
88	35,00	3,00	186,00
89	32,00	0,00	130,00
90	36,00	0,00	160,00
91	38,00	0,00	172,00
92	36,00	0,00	200,00
93	39,00	0,00	188,00
94	36,00	0,00	190,00
95	34,00	0,50	140,00
96	35,00	1,00	143,00

APÊNDICE 8 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE DUREZA (CONTINUAÇÃO)

97	36,00	0,00	230,00
98	35,00	0,00	182,00
99	37,00	0,00	198,00
100	34,00	1,00	179,00
101	35,00	1,00	184,00
102	41,00	3,00	201,00
103	38,00	8,00	226,00
104	41,00	0,50	220,00
105	43,00	1,00	240,00
106	48,00	3,00	266,00
107	46,00	1,00	175,00
108	46,00	1,00	182,00
109	46,00	2,00	260,00
110	47,00	1,00	310,00
111	49,00	1,00	326,00
112	38,00	0,00	160,00
113	46,00	1,00	240,00
114	48,00	1,00	263,00
115	51,00	3,00	271,00
116	53,00	2,00	269,00
117	48,00	2,00	230,00
118	48,00	1,00	220,00
119	47,00	1,00	223,00
120	49,00	1,00	220,00
121	50,00	0,50	250,00
122	52,00	1,00	244,00
123	58,00	0,00	272,00
124	50,00	0,50	245,00
125	52,00	0,00	223,60
126	60,00	4,00	284,00
127	62,00	7,00	291,00

APÊNDICE 9 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE SURFACTANTES

Amostra nº	ABS - Surfactantes		
	Alimentação	Permeado	Concentrado
	mg/L	mg/L	mg/L
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			
35			
36			
37			
38			
39			
40			
41			
42			
43			
44			
45			

46			
47			
48			
49			
50			
51			
52			
53			
54			
55			
56			
57			
58			
59			
60			
61			
62			
63			
64			
65			
66			
67			
68			
69			
70			
71			
72			
73			
74			
75			
76			
77			
78			
79			
80			
81			
82			
83			
84			
85			
86			
87			
88			
89			
90			
91			
92			
93			
94			

APÊNDICE 9 – RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE SURFACTANTES (CONTINUAÇÃO)

95	0,17	0,00	0,11
96			
97			
98	0,28	0,00	0,09
99			
100			
101	0,35	0,00	0,07
102			
103			
104	0,55	0,00	0,25
105			
106			
107	0,35	0,00	0,11
108			
109	0,41	0,00	0,08
110			
111			
112	0,44	0,08	0,17
113			
114			
115	0,67	0,04	0,15
116			
117			
118			
119			
120			
121			
122			
123			
124			
125			
126			
127			