



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**Caracterização e Tratamento de Efluentes para fins de Reuso nas
Áreas de Evaporação e Utilidades na Indústria Cloro Soda**

Mestrando: SIDNEY ROGER BATISTA FREIRE

Orientador: Prof. Dr. LUIZ GONZAGA SALES VASCONCELOS

CAMPINA GRANDE-PB

Fevereiro 2015

SIDNEY ROGER BATISTA FREIRE

**CARACTERIZAÇÃO E TRATAMENTO DE EFLUENTES PARA FINS DE REUSO NAS ÁREAS DE
EVAPORAÇÃO E UTILIDADES NA INDÚSTRIA CLORO SODA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito exigido para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de Concentração: Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Luiz Gonzaga Sales Vasconcelos

Campina Grande

Fevereiro 2015



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFPG

Freire, Sidney Roger Batista.

Caracterização e Tratamento de Efluentes para fins de Reuso nas Áreas
de Evaporação e Utilidades na Indústria Cloro Soda

/ Sidney Roger Batista Freire. — Campina Grande, 2015.

102 f. : il. color

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade
Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia

Referências.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Gonzaga Sales Vasconcelos.

1. Recursos Hídricos. 2. Escassez. 3. Estabilização. I. Título.

CDU -665(043)

SIDNEY ROGER BATISTA FREIRE

**CARACTERIZAÇÃO E TRATAMENTO DE EFLUENTES PARA FINS DE REUSO NAS ÁREAS DE
EVAPORAÇÃO E UTILIDADES NA INDÚSTRIA CLORO SODA**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA EM 17 / 03 / 2015

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Luis Gonzaga Sales Vasconcelos – Orientador



Prof. Dr. José Nilton Silva - Examinador Externo



Prof. Dr. Romildo Pereira Brito - Examinador Interno

Campina Grande

Fevereiro 2015

DEDICATÓRIA

A DEUS, por tudo dou Graças!

Aos meus pais, José Paulo e Fátima , os meus maiores professores.

A minha esposa, Maria Lúcia , sempre ao meu lado nessa caminhada.

Ao meu filho , Vinícius, a realização mais brilhante da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por todas as bênçãos derramadas em minha vida.

Aos meus colegas, pelo grande apoio, pelo grande espírito de grupo que tivemos durante todo o período do curso.

Ao meu orientador, Professor Dr. Luiz Gonzaga Sales Vasconcelos, que sempre esteve disponível nos momentos necessários e que foi fundamental para a estruturação deste trabalho.

À instituição, pela excelente qualidade do curso e da formação.

À BRASKEM, pelo patrocínio financeiro e por acreditar que investir em capacitação é o caminho certo para o crescimento e perpetuidade da empresa.

A empresa Nalco Ecolab, parceira da Braskem, pelas disponibilidades e agilidade nos resultados analíticos das amostras enviadas para seu laboratório.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	4
AGRADECIMENTOS	5
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	12
RESUMO	14
ABSTRACT	15
CAPÍTULO 1	16
1 – INTRODUÇÃO.....	16
1.1– Problema da Pesquisa	20
1.2 – Justificativa	22
1.3 – Objetivos	27
1.3.1– Geral	27
1.3.2 –Específicos	27
CAPÍTULO 2	28
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
2.1 - Gestão Ambiental - Breve panorama das legislações de proteção ambiental com ênfase em recursos hídricos.	28
2.2. Definições de Reuso de Água	30
2.3 - Critérios e padrões de qualidade da água	32
2.3.1 - Água abrandada	33
2.3.2 - Filtração	34
2.4 - Principais parâmetros analisados na água	34
2.4.1 - Oxigênio (DQO)	34
2.4.2 - pH (Potencial Hidrogeniônico)	35
2.4.3 - Cloração	36
2.4.4 - Dureza Total	36
2.4.5 - Turbidez	37

	7
2.4.6 - Cor	38
2.4.7 - Ferro	38
2.4.8 - Alcalinidade total	39
2.4.9 - Dióxido de Carbono	39
2.4.10 - Sulfato	39
2.4.11 - Sílica Solúvel	39
2.4.12 - Cloreto	40
2.4.13 - Cloro	40
2.4.14 - Temperatura	42
2.4.15 - Condutividade Elétrica	42
2.4.16 - Sólidos Totais	43
2.5 - 4R's (Reduzir, Repensar, Reutilizar e Reciclar)	43
2.6 - Avaliação de riscos do reuso	44
2.7 - Osmose Reversa	45
2.7.1 - Processo de Operação da Membrana	46
2.7.2 - Pré Tratamento	50
2.8 - Ciclo de Concentração	51
2.9 - Incrustação	55
2.10 - Torre de Resfriamento	57
CAPÍTULO 3	59
3 – METODOLOGIA.....	59
3.1 - Infra-estrutura	59
3.2 – Vazão de Recirculação da Torre de Resfriamento	59
3.3 – Balanço Global de Massa	61
3.4 – Ciclo de Concentração	64
3.5- Caracterização da água de reposição	64
3.6- Caracterização da Corrente da purga da Torre de Resfriamento	65
3.7- Caracterização baseando-se no Índice de Langelier e Ryznar	71

	8
3.8- Recursos utilizados:	74
3.9- Resultados e Discussões:	76
3.9.1- Resultados Analíticos da Osmose Reversa 1	76
3.10 - Caracterização da Membrana	85
3.10.1 - Especificação da Membrana pelo Fabricante	85
3.10.2 - Limites de Operação Especificado na Membrana	86
3.11 - Análises Físico-Químicas - Método Analítico realizado no plano de teste	86
3.12 - Cálculo da Eficiência de Retenção dos Contaminantes	90
3.13 - Análises dos Resultados	90
CONCLUSÕES	93
RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES	95
REFERÊNCIAS	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo nos principais países (em litros per capita por dia)	16
Figura 2 - Distribuição de água doce no continente americano	17
Figura 3 - Distribuição de água potável no planeta	18
Figura 4 - Consumo de água em algumas atividades	18
Figura 5 - Distribuição desigual de água no Brasil	19
Figura 6 - Distribuição de água - Principais atividades produtivas.....	19
Figura 7 – Mapa de isoteores de cloreto em 2011	23
Figura 8 – Mapa de isoteores de cloreto em 2012.....	24
Figura 9 – Mapa de isoteores cloreto em 2013.....	25
Figura 10 - Ciclo Hidrológico da Água	31
Figura 11 - Efeito do pH na dissociação do ácido hipocloroso	41
Figura 12 - Classificações dos Sólidos Totais.....	43
Figura 13 – Princípio operação sistema de osmose reversa	45
Figura 14 – Tipos de Filtrações x dimensões de partículas.....	47
Figura 15 - Membrana Osmótica Modulo em Espiral	48
Figura 16 - Representação esquemática dos possíveis arranjos par aos sistemas de osmose reversa.....	49
Figura 17 - Torre com tiragem mecânica induzida em corrente cruzada	54
Figura 18 - Medição de vazão de água de resfriamento	60
Figura 19 - Layout dos pontos de medição de vazão de água de resfriamento	60
Figura 20: Balanço de Massa Global de Água	61
Figura 21: Balanço de Massa Global da Torre de Resfriamento.....	62
Figura 22 - Cloreto na água de reposição (Período de 2001 a 2014)	65
Figura 23 - Resultado da análise de pH.....	66
Figura 24 - Resultado da análise de Condutvidade	66
Figura 25 - Resultado da análise de dureza	67
Figura 26 - Resultado da análise de cloreto.....	67
Figura 27 - Resultado da análise de DQO	68
Figura 28 - Resultado da análise de Sílica.....	68
Figura 29 - Boxplot das Análises de Alcalinidade Total.....	71
Figura 30 - Boxplot das Análises de Dureza Cálcica	72
Figura 31 - Boxplot das Análises de pH.....	72
Figura 32 - Tabela do Índice de Langelier	73

Figura 33 - Tabela do Índice de Ryznar	74
Figura 34 - Cartucho com a membrana	74
Figura 35 – Planta Piloto Osmose Reversa	75
Figura 36 – Fluxograma Osmose Reversa.....	75
Figura 37 – Painel de Acompanhamento Planta Piloto de Osmose Reversa.....	76
Figura 38 – Resultados Gráficos das análises de pH da entrada, permeado e rejeito	80
Figura 39 – Resultados Gráficos das análises de Condutividade da entrada, permeado e rejeito	81
Figura 40 – Resultados Gráficos das análises de Cloreto da entrada, permeado e rejeito	81
Figura 41 – Resultados Gráficos das análises de Dureza Total da entrada, permeado e rejeito	82
Figura 42 – Resultados Gráficos das análises de Dureza Ca da entrada, permeado e rejeito	82
Figura 43 – Resultados Gráficos das análises de Dureza Mg da entrada, permeado e rejeito	83
Figura 44 – Resultados Gráficos das análises de Alcalinidade da entrada, permeado e rejeito	83
Figura 45 – Resultados Gráficos das análises de Sólidos Solúveis da entrada, permeado e rejeito	84
Figura 46 – Resultados Gráficos das análises de Silica da entrada, permeado e rejeito ...	84
Figura 47 – Resultados Gráficos das análises de Ferro da entrada, permeado e rejeito....	85
Figura 48 - Amostras da alimentação, rejeito e permeado - Aparência incolor e inodoro	91
Figura 49 - Representação esquemática de um sistema de OR em processo de batelada	95
Figura 50 - Representação esquemática de um sistema de OR com duplo estágio para recuperação do rejeito.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos de empresas que praticam reuso	21
Tabela 2 - Demanda de água por segmento.....	21
Tabela 3. Soluções indicadoras de pH.....	35
Tabela 4. Grau de dureza das águas	37
Tabela 5: Recomendações para o uso das membranas de osmose reversa.....	48
Tabela 6: Aplicação das membranas de Osmose Reversa.....	50
Tabela 7: Estimativa de arrastes em água de resfriamento, baseado na vazão de recirculação.....	53
Tabela 8: Ciclo de concentração x economia de água de alimentação (make-up).....	55
Tabela 9: Correspondência entre o IR e a tendência à incrustação ou à agressividade.....	57
Tabela 10 - Etapas do projeto de reuso de água na indústria	59
Tabela 11 – Consumo de água na em uma industrial de Cloro Soda	61
Tabela 12 - Parâmetros físico-químico realizado na torre de resfriamento em 2014.....	65
Tabela 13 - Parâmetros físico-químico dos limites e make-up da TR1.....	69
Tabela 14. Parâmetros físico-químico	70
Tabela 15. Fatores a observar quanto à qualidade da água	70
Tabela 16 - Resultado da primeira análise do plano de amostragem para teste de reuso da torre de resfriamento.....	77
Tabela 17 - Resultado da segunda análise do plano de amostragem para teste de reuso da torre de resfriamento.....	77
Tabela 18 - Resultado da terceira análise do plano de amostragem para teste de reuso da torre de resfriamento.....	78
Tabela 19 - Resultado da quarta análise do plano de amostragem para teste de reuso da torre de resfriamento.....	79
Tabela 20 - Resultado da quinta análise do plano de amostragem para teste de reuso da torre de resfriamento.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - Área

a.C - Antes de Cristo

ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA - Agência Nacional de Águas

ARRASTE - Água que deixa a torre arrastada pela corrente de ar

Art - Artigo

AT - Alcalinidade Total

BLOWDOWN - é um termo utilizado para identificar a água que é drenada da bacia da torre de resfriamento, visando reduzir o acúmulo de contaminantes na água circulante

CC Ciclo de Concentração

CETESB Companhia e Tecnologia de Saneamento Ambiental

CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente

CS1-AL - Unidade de Cloro Soda Alagoas - Braskem

DQO- Demanda Química de Oxigênio

EDTA - (ácido etilenodiamino tetracético) É um quelante ou sequestrante de metais

EFEITO FLASH - Processo que a ebulição de um líquido dá-se apenas pela redução da pressão, mantendo-se a temperatura constante

EGTA - (ácido tetracético de etileno-glicol) É um ácido aminopolicarboxílico, um agente quelante

Fluxograma - É um tipo de diagrama e pode ser entendido como uma representação esquemática de um processo

Fouling - É produzido no interior da membrana, pela associação de sólidos suspensos e material biológico

H₂ - Gás Hidrogênio

H₂O - Água

IL- Índice Langelier

IP - Índice de estabilidade de Pockorius

IR - Índice de estabilidade de Ryznar

LD - Limite de Detecção

Make-up – Água de reposição para a torre de resfriamento

mV - milivoltagem

Na₂SO₄ - Sulfato de Sódio

NaCl - Cloreto de Sódio

NaClO - Hipoclorito de Sódio

NaClO₃ - Clorato de Sódio

NaOH - Hidróxido de Sódio (Soda Cáustica)

NBR Norma Brasileira Regulamentadora

NTU - Nephelometric Turbidity Unit;

O₂ - Oxigênio

ONS - Organização Nacional de Saúde

OR - Osmose Reversa

Planta Piloto - É um pequeno sistema de processamento químico, uma planta de processo em escala reduzida

PDI - Diferencial de indicação de pressão

pH - Potencial Hidrogeniônico

PPGEQ - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

SISNAMA - Sistema Nacional do Meio Ambiente

SLIME - Processo de proliferação de microorganismos.

SRHU - Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano

SST - Sólidos Solúveis Totais

STD - Sólidos Totais Dissolvidos

Zn- Zinco

RESUMO

O atual cenário de crescente preocupação com a escassez dos recursos hídricos e seus efeitos para o futuro, fez com que as empresas começassem a perceber que ter seus objetivos alinhados com as questões ambientais, minimizaria perdas e a prática de reaproveitamento, poderia ser um diferencial competitivo, e também, a longo prazo, uma questão de sobrevivência. É de conhecimento de todos que a questão ambiental vem influenciando cada vez mais no desempenho sócio-econômico de qualquer empresa. Atualmente este fato pode ser evidenciado pela criação de indicadores com metas estabelecidas, que são avaliados periodicamente, para o acompanhamento de seu desempenho. Hoje é reconhecido que a água é um recurso além de escasso, primordial, para os processos industriais, que requerem uma quantidade significativa e relativamente alta, assim como uma qualidade de água satisfatória para continuidade do negócio. Dessa forma, as empresas tentam identificar novas formas de melhorar seu desempenho de sustentabilidade, utilizando menos recursos e criando mais alternativas de reutilização. Outro fator que merece destaque, é o descuido do homem na utilização deste recurso tão importante para a vida, que vem sendo observado e sentido em todo o mundo. Os objetivos deste trabalho são: a caracterização das correntes de água e a discussão de possíveis soluções para minimização do consumo de água, além de incorporar nas pessoas, a importância da água na questão de crescimento, sobrevivência e perpetuidade do negócio. Todos os fatores avaliados permitiram concluir que é possível reutilizar as correntes que antes eram consideradas efluentes e agora tem a possibilidade de não ser mais, tendo como resultado a redução do consumo de água e de efluentes.

Palavras chave: 1. Água 2. Meio Ambiente 3. Desenvolvimento Sustentável 4. Negócio

ABSTRACT

The current worldwide growing concern about the water shortages and its impacts on the future has made the companies to realize that to have their goals aligned to the issues of minimizing losses, and apply methods of reuse, can be a competitive advantage in short term and a matter of survival in long term. Nowadays, it is well known that environmental issues are influencing more and more the socio-economic performance of any company. This is evidenced by the creation of KPIs at Braskem called eco-indicators, environmental indicators whose targets are evaluated monthly to track their performance. This work was focused on the eco-indicator "water". Today it is recognized that water is a scarce natural resource and essential for industrial processes that require significant amount of good quality water for business continuity. Therefore, companies are seeking ways to improve their sustainability performance, consuming less natural resource and creating more alternatives for reuse. fewer emissions, there are several challenges to be faced. Another factor observed and felt worldwide is the man's carelessness in the utilization of this so important resource for life. The objectives of this work are: To characterize water streams and discuss possible alternatives to minimize water consumption; and also convince the employees that water is a matter of growth, survival and continuation of the business. According to the undertaken studies we can say that it is possible to reuse some streams that have been considered effluent so far, thus reducing water consumption and effluent generation.

Keywords: 1. Water 2. Environment 3. Sustainable Development 4. Business

CAPÍTULO 1

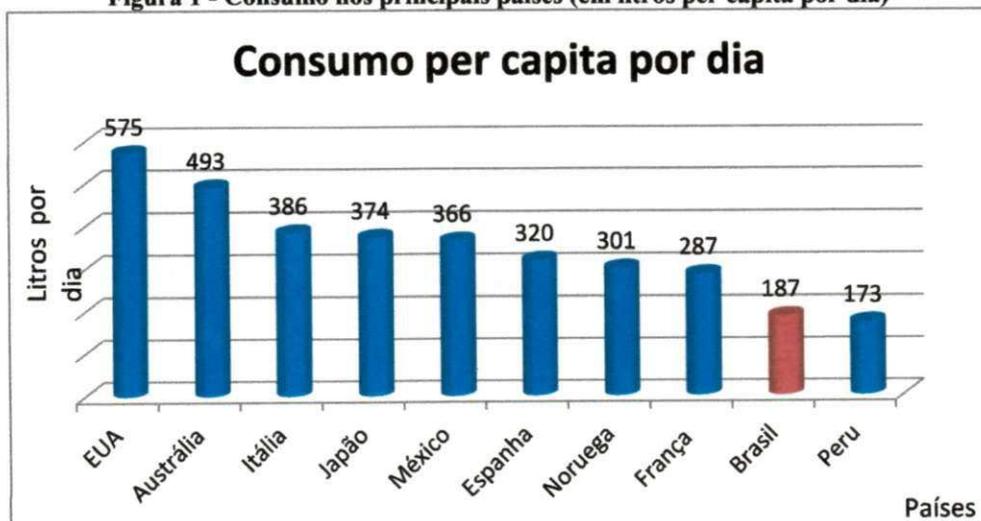
1 – INTRODUÇÃO

A água é uma substância essencial à vida, e como tal, está presente no nosso cotidiano, quer seja no consumo humano, no agronegócio, como matéria-prima, na indústria ou como força motriz na geração de energia elétrica. Com tantas utilidades, o suprimento de água doce, na quantidade e qualidade desejadas, tornou-se um grande desafio para a humanidade no século 21 (SILVA, 2004).

O urbanista americano, Michael Klare, autor do livro *The Race for What's*, sobre disputas por recursos naturais: " A água virou o novo petróleo, causa de batalhas ferrenhas. Guerras que aumentarão em número e dimensão, já que a demanda cresce, enquanto a oferta diminui". Na Figura 1 mostra o consumo per capita por dia de alguns países, onde o Brasil está na 9º colocação dos maiores consumos de água. Além do desperdício existente, há um outro fator que o planeta está passando, as mudanças climáticas; a temperatura elevou cerca de 0,85 grau ,e na última década ,a uma taxa média de 0,05 grau. Não é pouco, considerando que o clima global era estável. Atualmente no Ártico o aquecimento ocorre em ritmo duas vezes maior.

A vida no planeta terra só existe por haver aqui água líquida, em abundância, isso porque o planeta fica na distância ideal do maior astro, o sol. Caso fosse próximo ao sol demais, teria água evaporada, estado gasoso e longe demais, água congelada, ou seja, estado sólido.

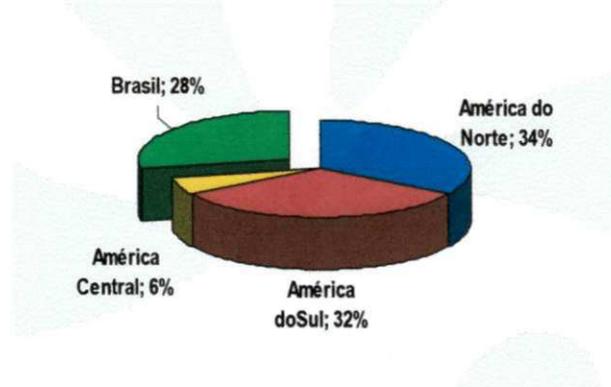
Figura 1 - Consumo nos principais países (em litros per capita por dia)



(Fonte: Revista Veja, 2014)

Estamos observando que a escassez de água não é uma questão exclusiva de quem mora em regiões desérticas. Neste século, a água está se tornando a questão central por trás dos grandes conflitos no planeta. O Brasil é um país privilegiado num planeta sedento, possui cerca de 12% de toda a água doce que circula pela superfície da Terra, se for comparado apenas o continente americano, o Brasil está com 28% da água doce existente neste continente, conforme mostra o Figura 2.

Figura 2 - Distribuição de água doce no continente americano



(Fonte:Unesco 2006)

A escassez crescente tornará inevitável estabelecer um preço para a água que vem dos cursos naturais, como rios e lagos. Há casos que as empresas pagam para retirar água dos rios, assim como também, para devolvê-la à rede de esgoto; em alguns condomínios, em Maceió, Alagoas, esta prática já está acontecendo. Quanto mais poluída estiver a água, maior o preço, com isso incentivou a implantação de métodos mais eficientes para usar o recurso de forma sustentável, diminuindo o consumo e aumentando o índice de reutilização de água. Conforme mostra a Figura 3 a escassez de água potável em alguns continentes, como por exemplo na África, 44 % da população não tem água potável, é essencial cuidar da gestão da água para garantir os recursos necessários ao crescimento sócio-econômico.

Figura 3 - Distribuição de água potável no planeta



(Fonte: Revista Veja,2014)

"A água está na origem de todas as coisas", dizia Tales de Mileto (624-546 a.C) e ainda tratamos com desdém o que temos. Além de desperdiçar, somos descuidados com nossos recursos hídricos. No entanto, há soluções, uma delas é elaboração de novas políticas públicas, e a outra, é a mudança de hábitos do cotidiano. A Figura 4 detalha o consumo de água em algumas atividades de rotina, porém, as duas soluções descritas acima, precisam estar juntas para que o resultado seja concreto e duradouro.

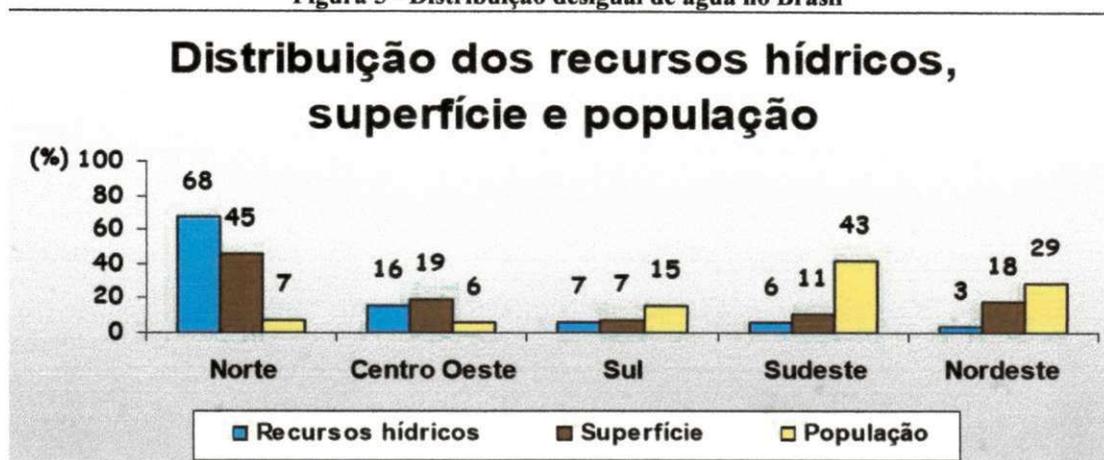
Figura 4 - Consumo de água em algumas atividades



(Fonte: Revista Veja,2014)

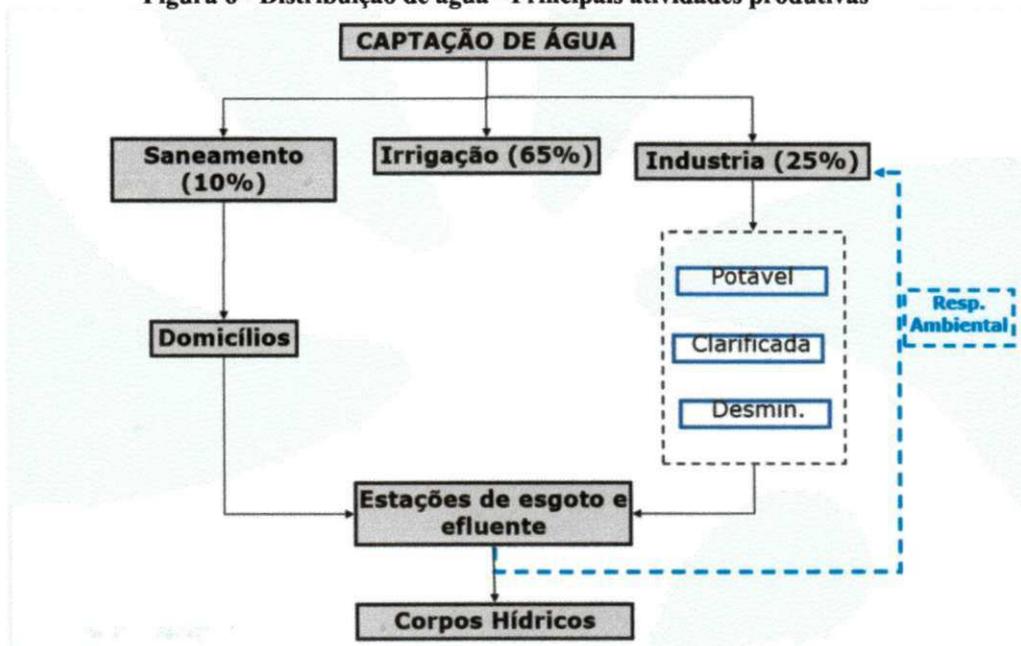
No Brasil, a distribuição dos recursos hídricos é bastante desigual, ver Figura 5, por isso, em algumas regiões, a escassez é bem mais significativa, é o caso do nordeste, que a disponibilidade de recursos hídricos é baixo, sendo desproporcional a população e superfície.

Figura 5 - Distribuição desigual de água no Brasil



A Figura 6 mostra a distribuição nas principais atividades produtivas no país, onde a irrigação absorve cerca de 65% de toda a água captada e a indústria 25%.

Figura 6 - Distribuição de água - Principais atividades produtivas



1.1– Problema da Pesquisa

"Nosso país é exemplo mundial, comparado com os demais em descaso na administração de seus recursos. Em todo país, desperdiçam-se cerca de 40% da água captada, que vaza por tubulações precárias, manutenção quase não existe, é a cultura do brasileiro. O descaso, porém, não é exclusivamente do Brasil, países como China e Índia descuidam de suas reservas também. A junção desses descuido com a utilização da água, o planeta vê dezenas de trilhões de litros desperdiçados, onde se não houvesse tal desperdício, haveria água de sobra" (revista Veja, 2014, nº 2397 - texto adaptado)

"O termo água de reuso passou a ser utilizado com maior frequência na década de 1980, quando as águas de abastecimento foram se tornando cada vez mais caras, onerando o produto final quando usadas no processo de fabricação. Como o preço do produto, ao lado de sua qualidade, é fator determinante para o sucesso de uma empresa, a indústria passou a procurar, dentro de suas próprias plantas, a solução para o problema, tentando reaproveitar ao máximo seus próprios efluentes. Uma gama de processos foi desenvolvida visando a redução de custos, tendo obtido melhores resultados aqueles que utilizaram com sucesso esse métodos" (MANCUSO; SANTOS, 2003).

Conforme Ornellas, 2004 "Sempre que a água com qualidade requerida para determinado uso torna-se um recurso escasso, é buscada, de forma sistematizada ou não, alternativa de suprimento ou repressão do consumo, para que seja restabelecido o equilíbrio oferta/demanda".

"O reuso de água consiste na recuperação de efluentes de modo a utilizá-las em aplicações menos exigentes. Desta forma o ciclo hídrico tem sua escala diminuída em favor do balanço energético" (METCALF; EDDY, 2003).

Uma visão moderna com relação a efluentes industriais não deve estar baseada no tratamento do efluente final e sim na busca constante da redução de resíduos gerados através de tecnologias limpas (FARIA,2004)

O Ministério do Meio Ambiente destaca que apesar de dois terços da superfície da Terra ser coberta por água, menos de 1% dessa água é doce, sendo o restante impróprio para consumo ou o custo para sua exploração é fator limitante.

A Tabela 1 exemplifica algumas empresas que praticam reuso em seus processos industriais, onde cada vez mais há um aumento de adesão com a finalidade de um crescimento sustentável tendo foco para as gerações futuras.

Tabela 1 - Modelos de empresas que praticam reuso

Indústrias que praticam reuso com reaproveitamento de 40 a 80% de água	
3M do Brasil	AmBev
Brastemp	Continental
Dow Química	Elequeiroz
Ford	Kodak
Natura	Pólo Petroquímico de SP
Replan/Revap	Rhodia
Volkswagen	Votorantin

Fonte: CIRRA, 2007

As indústrias consomem um total de 25% de toda a água captada, conforme mostrou a Figura 6, entretanto quando avaliamos por segmento industrial, destacam-se pelo consumo de água, como mostra a Tabela 2, o segmento química e petroquímica que retém cerca de 38% do total da água destinada para a indústria.

Tabela 2 - Demanda de água por segmento

SEGMENTO	DEMANDA DE ÁGUA %
QUÍMICA E PETROQUÍMICA	38
ALIMENTOS	27
SIDERURGIA	12
OUTROS	23

Fonte: FIESP/CIESP, 2006

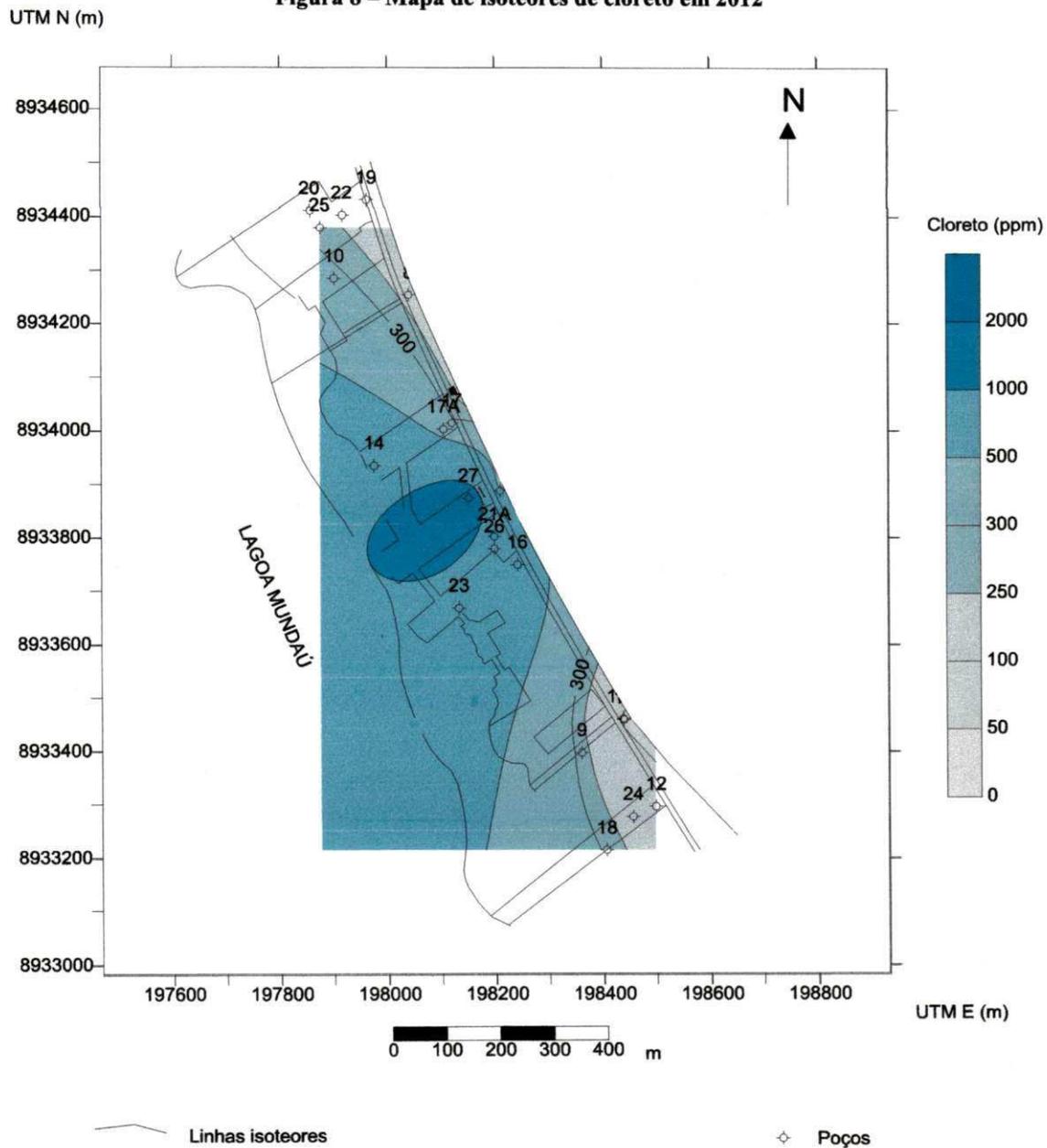
1.2 – Justificativa

As exigências cada vez mais restritivas na legislação ambiental, os custos associados aos processos de tratamento de efluentes, a atual cobrança pelo uso da água, a disponibilidade hídrica limitada e de má qualidade em conjunto com a busca pela auto-suficiência estão promovendo em escala crescente o surgimento de projetos de reuso de água na indústria.

O Aquífero Marituba está situado dentro da Bacia Sedimentar de Alagoas na região costeira do Estado, exercendo um papel importante no sistema de abastecimento de água urbano e industrial do município de Maceió. A crescente demanda por água registrada nas últimas décadas em Maceió, impulsionada pelo crescimento populacional, elevou de forma exponencial o volume de água captado neste aquífero (SILVA, 2004).

O efeito do aumento de exploração no aquífero Marituba modificou o equilíbrio hidráulico da água, permitindo o avanço da interface água doce/salgada no continente, fato percebido sob a forma de salinização na década de 90. Desde então, mudanças significativas na qualidade da água foram evidenciadas na bateria de poços do Mutange, por meio de alterações nas concentrações dos íons de sais de cloreto, magnésio, sulfato e cálcio. Nas Figuras 7, 8 e 9 destacam-se os mapas de isotores de cloretos, onde mostram a elevação nos teores de cloretos na água, de maneira que em 2013 alcançam picos de até 3000 ppm, tornando impróprio para água potável, que exige 250 ppm e alguns processos industriais.

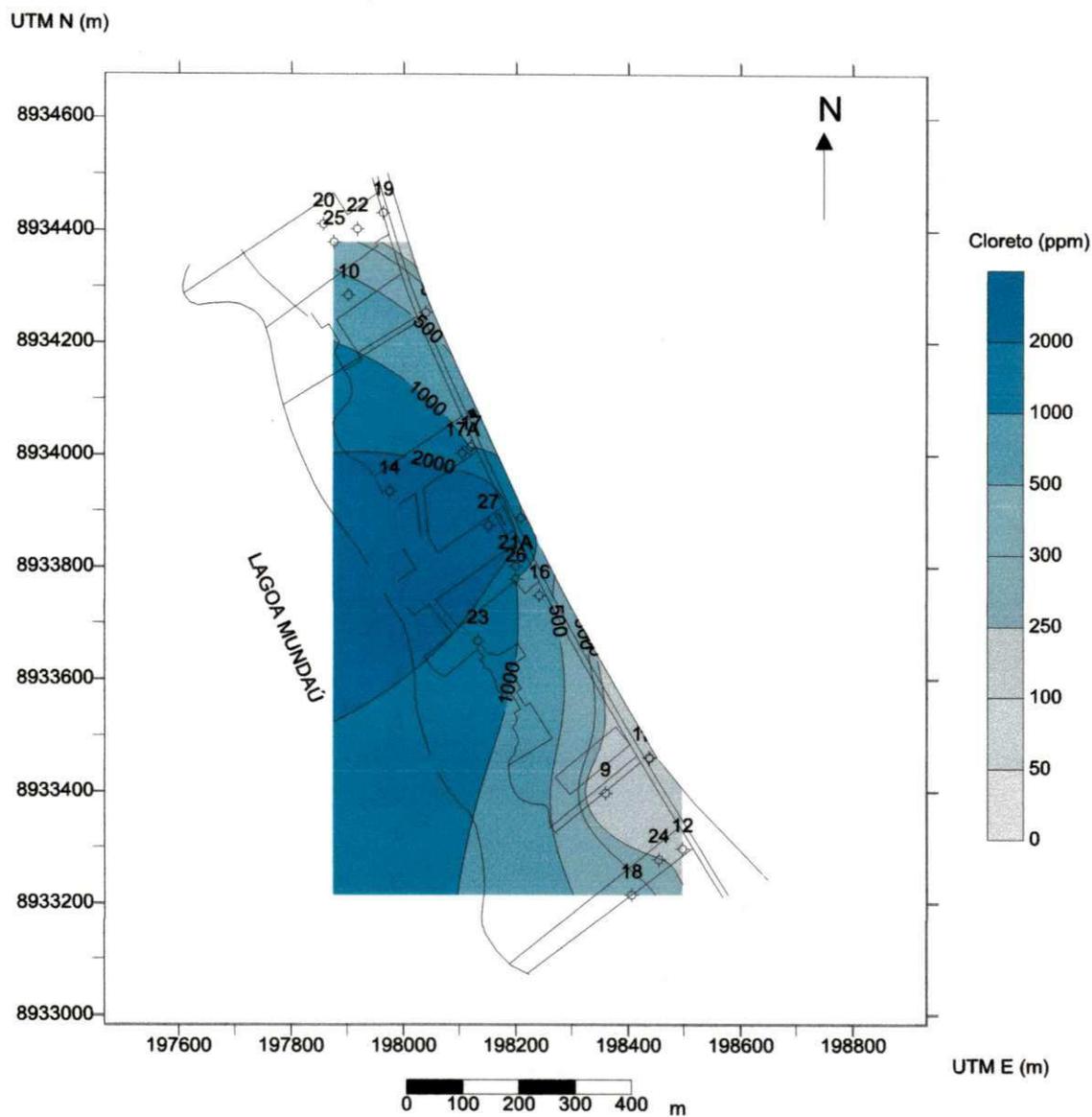
Figura 8 – Mapa de isotores de cloreto em 2012



(Fonte:Silva,2004)

No entanto, em 2012, a faixa começa a alargar e surge pontualmente teores acima de 1000 ppm, conforme mostra a Figura 8.

Figura 9 – Mapa de isoteores cloreto em 2013



(Fonte:Silva,2004)

Em 2013, o mapa de isoteores mostra que elevou bastante o teor de cloreto, onde há picos de 2000 ppm e a faixa muito mais larga, tendo uma tendência de elevação, conforme Figura 9.

O crescimento mundial de práticas de reutilização de águas residuais, motivadas essencialmente pela escassez e pela proteção dos recursos hídricos, tem se constituído num enorme desafio para os diversos setores, principalmente o industrial. Um outro fator determinante para este estudo, é o processo de salinização do aquífero Marituba que encontra-se em estado avançado.

Pela legislação, a água de reuso pode ser reutilizada apenas para fins não potáveis, como por exemplo: torre de resfriamento, caldeiras, água de processo ou sistema de combate de incêndio.

A água da torre de resfriamento que iremos realizar o estudo tem uma particularidade, onde se torna um agravante para o processo, pois recebe um make-up direto do processo, transportando a água com partículas contendo NaOH. Com a finalidade de controlar o pH, é injetado com o auxílio de uma bomba dosadora, ácido sulfúrico continuamente, sendo que o dial da bomba é alterado automaticamente conforme necessidade do controle. A elevação brusca de pH ocorre também no caso de haver descontrolo no processo (variação dos níveis dos evaporadores ou elevação PDI forçando abertura das portinholas para aliviar a pressão). Sendo uma contaminação significativa, ocasiona a elevação da condutividade e conseqüentemente redução de carga na planta por deficiência de troca térmica, provocando perda de produção e elevação da vazão de purga da torre.

A concentração de sais dissolvidos na água em circulação na torre de resfriamento aumenta devido à evaporação, aumento este que precisa ser limitado, realizando purga, ou seja, a remoção de uma quantidade adequada de água do sistema. Esta sangria hoje é dada pela descarga da tubulação de retorno das torres de resfriamento para a canaleta e o controle de sais dissolvidos é demonstrado principalmente pela análise de condutividade expressa em micro-siemens.

1.3 – Objetivos

1.3.1– Geral

O objetivo geral deste trabalho é a redução de geração de efluentes e consequentemente, a redução na captação de água subterrânea.

1.3.2 –Específicos

- Avaliar e quantificar as perdas de água;
- Avaliar o ciclo de concentração;
- Calcular o índice de Langelier e Ryznar;
- Fazer o balanço de massa do processo;
- Avaliar o reuso da purga da torre de resfriamento.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fim de uniformizar o conhecimento do presente trabalho, este capítulo apresenta fundamentos teóricos dos assuntos abordados neste estudo ,que inclui alguns trabalhos publicados.

"Segundo alguns especialistas, a crise da água no século XXI é muito mais de gerenciamento ,do que uma crise real de escassez e estresse (ROGERS et al., 2006). Entretanto, para outros especialistas, é resultado de um conjunto de problemas ambientais agravados com outros problemas relacionados à economia e ao desenvolvimento social (GLEIK, 2000).

Para Somlyody & Varis (2006), o agravamento e a complexidade da crise da água decorrem de problemas reais de disponibilidade e aumento da demanda, e de um processo de gestão ainda setorial e de resposta a crises e problemas sem atitude preditiva e abordagem sistêmica. Tundisi & Matsumura-Tundisi (2008) acentuam a necessidade de uma abordagem sistêmica, integrada e preditiva na gestão das águas com uma descentralização para a bacia hidrográfica. Segundo esses autores, uma base de dados consolidada e transformada em instrumento de gestão pode ser uma das formas mais eficazes de enfrentar o problema de escassez de água, estresse de água e deterioração da qualidade",(TUNDISE, 2008).

2.1 - Gestão Ambiental - Breve panorama das legislações de proteção ambiental com ênfase em recursos hídricos.

No Brasil não existe uma legislação específica para reuso de água industrial. A NBR 13.969/95 estabelece critérios para reuso em 4 classes, desde a reutilização da água em lavagem de carro (classe 1) até a irrigação de pomares (classe 4). Em geral, são adotados padrões referenciais internacionais ou orientações técnicas produzidas por instituições privadas. Este é um fator que tem dificultado a aplicação desta prática no país, pois a falta de legislação e normatização específica dificulta o trabalho dos profissionais. Ainda pode colocar em risco a saúde da população devido a falta de

orientação técnica, para a implantação dos sistemas de reuso das águas servidas e a respectiva fiscalização de tais sistemas. Quanto aos sistemas de aproveitamento da água de chuva, as diretrizes de projeto e dimensionamento estão prescritas na Norma Brasileira – NBR, 15.527 – Água da Chuva – aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis, publicada em 24.10.2007, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

No sentido de fazer uma breve abrangência na legislação ambiental, Melo (2008) analisou historicamente a legislação do Brasil a respeito do tema e constatou que:

- a) O Código das Águas de 1934 (Decreto Federal 24.643, de 10/07/1934)- assevera o uso gratuito de qualquer torrente ou nascente de água para as primeiras necessidades da vida e, não autoriza a derivação das águas públicas para aplicação na agricultura, indústria e higiene sem a existência da concessão e da autorização nos outros casos.
- b) O SISNAMA (Sistema Nacional do Meio Ambiente) - a Lei 6.938, de 31 de agosto de 1981, estabeleceu a política nacional de meio ambiente e criou o SISNAMA , conjunto de órgãos e instituições dos diversos níveis do Poder Público incumbidos da proteção do meio ambiente.
- c) Resolução N°20 do CONAMA, de 18 de junho de 1986, Art.21 - de forma a dominar a emissão de efluentes altamente contaminados nos corpos de água, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), estabelece critérios de lançamento de efluentes de qualquer fonte poluidora, seja direta ou indiretamente. Estes padrões de lançamento são definidos pela Resolução N°20 do CONAMA, de 18 de junho de 1986, Art.21.
- d) A antiga Resolução CONAMA N°20/86 e a sua sucessora N°. 357/05 - não fixam limites de cor para lançamento de efluentes, em razão disso durante muitos anos se subestimou o impacto ambiental causado pelo lançamento de efluentes com níveis de cor elevados, se destacando neste caso os efluentes têxteis, muitas vezes considerando a cor como um caráter meramente de natureza visual e estética.
- e) A Constituição de 1988 - institui que a água é um bem da União ou dos Estados, advertindo que o seu aproveitamento econômico e social deve buscar a redução de desigualdades.
- f) Lei das Águas 9.433/1997 - as regulamentações dos recursos hídricos estão presentes na Lei da Política Nacional de Recursos Hídricos n° 9433/97, que impõe critérios para cobrar pelo uso da água. Esta legislação tem o intuito de conservar e recuperar os recursos hídricos e melhorar a qualidade de água que chega à população, buscando dotar a água de um valor econômico, como um instrumento de gestão e como instrumento

econômico a ser aplicado tanto para os usos quantitativos quanto para os usos qualitativos.

g) A Lei de Criação da ANA (Agência Nacional de Águas) 9984/2000 - tem como objetivo implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos e Coordenar o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

h) A primeira regulamentação que tratou de reuso de água no Brasil foi a norma técnica NBR-13.696, de setembro de 1997. Na norma, o reuso é abordado como uma opção à destinação de esgotos de origem essencialmente doméstica ou com características similares.

i) Com o crescente interesse pelo tema, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) publicou a Resolução nº 54, em 2005, que estabelece os critérios gerais para a prática de reuso direto não potável de água. Nessa resolução, são definidas as cinco modalidades para fins: urbanos, agrícolas, ambientais, industriais e na agricultura.

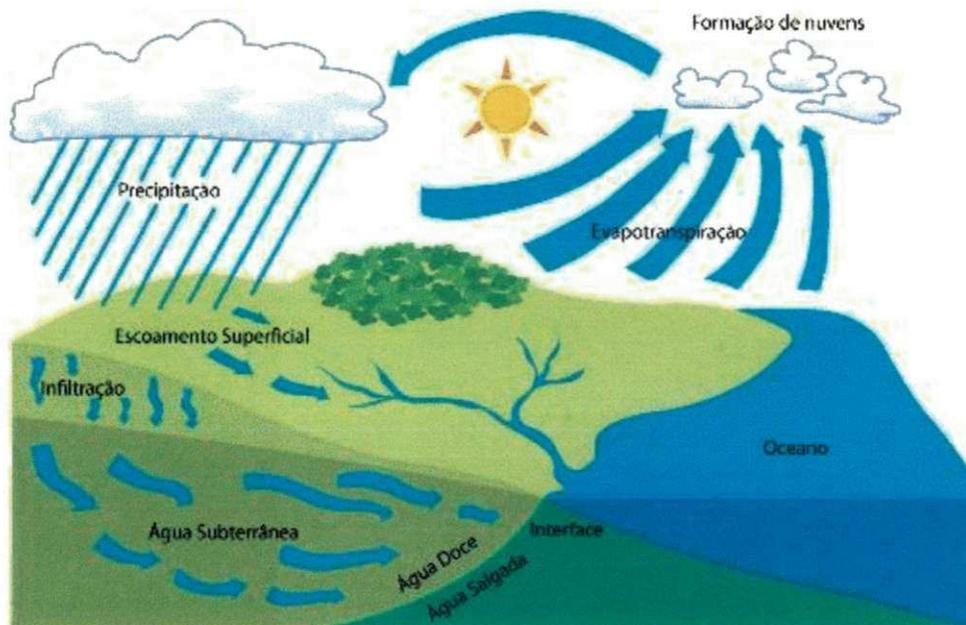
Segundo Valle, (1995) apud Júnior (2001) é objetivo também da Norma NBR ISO 14000 prover assistência na implantação do sistema de gestão ambiental ou em seu aprimoramento. Visto que a norma incide com a meta do desenvolvimento sustentável, sendo assim, condizente com as estruturas organizacionais, culturais e até mesmo das sociais.

No Brasil, a Portaria nº 2.914 de 14 de dezembro de 2011, do Ministério da Saúde, define os padrões de potabilidade da água com base nas exigências da OMS (Organização Mundial de Saúde). Esta legislação define também a quantidade mínima, a frequência em que as amostras de água devem ser coletadas e os limites de tolerância permitidos.

2.2. Definições de Reuso de Água

O reuso de água não é um conceito recente no mundo, pois a natureza vem reciclando e reutilizando a água há milhões de anos por meio do ciclo hidrológico da água. A Figura 10 mostra de forma simplificada o ciclo hidrológico da água, que é a forma natural que a natureza faz a prática do reuso.

Figura 10 - Ciclo Hidrológico da Água



Segundo Miller (2006), o reúso de água apresenta diversos benefícios, tais como: representa uma alternativa sustentável de fornecimento de água; requer uma menor quantidade de energia do que a captação de água; reduz ou elimina a quantidade de despejos do que a captação de água.

O termo água de reúso passou a ser utilizado com maior frequência na década de 1980, quando as águas de abastecimento foram se tornando cada vez mais caras, onerando o produto final quando usadas no processo de fabricação. Como o preço do produto, ao lado de sua qualidade, é fator determinante para o sucesso de uma empresa, a indústria passou a procurar, dentro de suas próprias plantas, a solução para o problema, tentando reaproveitar ao máximo seus próprios efluentes. Uma gama de processos foi desenvolvida visando a redução de custos, tendo obtido melhores resultados aqueles que utilizaram com sucesso esse métodos (MANCUSO; SANTOS, 2003 apud CORRÊA, 2014).

Sempre que a água com qualidade requerida para determinado uso torna-se um recurso escasso, são buscadas, de forma sistematizada ou não, alternativas de suprimento ou repressão do consumo, para que seja restabelecido o equilíbrio oferta/demanda (ORNELLAS, 2004 apud CORRÊA 2014).

O reuso de água consiste na recuperação de efluentes de modo a utilizá-la em aplicações menos exigentes. Desta forma, o ciclo hídrico tem sua escala diminuída em favor do balanço energético (METCALF; EDDY, 2003 apud CORRÊA, 2014).

A Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES) adota uma classificação de reuso de água em duas grandes categorias: potável e não potável. Esta classificação é amplamente adotada por sua praticidade e facilidade.

- Reuso Potável direto - quando o esgoto recuperado, por meio de tratamento avançado, é diretamente reutilizado no sistema de água potável.
- Reuso Potável indireto - caso em que o esgoto, após tratamento, é disposto na coleção de águas superficiais ou subterrâneas para diluição, purificação natural e subsequente captação, tratamento e finalmente utilizado como potável.
- Reuso não potável para fins industriais - abrange os usos industriais de refrigeração, águas de processo, para utilização em caldeiras, etc.
- Reuso para manutenção de vazões- a manutenção de vazões de cursos de água promove a utilização planejada de efluentes tratados, visando uma adequada diluição de eventuais cargas poluidoras a eles carregadas, incluindo-se fontes difusas, além de propiciar uma vazão mínima na estiagem.

2.3 - Critérios e padrões de qualidade da água

A qualidade da água é representada por um conjunto de características, geralmente mensuráveis, de natureza química, física e biológica. Os padrões de qualidade para a água industrial dependem de como ela será aplicada. No caso de indústrias alimentícias e farmacêuticas, por exemplo, a água deve ter um elevado grau de pureza, caso venha ser parte integrante do produto final ou entre em contato com as substâncias manipuladas em qualquer fase do processo. Esses padrões podem ser mais restritivos do que os padrões de qualidade da água para consumo humano (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

As características da água podem ser classificadas em cinco categorias:

- Físicas - cor, turbidez, temperatura e condutividade elétrica.
- Organolépticas- sabor e odor.
- Químicas - pH, alcalinidade, acidez, concentração de ferro, de manganês e outros elementos.
- Biológicas - presença de organismos vivos (determinada quali e quantitativamente ,via exames de bacteriologia e hidrobiologia).
- Radioativas - presença de elementos emissores de radiação alfa, beta e gama.

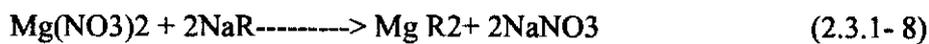
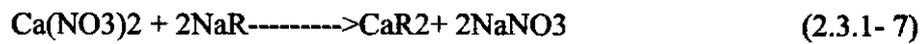
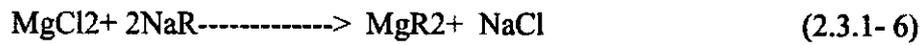
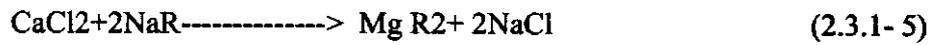
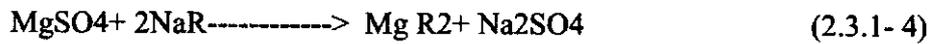
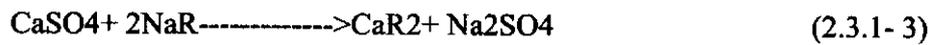
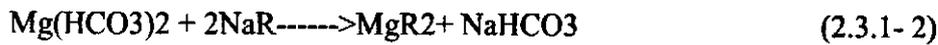
As análises físicas e organolépticas medem e indicam características perceptíveis pelos sentidos (cor, turbidez, odor e sabor). São características subjetivas. Os parâmetros existentes para avaliar a contaminação da água devido à presença de compostos químicos, podem ser diretos ou indiretos, ou seja, podem ser parâmetros que identificam e quantificam os compostos contaminantes, ou parâmetros indicativos da presença de algum contaminante.

2.3.1 - Água abrandada

É a água livre de dureza, especificamente livre dos íons de Ca^{++} e Mg^{++} , esta água é utilizada como reposição do sistema de condensado para produção de vapor em caldeiras. Na Braskem, o sistema opera com uma vazão de $28\text{m}^3/\text{h}$ de água bruta, a uma pressão de $1,7\text{Kg}/\text{cm}^2$, durante um período não superior a 30 horas, passa dentro de um abrandador, em contato com uma resina catiônica de alta capacidade, de tal forma que serão removidos da água os íons que formam incrustações (cálcio e magnésio).substituindo-os por uma quantidade equivalente de íons de sódio. A água que abastece o abrandador vem da adutora,e a água após ser abrandada, será misturada num tanque com condensado e posteriormente circulada através de um desaerador para daí ser finalmente bombeada para as caldeiras.

Usando-se o símbolo R para o radical correspondente ao trocador de cátions, teremos as seguintes reações de abrandamento:





2.3.2 - Filtração

Consiste na passagem de água por filtros para remoção de sólidos suspensos. Esta operação é mecânica e nem toda matéria suspensa fica retida, como por exemplo, a finamente dividida; os filtros de carvão ativo na desmineralização são responsáveis pela remoção de matéria orgânica e cloro residual da água, pois estes são extremamente agressivos a resina aniônica.

2.4 - Principais parâmetros analisados na água

2.4.1 - Oxigênio (DQO)

É a quantidade de oxigênio necessária para oxidação da matéria orgânica através de um agente químico. Um valor de DQO alto, indica uma grande concentração de matéria orgânica e baixo teor de oxigênio. O aumento da concentração de DQO num corpo d'água se deve principalmente a despejos de origem industrial.

2.4.2 - pH (Potencial Hidrogeniônico)

Medida da concentração relativa dos íons de hidrogênio numa solução. Esse valor indica a acidez ou alcalinidade da solução.

Os indicadores de pH são substâncias químicas que apresentam mudanças bruscas de coloração em função da variação do pH do meio. Existem compostos químicos capazes de cobrir toda faixa de variação de pH, conforme indicado na Figura 13.

O termo pH é usado universalmente para expressar a intensidade de uma condição ácida ou alcalina de uma solução. Mede a concentração do íon hidrogênio ou sua atividade. Richter e Netto, 1991, afirmam que, de um modo geral, águas de pH baixo tendem a ser corrosivas ou agressivas a certos metais, enquanto que, águas de pH elevado tendem a formar incrustações.

Tabela 3. Soluções indicadoras de pH

INDICADOR	FAIXA DE pH	COR EM MEIO	
		ÁCIDO	BÁSICO
Alaranjado de Metila	3,1 - 4,6	Vermelho	Laranja
Verde de Bromocresol	3,8 - 5,4	Amarelo	Azul
Vermelho de Metila	4,4 - 6,2	Vermelho	Amarelo
Tornassol	4,5 - 8,3	Vermelho	Azul
Azul de Bromotimol	6,0 - 7,6	Amarelo	Azul
Vermelho Cresol	7,2 - 8,8	Amarelo	Vermelho
Vermelho Fenol	6,8 - 8,4	Amarelo	Vermelho
Azul de Timol	8,0 - 9,6	Amarelo	Azul
Fenolftaleína	8,2 - 9,8	Incolor	Vermelho
Timolftaleína	9,3 - 10,5	Incolor	Azul
Amarelo Alizarina	10,1 - 11,1	Amarelo	Lilás

2.4.3 - Cloração

É utilizada como coadjuvante da coagulação, já que esta substância destrói certos microorganismos que inibem a formação de flocos. Além disso, a cloração oxida a matéria orgânica e mantém o sistema de tratamento livre de limos.

A reação do cloro com a água é a seguinte:



Como vimos, o composto ativo na cloração de água é o ácido hipocloroso, formado à partir da reação do cloro com a água.

2.4.4 - Dureza Total

É a soma das concentrações de sais de cálcio e magnésio. Suas concentrações em água doce podem variar de 10 a 200 ppm, às vezes alcançando valores maiores; em águas salgadas suas concentrações chegam até a 20.000 ppm. A dureza total de uma água, é devida a bicarbonatos, sulfatos, cloretos e nitratos de cálcio e magnésio.

A principal fonte de dureza nas águas é a sua passagem pelo solo (dissolução da rocha calcária pelo gás carbônico da água), conforme as reações:



Existem diversas escalas de dureza, como a alemã, por exemplo. Entretanto, apresenta-se aqui uma escala de origem americana, conforme Tabela 4, já que ela é utilizada internacionalmente:

Tabela 4. Grau de dureza das águas

mg/L CaCO ₃	GRAU DE DUREZA
0 - 75	branda ou mole
75 - 150	moderadamente dura
150 - 300	Dura
acima de 300	muito dura

Sais de cálcio e magnésio têm a tendência de formar incrustações em superfícies onde há troca de calor (são relativamente insolúveis em água, tendendo a precipitar-se), causando, por exemplo, o bloqueamento dos tubos de caldeira e de trocadores de calor de sistemas de água de refrigeração. Nestas condições, os tubos de caldeira podem sofrer rupturas por superaquecimento no local da incrustação e tubos de trocadores de calor podem sofrer corrosão por aeração diferencial. Além disso, essas incrustações provocam perda de eficiência das superfícies de troca de calor e permitem a possibilidade de produtos altamente corrosivos se concentrarem debaixo delas, como, por exemplo, soda cáustica, provocando corrosão cáustica. Este tipo de corrosão é freqüente em caldeiras de alta pressão, mas pode ocorrer também em caldeiras de média e baixa pressão, quando se admite a presença de soda cáustica na sua água. Esses sais podem ser removidos das águas brutas por abrandamento, desmineralização ou evaporação.

2.4.5 - Turbidez

É o termo aplicado à matéria suspensa de qualquer natureza, presente em uma certa quantidade de água, geralmente é constituída de argila, areia, lama, óleos, matéria orgânica, sílica coloidal, ácidos húmicos e fúlvicos (resultantes da decomposição de vegetais) e organismos como bactérias e esporos. É preciso uma distinção entre matéria suspensa, chamada sedimento, que precipita rapidamente, e matéria que precipita vagarosamente, provocando a turbidez.

A presença destes materiais em suspensão numa amostra de água, causa a dispersão e a absorção da luz que atravessa a amostra, em lugar da sua transmissão em linha reta. A turbidez é a expressão desta propriedade óptica e é indicada em termos de unidades de turbidez (NTU – Nephelometric Turbidity Unit).

A turbidez é uma característica da água devido à presença de partículas suspensas, com tamanho variando desde suspensões grosseiras aos colóides, dependendo do grau de turbulência. A presença dessas partículas provoca a dispersão e a absorção da luz, dando à água uma aparência nebulosa, esteticamente indesejável e potencialmente perigosa.

Segundo Richter e Netto (1991), a turbidez pode ser causada por uma variedade de materiais: partículas de argila, lodo ou areia, óxidos metálicos e, ainda, pode ser devido à presença de um grande número de microorganismo.

2.4.6 - Cor

A presença de matéria orgânica proveniente de matéria vegetal em decomposição, é quase sempre responsável pelo desenvolvimento de cor em água. A maioria das águas de superfície apresenta cor, enquanto que as subterrâneas são isentas. A presença de cor em água é indesejável na maior parte das aplicações industriais. Em aplicações de água para alimentação de caldeiras, a matéria orgânica que produz a cor tende a se carbonizar, provocando incrustações nos tubos de caldeira. A coloração da água pode ser removida por cloração.

2.4.7 - Ferro

Geralmente presente em águas brutas na forma de bicarbonatos. Suas concentrações podem variar grandemente dependendo da região. O ferro tem a tendência de formar depósitos sobre superfícies de troca de calor, como tubos de caldeiras, conseqüentemente podem provocar rupturas nesses tubos ou causar bloqueamento. Os depósitos de ferro, sendo muito porosos, permitem a possibilidade de produtos altamente corrosivos se concentrarem debaixo deles, provocando corrosão desastrosa para os materiais. O ferro pode ainda causar deterioração em certos tipos de resinas de estações desmineralizadoras de águas. Pode ser removido por aeração ou cloração em tanques de armazenamento, por

desmineralização ou evaporação das águas ou, durante o processo de abrandamento com cal sodada, por precipitação. Em águas potáveis, sua concentração máxima não pode exceder 0,3 ppm.

2.4.8 - Alcalinidade total

A alcalinidade é definida como a capacidade da água de neutralizar íons hidrônio (H⁺). Geralmente, se deve à presença de hidróxidos, carbonatos e bicarbonatos de metais, tais como cálcio, magnésio e sódio, cujos inconvenientes são os mesmos da dureza em sistemas de geração de vapor. Os bicarbonatos têm, ainda, o inconveniente de liberar gás carbônico, quando submetidos às altas temperaturas, o que torna a água altamente corrosiva (Tomar, 1999).

2.4.9 - Dióxido de Carbono

Dissolvido em água se torna altamente corrosivo ao ferro e ligas de cobre. A alcalinidade pode ser reduzida ou convenientemente controlada pelos processos de degaseificação. Pode ser totalmente removida por desmineralização ou evaporação da água.

2.4.10 - Sulfato

Geralmente estão presentes como sulfatos de cálcio, magnésio e sódio e suas concentrações variam grandemente, dependendo da região e geram os mesmos inconvenientes da dureza da água. Podem ser removidos por abrandamento, desmineralização ou evaporação.

2.4.11 - Sílica Solúvel

Em águas brutas, geralmente está presente na forma de ácido silícico e silicatos solúveis. A sílica combinada com a dureza produz incrustações duríssimas e de difícil

remoção em superfícies de troca de calor. Tende ainda a passar para o vapor, em caldeiras de alta pressão, formando depósitos duros em superaquecedores e palhetas de turbinas. Este último efeito é altamente danoso, pois reduz a eficiência da turbina e pode provocar alguns distúrbios mecânicos como, por exemplo, desbalanceamento. Pode ser removida por desmineralização ou evaporação. A sílica solúvel em água para fins potáveis não apresenta inconvenientes nas concentrações em que é normalmente encontrada.

Esse componente é particularmente perigoso em sistemas de osmose inversa, devido à formação de precipitados difíceis de serem removidos, causa frequente da perda de membranas. A solubilidade da sílica é dependente da temperatura e do pH. Geralmente, a concentração máxima admitida em sistemas de osmose inversa é de 150 ppm, acima dessa concentração, pode ocorrer a precipitação da sílica, causando danos ao sistema. Trata-se, portanto, de um dos parâmetros mais importantes a serem controlados (Byrne, 1995).

2.4.12 - Cloreto

Em águas brutas estão presentes na forma de cloreto de sódio, cálcio e magnésio. Os cloretos provocam corrosão em certas circunstâncias quando presentes em águas de caldeiras. Sua remoção pode ser feita por desmineralização ou evaporação.

2.4.13 - Cloro

O Cloro pode ser utilizado como um tratamento de baixo custo e alta eficiência na qualidade microbiológica da água. O Cloro residual total é a quantidade de cloro resultante entre a dosagem e a demanda. O Cloro residual apresenta-se como cloro livre disponível (ácido hipocloroso ou íon hipoclorito) ou como cloro combinado disponível (cloraminas e outros compostos de cloro). O teor de cloro residual que permanece na água após o processo de cloração, permite avaliar se a água está em condições de uso e isenta de bactérias patogênicas.

Membranas de poliamida são extremamente sensíveis à presença de cloro. Dependendo de outros componentes da corrente de alimentação, mesmo traços de cloro podem quebrar a estrutura da membrana de poliamida. A presença de manganês, cobre ou outros metais de transição podem atuar como catalisadores para aumentar a agressividade

dos efeitos de oxidação do cloro, por isso, a importância do controle efetivo deste componente em sistemas de osmose inversa (BYRNE, 1995).

O ácido hipocloroso e íons hipoclorito são chamados de cloro livre. Quando adicionado na água, o cloro reage rapidamente formando ácido hipocloroso, íon hidrogênio e íon cloreto.

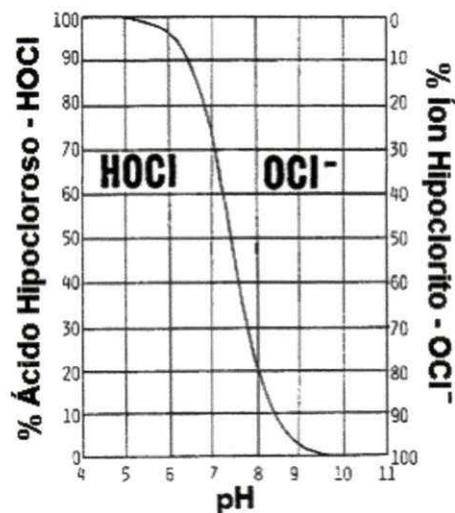


O ácido hipocloroso pode se dissociar conforme a equação abaixo:



O ponto de equilíbrio nestas reações depende do valor de pH, sendo que a primeira reação ocorre a valores de pH abaixo de 4, e a segunda reação a valores de pH compreendidos na faixa de 5 a 10. Este comportamento é apresentado na Figura 11, que ilustra o pH na dissociação do ácido hipocloroso. A quantidade de ácido hipocloroso é que determina a eficiência biocida, ao invés do íon hipoclorito, (White, 1972).

Figura 11 - Efeito do pH na dissociação do ácido hipocloroso



Fonte: BINNIE et al, 2002

2.4.14 - Temperatura

Água potável deverá ser, no inverno, superior à temperatura do ar, e inferior no verão. Os valores a fixar dependem, por isso, da região considerada. No caso de Portugal, adotaram-se os valores de 12°C e de 25°C. Além de ter um efeito tóxico direto, a temperatura afeta a solubilidade e a toxicidade de muitos outros parâmetros. Geralmente, os sólidos dissolvem-se melhor a quente, enquanto os gases preferem águas mais frias para se dissolverem. O sol é a principal fonte de aquecimento das águas naturais. Águas industriais provocam muitas vezes poluição térmica, nomeadamente das centrais nucleares, indústrias metalúrgicas, química e petrolífera. Numa habitação, o volume de água utilizado é cerca de 0.5 m³/d. Numa central nuclear, só para arrefecimento, usam-se 45 m³/s, equivalentes a 8 milhões de habitações. Temperaturas demasiado altas, limitam a disponibilidade de oxigénio podendo levar à morte da fauna.

2.4.15 - Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica depende da quantidade de íons dissociados na água e é, aproximadamente, proporcional à sua quantidade, sendo expressa em μS/cm. Quando a condutividade aumenta, o potencial para corrosão e incrustação também aumenta, por isso, deve ser um parâmetro controlado durante toda a operação de tratamento da água. É importante salientar que a condutividade elétrica varia de forma linearmente proporcional à concentração total de sais em solução, sendo uma medida mais fácil de ser realizada do que a determinação da concentração (VIEIRA, 2011).

Os sólidos dissolvidos na água que se encontram ionizados, permitem a passagem de corrente, ou seja, eles conduzem corrente elétrica. A água que passa pelo eletrodo irá conduzir corrente proporcionalmente a quantidade de sólidos ionizados presentes na solução. Quanto maior a passagem de corrente, maior a condutividade, ou seja, menos resistiva é a solução. Conceitualmente a resistividade é o inverso da condutividade.

$$\text{Condutividade} = \frac{1}{\text{Resistividade}} \quad (2.4.15 - 1)$$

2.4.16 - Sólidos Totais

Sólidos totais é um parâmetro definido como toda a matéria que permanece como resíduo após evaporação, a uma temperatura de 103 a 105°C. Os sólidos totais podem ser classificados segundo suas dimensões, em sólidos em suspensão ou sólidos dissolvidos. Estes ainda podem ser classificados de acordo com a sua volatilidade a 600°C. A fração orgânica (sólidos voláteis) oxida-se e é eliminada como gás, enquanto, a fração inorgânica permanece como cinza (sólidos fixos). A Figura 12 mostra esquematicamente como é feita a classificação dos sólidos totais:

Figura 12 - Classificações dos Sólidos Totais



(Fonte: Vieira, 2011)

2.5 - 4R's (Reduzir, Repensar, Reutilizar e Reciclar)

Reciclar - usar materiais que tem potencial para reciclagem. Alguns confundem reciclar com reutilizar. Reciclar é utilizar um material qualquer que tenha potencial e transformá-lo em outro objeto, ou até mesmo em um objeto semelhante, por exemplo, aproveitar a purga de descarte da torre e retornar para a própria torre.

Reutilizar - reusar um objeto que já existe, por exemplo, aproveitar a purga da torre e reutilizar no sistema de combate de incêndio ou água de processo.

Repensar - basicamente, repensar no seu modo de vida. O repensar é o primeiro R que pode fazer toda diferença nos demais R's. Nesse você precisa fazer indagações sobre seu processo. No seu dia-a-dia você pode prática esse R quando se questiona: É preciso mesmo trocar água da piscina diariamente? E trocar de carro todo ano? Esse tipo de indagação mesmo.

Reduzir - o nome por si só já transmite a mensagem. Diminuir o consumo, os exageros. Utilizar só o que for realmente necessário. Exemplificando, ao acompanhar as perdas de água, você gera menos efluentes, que gera menos problemas ambientais.

2.6 - Avaliação de riscos do reuso

Segundo Mancuso e Santos (2002), apesar dos avanços obtidos nos últimos anos, as técnicas de tratamento de água são limitadas não removendo completamente todas as substâncias indesejadas da água. Dessa forma, é necessário avaliar os riscos à saúde humana e ao meio ambiente, associados ao reuso de água. O equilíbrio (gerenciamento de risco) das relações risco/benefício e custo/eficácia das tecnologias de tratamento irão depender do uso pretendido. Podemos dividir os riscos em objetivos e subjetivos, sendo os primeiros estimados com base em cálculos estatísticos e metodologias quantitativas, enquanto os riscos subjetivos são aqueles avaliados com base em julgamentos intuitivos. Entre os riscos objetivos podemos citar os riscos à saúde humana, riscos ambientais, tecnológicos, epidemiológicos, industriais, acidentais, ecológicos, nucleares, etc. A avaliação dos riscos subjetivos procura conhecer como a percepção e os julgamentos individuais ou sociais influenciam e/ou determinam as escolhas relacionadas a risco e à sua aceitabilidade social.

A presença de microrganismos patogênicos na água de reuso em torre de resfriamento representa um risco em potencial para os operadores e para o público que circula nas vias próximas ao sistema de resfriamento (ASANO, 1998).

A água destinada ao reuso recebe tratamento adequado para tal finalidade, incluindo o adicionamento de biocidas que controlam o crescimento de microrganismos e algas reduzindo, desta forma, o elevado potencial de dispersão de patógenos através dos aerossóis e gotículas carregados pelos ventos. Além dos microrganismos, os aerossóis também podem transportar para o ar compostos voláteis, que podem causar riscos à saúde em caso de inalação (ASANO, 1998).

A espécie *Legionella Pneumophila*, agente causadora da doença dos legionários, encontra nos sistemas de ar condicionado e sistemas de resfriamento, condições adequadas para seu crescimento. Não existem dados sobre as diferenças entre a qualidade da água de reuso e a de alimentação das torres pela água de mananciais, quanto à

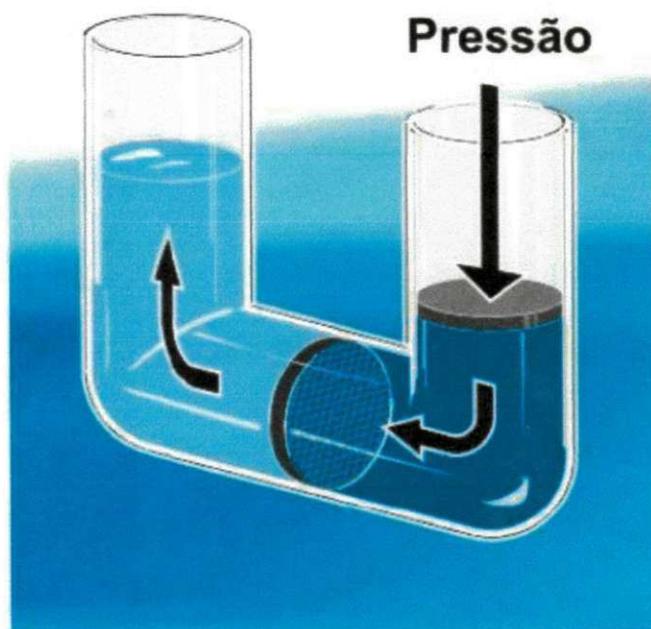
ocorrência de *Legionella* sp.. O tratamento adequado da água de alimentação da torre, independente de sua origem, tende a controlar e minimizar os riscos de contaminação dos operadores e pessoas que têm acesso ao sistema de resfriamento (ASANO, 1998).

2.7 - Osmose Reversa

A osmose reversa foi desenvolvida à partir da descoberta, há mais de 200 anos, de que material natural como a parede celular de vegetais, apresenta permeabilidade à água, porém, não permite passagem de materiais nela dissolvidos. Inicialmente, a osmose reversa foi empregada com o objetivo de dessalinizar a água do mar. Entre as décadas de 1960 e 1970 esta tecnologia começou a ser usada na indústria de alimentos, sendo a indústria leiteira, a pioneira.

A osmose reversa é obtida através da aplicação mecânica de uma pressão superior à pressão osmótica, do lado da solução mais concentrada inverte o fluxo natural. Assim sendo, pelo processo de osmose reversa, água pura pode ser retirada de uma solução salina por meio de uma membrana semipermeável, contanto que a solução esteja a uma pressão superior à pressão osmótica relativa à sua concentração salina.

Figura 13 – Princípio operação sistema de osmose reversa



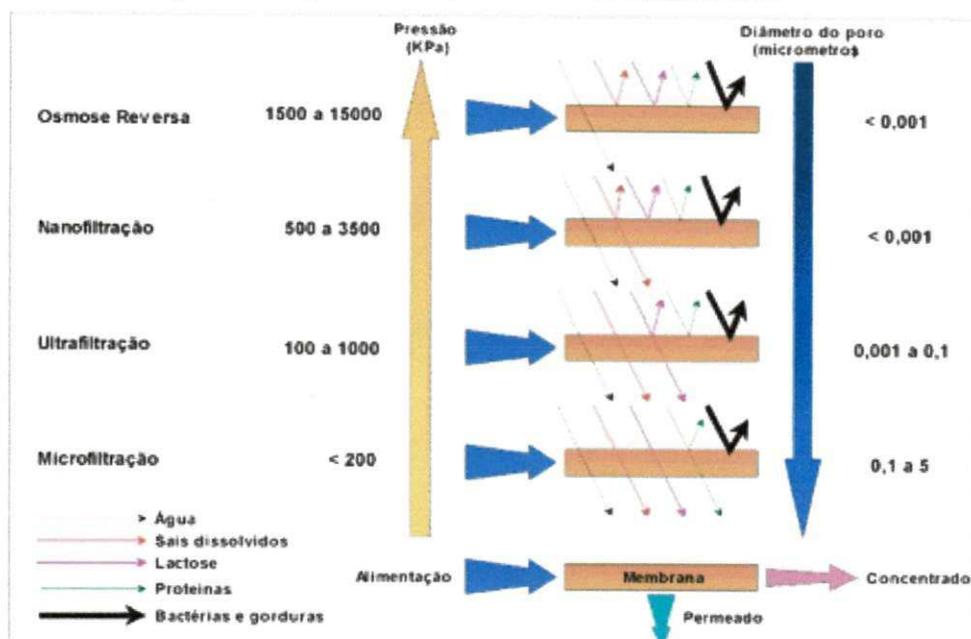
O fenômeno da osmose é ilustrada na Figura 13, uma membrana semi-permeável é colocada entre dois compartimentos. Definiremos membrana semi-permeável a que é permeável a algumas espécies, e não permeável a outras . Desta forma, baseando no nosso estudo assume-se que esta membrana que iremos utilizar é permeável à água, mas não ao sal, assim a ela permitirá que a água seja permeada e o sal fique retido. A membrana se comporta então como uma peneira molecular, rejeitando seletivamente moléculas e íons dissolvidos e permitindo a passagem da água pura. A rejeição de sais na osmose reversa depende de determinados fatores como a temperatura, a concentração de sais na água de alimentação, a pressão do sistema, o diâmetro de corte ou de poro e rendimento da membrana.

2.7.1 - Processo de Operação da Membrana

Durante o processo de OR, à medida que aumenta o permeado, o volume de água da corrente do rejeito diminuí, e a concentração de partículas suspensas e íons dissolvidos aumenta. As partículas suspensas podem se agregar às paredes da membrana, bloqueando ou minimizando a vazão dos canais da alimentação e aumentando a queda da pressão ao longo do sistema. Esse processo de formação de filme depositado na superfície da membrana é chamado de *fouling* e resulta num declínio do desempenho do sistema de osmose reversa. Além disso, sais solúveis podem se precipitar na corrente concentrada, gerando *scaling* na superfície da membrana, e resultando numa menor permeabilidade através desta (declínio do fluxo). O pré-tratamento na água de alimentação da OR tem o objetivo de eliminar contaminantes que podem causar redução da vida útil da membrana.

Considerando o exposto, o processo de osmose reversa representa o grau mais fino de filtração de um líquido conseguido até hoje. As dimensões das partículas retidas e a pressão aplicada nos processos de microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa podem ser observadas na Figura 14;

Figura 14 – Tipos de Filtrações x dimensões de partículas



A pressão osmótica é o impulso (força) que a solução sofre para se deslocar do meio menos concentrado, para o meio mais concentrado; esse fluxo de solvente (água) é interrompido no momento que a solução estiver em equilíbrio, ou seja, quando as concentrações forem iguais (isotônicas).

O processo de fracionamento completo, utilizado para tratamento de água, permite remover contaminantes orgânicos e até 99% de todos os íons, dos vírus, das bactérias e dos colóides, usando uma pressão superior à pressão osmótica que força a passagem de água através da membrana semipermeável, no sentido inverso ao da osmose natural. A pressão osmótica é a diferença de pressão hidráulica e de energia potencial que existe entre duas soluções, em lados opostos de uma membrana semipermeável, devido à tendência da água a fluir por osmose.

A membrana é semipermeável produzida com materiais poliméricos, por exemplo, o acetato de celulose ou poliamida. Os materiais da membrana influenciam na definição dos parâmetros operacionais do sistema de tratamento como um todo, em função de algumas restrições referentes à resistência destes materiais, sendo apresentadas na Tabela 5, com as recomendações para utilização de cada tipo de membrana disponível.

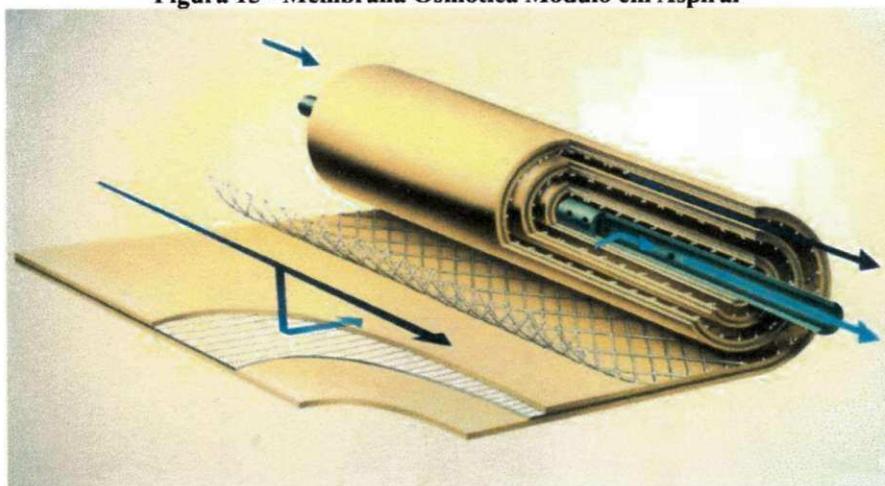
Tabela 5: Recomendações para o uso das membranas de osmose reversa

Material da Membrana	Limite de pH	Limite de Temperatura	Outras Limitações
Acetato de Celulose	1,5 – 7,0	0 - 50°C	Pode ser degradado por processo biológicos
Poliamida	4,0 – 11,0	0 - 46°C	Não tolera cloro livre
Filme Fino Composto	<1,0 – 13,0	0 - 79°C	Pode tolerar níveis moderados de cloro livre (100ppm)

Fonte: [IDAHO, 1992].

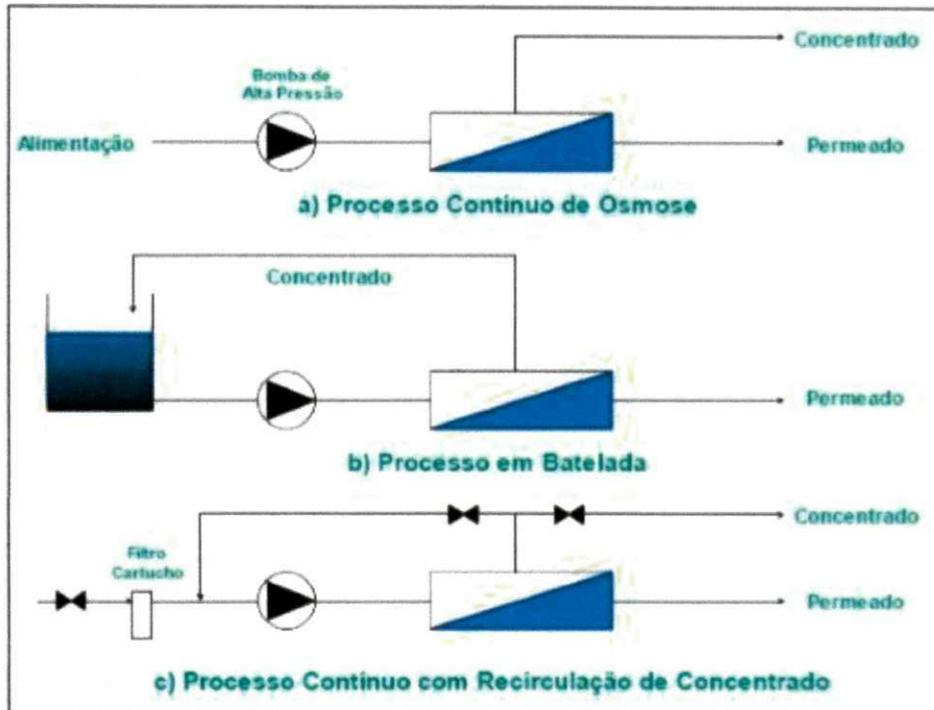
As membranas , tipo espiral, são as mais utilizadas atualmente. São constituídas por duas camadas que são coladas nos lados opostos de um tecido espaçador, conhecido como espaçador do canal de permeado. O Canal espaçador é uma tela de malha aberta que é utilizada para manter o espaçamento entre as membranas nos elementos e para definir os canais através dos quais o retentado escoar. O envelope formado é enrolado ao redor de um tubo perfurado, colocado no interior do canal de permeado, colocando-se uma tela plástica, externamente ao envelope, de forma a obter um canal para a corrente de alimentação, Figura 15.

Figura 15 - Membrana Osmótica Modulo em Espiral



Na Figura 16 são apresentados alguns dos possíveis arranjos para os sistemas de osmose reversa. a) processo contínuo de osmose; b) processo em batelada; c) processo contínuo com recirculação de concentrado.

Figura 16 - Representação esquemática dos possíveis arranjos par aos sistemas de osmose reversa



A Tabela 6 mostra o campo de aplicação das membranas de osmose reversa FilmTec, fabricada pela Empresa DOW. Alguns manuais sobre membrana de osmose reversa dividem em três partes apenas: TW para água doce; BW para água salobra e SW para água salgada.

Tabela 6: Aplicação das membranas de Osmose Reversa

Membranas	Parâmetros			
	Recuperação de água por membranas Modula 1m	STD na alimentação (mg/l)	Taxa de rejeição de sais	Pressão de alimentação requerida
TW30 (água industrial)	15% / 10%	< 1000	>90%	<21bar
BW30 (água salgada)	15% / 10%	< 5000	>95%	<41bar
SW30 (água do mar)	15% / 10%	5000 - 15000	>98%	<41 bar
SW30HR (água do mar com alta concentração de rejeito)	15% / 10%	15500 - 50000	>99%	<41 bar

Fonte: [DOW EUROPE, 1994].

2.7.2 - Pré Tratamento

O pré-tratamento de água a ser processada pela unidade de osmose reversa tem como o principal objetivo, melhorar a eficiência e aumentar o tempo de vida útil das membranas utilizadas, uma vez que diversas substâncias podem apresentar efeitos deletérios sobre as mesmas (DOW EUROPE, 1994).

Os principais problemas relacionados à perda de eficiência e redução da vida útil das membranas de osmose reversa estão associados à incrustação de sólidos em suspensão nas paredes da membranas e /ou degradação por agentes oxidantes ou microorganismos. Para que sejam evitados os problemas de deposição e incrustação, que irão causar perda na eficiência do sistema, pode-se utilizar diversos processos de tratamento de água existentes, como por exemplo, abrandamento, precipitação química, coagulação floculação e filtração.

No caso da pressão, o processo de osmose reversa é influenciado tanto na quantidade, como na qualidade da água produzida, ou seja, com o aumento da pressão na alimentação do sistema, ocorre um aumento no fluxo de água através da membrana e uma redução na concentração de sólidos totais dissolvidos no permeado, o que significa dizer que ocorre um aumento na taxa de rejeito de sais.

Com relação à temperatura da água de alimentação do sistema, também se observa uma variação na taxa de produção de permeada, bem como, na taxa de rejeito de sais, só que neste caso, ao contrário do que ocorre com o aumento da pressão, a taxa de rejeito de sais do sistema de osmose reversa é reduzida, ocorre uma piora da qualidade do permeado.

A recuperação de água em um sistema de osmose reversa é definida pela relação entre o fluxo do permeado e o fluxo de água de alimentação do sistema. Com o aumento da recuperação de água, o fluxo de permeado através da membrana vai diminuindo e finalmente é interrompido, quando a concentração salina atinge um valor onde a pressão osmótica do concentrado é superior à pressão hidráulica aplicada na corrente de alimentação. A taxa de rejeição de sais também é reduzida com o aumento da recuperação de água.

2.8 - Ciclo de Concentração

A quantidade de vezes que a mesma é concentrada é chamada de Ciclo de concentração (CC). Considerando que durante a evaporação somente a água pura esteja saindo do sistema, o Ciclo de Concentração é definido como:

$$\text{Ciclo de Concentração} = \frac{\text{Evaporação}}{\text{Descargas} + \text{Arraste}} + 1 \quad (2.8-1)$$

Na maioria das vezes, é difícil de obter os ciclos de concentração de um sistema através da medição e cálculo das vazões de reposição, descarga, arrastes e evaporação. Assim, para um sistema de resfriamento, os ciclos são estimados através das respectivas relações de concentração de sílica, cálcio e/ou magnésio entre a água do sistema e a água de reposição. Como por exemplo:

$$CC = \frac{Si(sis)}{Si(rep)} \quad (2.8-2)$$

$$CC = \frac{Ca(sis)}{Ca(rep)} \quad (2.8-3)$$

$$CC = \frac{Mg(sis)}{Mg(rep)} \quad (2.8-4)$$

De modo geral, podemos definir o ciclo de concentração da torre de resfriamento como sendo:

$$\text{Ciclo} = \frac{\text{Concentração de Sólidos dissolvidos na água da torre de resfriamento}}{\text{Concentração de Sólidos dissolvidos na água de reposição}} \quad (2.8-5)$$

Este parâmetro é utilizado para determinar a quantidade de água que deve ser removida do sistema de resfriamento. O ciclo de concentração ideal para cada sistema é definido pelo projeto, pelas características da água, pelos parâmetros operacionais e pelo programa de tratamento adotado (BETZ, 1991).

A utilização de íons cloretos (Cl⁻) para o cálculo dos ciclos de concentração, tem algumas ressalvas, pois este parâmetro muitas vezes não é confiável para sistemas de resfriamento, pois o mesmo pode sofrer contaminações de cloretos do meio externo (inclusive pelo ar), principalmente em cidades litorâneas; além disso, muitos produtos adicionados ao meio (biocidas, derivados clorados, inibidores de dispersão e incrustação, etc) contêm este íon em solução.

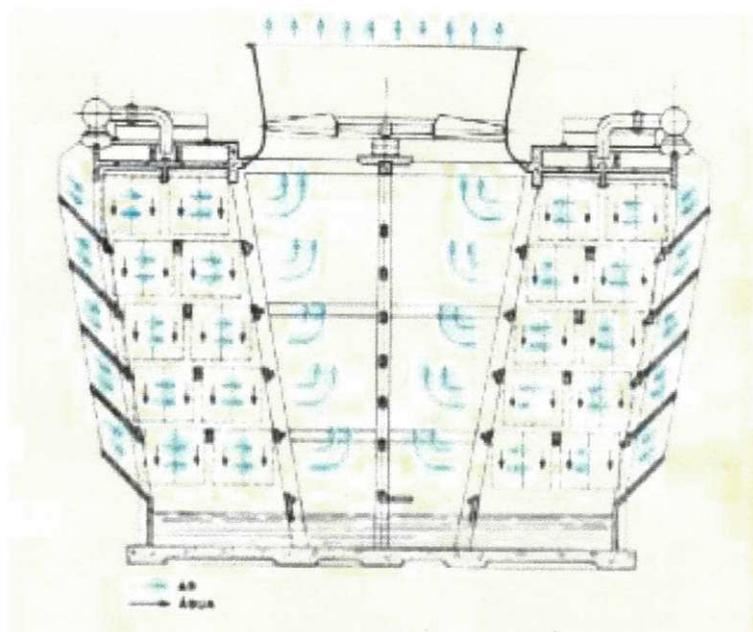
Para o cálculo do arraste, deve-se levar em consideração o tipo de tiragem existente no sistema (posição do ventilador, quando existente); o arraste é assumido com uma porcentagem da vazão de recirculação e, normalmente, empregam-se os seguintes valores empíricos, conforme Tabela 7.

Tabela 7: Estimativa de arrastes em água de resfriamento, baseado na vazão de recirculação.

EQUIPAMENTO	Arraste (%) Valor médio	Arraste (%) Faixa Usual
Tiragem Induzida	0,2	0,1 - 0,3
Tiragem Forçada	0,2	0,1 - 0,3
Tiragem Natural	0,5	0,3 - 1,0
"Spray-pond"	2,5	1,0 - 5,0
Condensador Evaporativo	0,2	0,1 - 0,2

Na Figura 17, mostra-se o modelo de uma torre de resfriamento com tiragem mecânica induzida em corrente cruzada, que será o mesmo modelo do presente estudo. Salientamos que a transferência de calor no interior da torre de resfriamento aproximadamente 80% são devido ao calor latente e 20% ao calor sensível. A transferência de calor latente é devido a vaporização de uma pequena porção de água e a transferência de calor sensível devido a diferença de temperatura entre a água o ar. O calor que se pode teoricamente remover por unidade de massa de ar circulando numa torre de resfriamento depende da temperatura e do teor de umidade do ar.

Figura 17 - Torre com tiragem mecânica induzida em corrente cruzada



(Fonte Casetta&Mansur,2004)

Nos sistemas fechados, o resfriamento da água se dá por troca térmica com o ar, e não por evaporação. Desta forma, o ciclo de concentração se mantém praticamente constante. Usualmente este sistema é implantado em conjunto com o sistema aberto com recirculação. A dissipação do calor ocorre em radiadores ou em trocadores de calor refrigerados por um gás ou outro circuito de água (DANTAS, 1988). A Tabela 8 mostra o percentual da economia de água de alimentação, baseando-se na elevação do ciclo de concentração da torre de resfriamento.

Tabela 8: Ciclo de concentração x economia de água de alimentação (make-up)

Porcentagem de economia de água de make-up											
Novo ciclo de concentração (CR)											
Ciclo de concentração inicial (Ci)	2	2.5	3	3.5	4	5	6	7	8	9	10
1.5	33%	44%	50%	53%	56%	58%	60%	61%	62%	63%	64%
2	—	17%	25%	30%	33%	38%	40%	42%	43%	44%	45%
2.5	—	—	10%	16%	20%	25%	28%	30%	31%	33%	34%
3	—	—	—	7%	11%	17%	20%	22%	24%	25%	26%
3.5	—	—	—	—	5%	11%	14%	17%	18%	20%	21%
4	—	—	—	—	—	6%	10%	13%	14%	16%	17%
5	—	—	—	—	—	—	4%	7%	9%	10%	11%
6	—	—	—	—	—	—	—	3%	5%	6%	7%

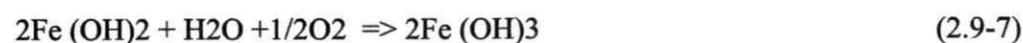
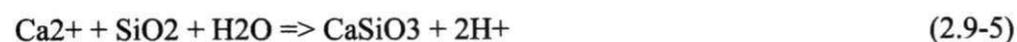
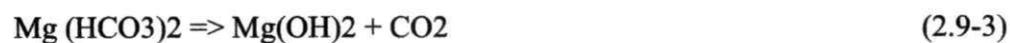
Fonte: MEIO FILTRANTE, 2003.

2.9 - Incrustação

As incrustações são produzidas pela deposição ou cristalização de sais dissolvidos na água do sistema. A temperatura, taxa de transferência de calor, cálcio, magnésio, ferro, sílica, alcalinidade, sólidos dissolvidos e pH são os fatores que interferem diretamente na formação de depósitos.

Nas águas incrustantes o aumento da temperatura provoca a transformação do bicarbonato de cálcio ou magnésio em carbonato de cálcio e hidróxido de magnésio de baixíssima solubilidade, provocando a incrustação das tubulações com crostas amorfas ou cristalinas (GENTIL, 2003).

Algumas reações que ocorrem são mostradas a seguir:



A incrustabilidade de uma água pode ser medida através de índices de estabilidade. O Índice de Langelier (IL) mede a tendência corrosiva ou incrustante de uma água. Para um dado tipo de água, a uma determinada temperatura, existe um valor de pH denominado de saturação e indicado por pHs, onde o carbonato de cálcio está em equilíbrio com o meio aquoso. O valor de pHs depende do teor de sólidos dissolvidos, da alcalinidade, da dureza cálcica e da temperatura da água.

O índice de Langelier é obtido através da diferença algébrica entre o pH medido de uma água e o pH de saturação (LANGELIER, 1936).

$$IL = pH - pHs \quad (2.9-8)$$

$$pHs = (pK_2 - pK_s) + pCa + pAlc \quad (2.9-9)$$

Onde:

pHs – pH de saturação

K₂, – constante derivada de K₂, segunda constante de dissociação do dióxido de carbono;

K_s, - constante derivada de K_s, produto da atividade do carbonato de cálcio;

pCa – cologarítmo da concentração molar de íon cálcio;

pAlc – cologarítmo da alcalinidade total expressa em equivalente g/L.

Se IL < 0 => a água é agressiva e tende a dissolver carbonato de cálcio.

Se IL = 0 => há equilíbrio de saturação, não havendo formação de crostas.

Se IL > 0 => a água é incrustante e tende a depositar carbonato de cálcio.

Outro método de avaliação do poder incrustante de uma água é devido a Ryznar e é chamado de índice de Estabilidade de Ryznar (IR). Sua definição é a seguinte:

$$IR = 2 pHs - pH \quad (2.9-10)$$

onde pHs é o pH teórico de saturação definido por Langelier, e o pH é o pH medido da água, na temperatura considerada. O índice de Ryznar indica a tendência à formação de cristais compostos de Fe(OH)₃ e CaCO₃, quando o teor de oxigênio dissolvido está acima de 4 ou 5mg/L e o pH na faixa de 7 a 8,5. A Tabela 9 mostra a correlação entre o IR e a tendência da água a ser agressiva ou incrustante.

Tabela 9: Correspondência entre o IR e a tendência à incrustação ou à agressividade

IR	Característica da água
4 a 5	Incrustação acentuada
5 a 6	Incrustação fraca
6 a 7	Equilíbrio
7 a 7,5	Agressividade fraca
7,5 a 8,5	Agressividade acentuada

Fonte: PUCKORIUS, 1983.

O Índice de estabilidade de Pockorius (IP) é calculado a partir de uma modificação dos índices anteriores e confere maior exatidão na previsão de incrustações em água de resfriamento e compatível com águas de torres a níveis de pH maiores que 7,5 e tão alto quanto 9 (GENTIL, 2003).

A determinação deste índice é feita através do seguinte cálculo (PUCKORIUS, 1983).

$$IP = 2 \text{ pHs} - (\text{pHeq}) \quad (2.9-11)$$

$$\text{pHeq} = 1,465 \times \log AT + 4,54 \quad (2.9-12)$$

onde AT = Alcalinidade total em ppm CaCO₃.

2.10 - Torre de Resfriamento

A função básica de uma torre de resfriamento de contato direto é promover contato com a água a ser resfriada e o ar do ambiente. O referido contato é obtido pela passagem da água a ser resfriada através de um recheio com o ar em fluxo ascendente ou fluxo cruzado.

Numa torre de resfriamento, a principal contribuição para o resfriamento da água é dada pela evaporação de parte da água que recircula pela torre. A evaporação da água ocorre pela transferência do calor latente de vaporização desta para o ar atmosférico. O restante do calor transferido se deve à diferença de temperatura entre os fluidos (calor sensível).

As torres de resfriamento podem também ser classificadas de acordo com o processo de fornecimento de ar, que pode acontecer via tiragem mecânica ou natural. As torres de tiragem mecânica podem ser de dois tipos: tiragem forçada, caso os ventiladores estejam na parte interior da torre ou tiragem induzida, se os ventiladores estiverem situados no topo. As torres de tiragem induzida se subdividem em duas categorias, de acordo com o fluxo de ar em relação à água, que pode ser em contracorrente ou fluxo cruzado (KERN, 1982).

O projeto em contracorrente utiliza venezianas de entrada de ar na base da torre que direcionam o ar para cima, contra água que cai sobre o enchimento. No projeto de fluxo cruzado, as venezianas são colocadas ao longo das paredes da torre, fornecendo um fluxo de ar horizontal que compreende toda sua extensão. Dessa maneira, o ar é introduzido perpendicularmente à água que cai (DREW, 1988).

A água resfriada é coletada na bacia da torre de resfriamento de onde retorna para o processo. As perdas de água no sistema são ocasionadas essencialmente pela evaporação, pelos respingos e pela purga.

Faz-se necessária a reposição das perdas que ocorrem no sistema e esta é feita com água tratada, usualmente água clarificada. A corrente de reposição também é comumente chamada de água de *make-up*. A qualidade da água de resfriamento depende, dentre outros fatores, da qualidade da água de reposição que deve possuir baixas concentrações de sais e material orgânico, bem como baixos níveis de materiais suspensos e microrganismos.

Outros fatores que devem ser controlados com certa rigidez nas correntes que fluem pela torre de resfriamento são: a incrustação, a corrosão e a proliferação de microrganismos, também conhecida como *slime*. Para manter a água de resfriamento dentro dos limites de especificação estabelecidos para estes parâmetros, além de realização de purgas, são adicionados diferentes produtos químicos com o objetivo de evitar que os contaminantes se precipitem na superfície dos equipamentos que recebem a água resfriada.

CAPÍTULO 3

3 – METODOLOGIA

3.1 - Infra-estrutura

O trabalho foi realizado com torres de resfriamento de tiragem induzida e com correntes cruzadas de ar e água. Os dados utilizados foram extraídos do histórico referente ao ano de 2014.

A Tabela 10 mostra o cronograma das etapas realizadas para conclusão deste estudo.

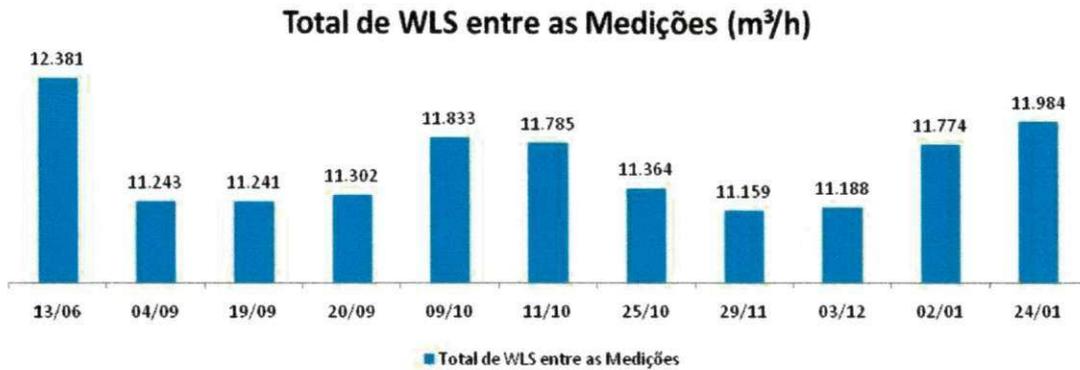
Tabela 10 - Etapas do projeto de reuso de água na indústria

1º - Definição dos principais usos e perdas de água na planta industrial (Jan a Mar/14)
2º - Racionalização do uso de água (Fev a Jun/14)
3º - Balanço de massa (Jun a Jul/14)
4º - Caracterização dos efluentes (Jul a Set/14)
5º - Avaliação dos locais potenciais para reuso e ensaios (Set/14 a Jan/15)
6º - Legislação vigente. (Dez/14)
7º - Montagem do equipamento e análises químicas (Dez/14 a Fev/15)
8º - Resultados e recomendações (Fev/15)

3.2 – Vazão de Recirculação da Torre de Resfriamento

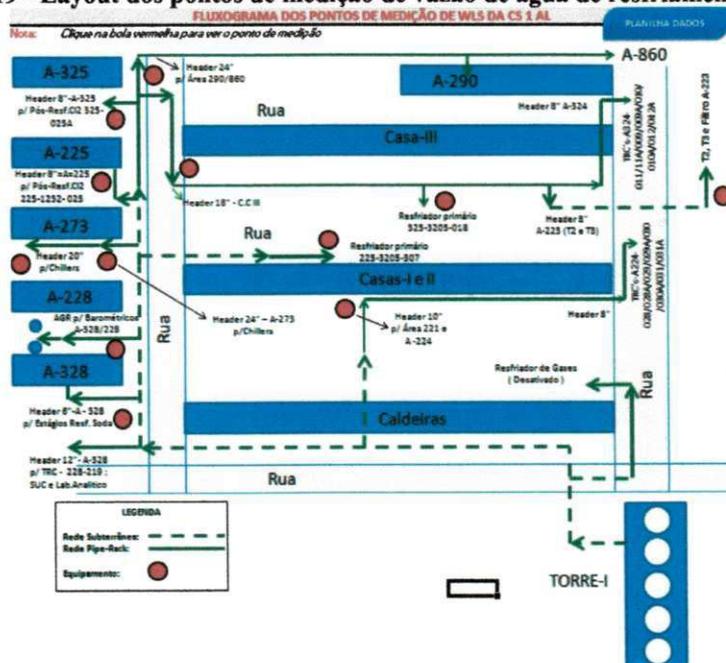
Devido a falta de instrumentação na linha de água de retorno de água de resfriamento, foram realizadas medições em todos os pontos de recebimento de água da torre de resfriamento para podermos calcular a vazão de recirculação, conforme ilustra a Figura 18. O resultado médio da vazão encontrado nas medições foram 11.500 m³/h.

Figura 18 - Medição de vazão de água de resfriamento



As medições foram realizadas em todos os pontos onde utiliza-se água de resfriamento, conforme layout ilustrado na Figura 19, onde os círculos em vermelhos são os pontos em que foi instalado o medidor de vazão.

Figura 19 - Layout dos pontos de medição de vazão de água de resfriamento



3.3 – Balanço Global de Massa

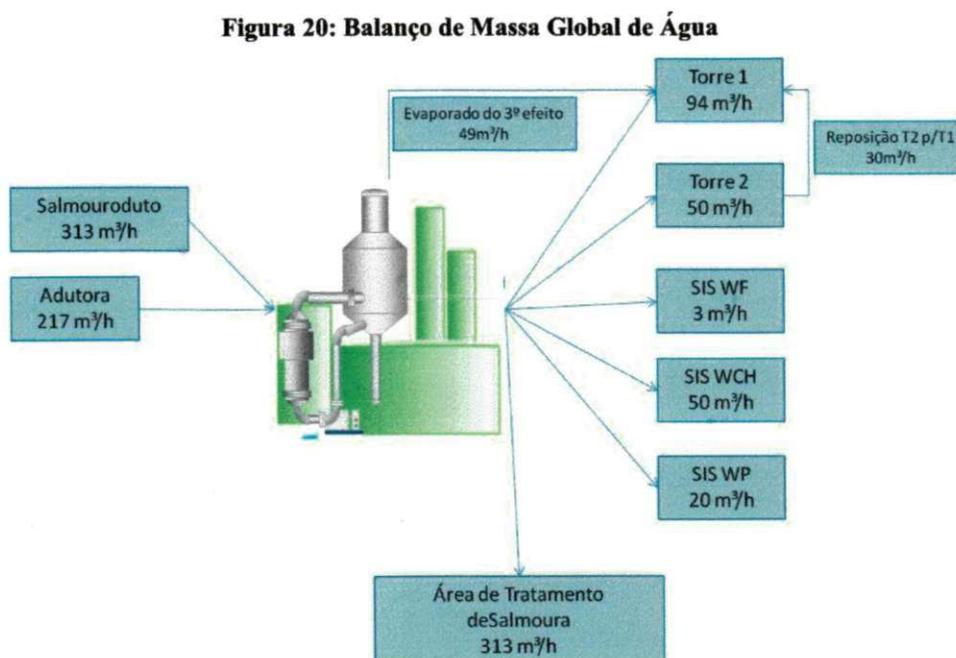
O equipamento escolhido para realização do estudo foi a torre de resfriamento 1 da unidade Cloro Soda, que consome a água oriunda da área de mineração, que dista cerca de 8,0 km da planta CS1-AL, proveniente de poços, com uma vazão máxima de 550 m³/h. A Tabela 11 mostra o consumo médio nos últimos três anos.

Tabela 11 – Consumo de água na em uma industrial de Cloro Soda

Média anual de consumo de água	m ³ /h
Ano 2012	533,8
Ano 2013	518,6
Ano 2014	529,8

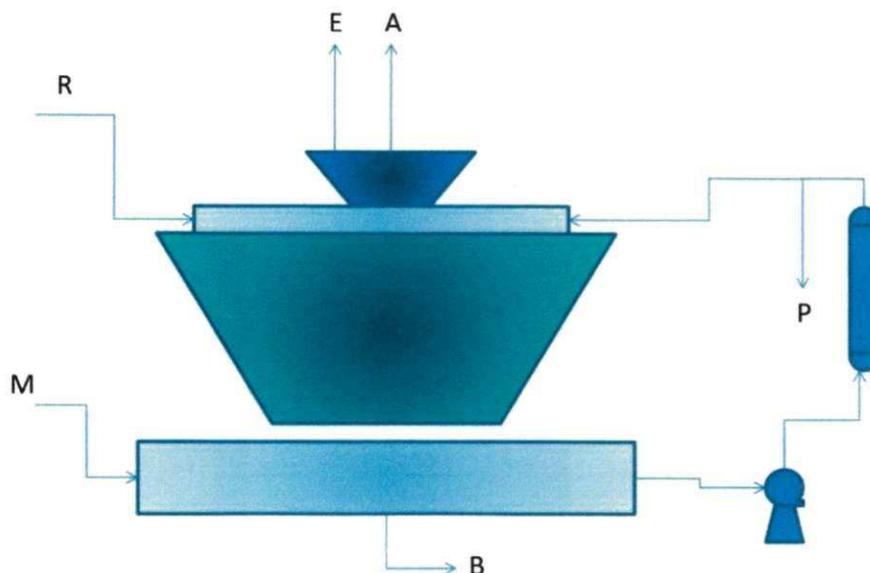
À partir da análise do balanço de massa da água na unidade Cloro Soda Alagoas, podemos concluir que 66% da água captada são direcionadas para torre de resfriamento, expurgando a vazão de salmoura. Salientando que do total de 530 m³/h, sendo 217 m³/h da adutora e 313 m³/h de salmoura.

Na Figura 20, mostra o balanço global de água na CS1-AL, baseando no consumo do ano de 2014 (ver Tabela 13):



Nesse primeiro momento, foi focado em analisar o balanço de massa da torre de resfriamento 1, que consome em média 173 m³/h de água. A Figura 21 é um desenho esquemático do balanço de massa da referida torre.

Figura 21: Balanço de Massa Global da Torre de Resfriamento



$$M + R = B + A + E + P \quad (3.3-1)$$

onde:

M : Make-up da torre 1

R: Reposição da torre 2 para torre 1

A: Arraste

E: Evaporação

B: Blow Down

P: Perdas

As perdas por arraste são, portanto, controláveis e inerente a sua fabricação. As perdas por evaporação estão sujeitas às leis físicas, dependendo das cargas térmica e das condições de clima, sem possibilidade de serem controladas pelo fabricante.

O Arraste é considerado 0,2% da vazão de circulação da torre. Então:

$$A = 0,2\% \times V = 0,002 \times 11.500 = 23 \text{ m}^3/\text{h} \quad (3.3-2)$$

A perda por evaporação:

$$E = V \times \Delta T \times \frac{c}{HL} = 11.500 \times 5,2 \times 0,0017 = 101,66 \text{ m}^3/\text{h} \quad (3.3 - 3)$$

Onde:

$c = 0,998 \text{ kcal /kg } ^\circ\text{C}$ a 40°C (calor específico da água)

$HL = 574,5 \text{ kcal / kg}$ a 40°C (Calor latente de vaporização)

O somatório dos resultados das equações (3.2-2) e (3.2-3)

$$Total = 124,66 \text{ m}^3/\text{h} \quad (3.3 - 4)$$

O objetivo de analisar a vazão de alimentação da torre de resfriamento foi devido a sua alta vazão de água, pois segundo a literatura, a vazão de água é praticamente constante ao longo da torre, pois as perdas de evaporação e por arrastes devem ser em torno de 0,2% do volume total que está circulando na torre para cada 10°C na variação da temperatura de água pela torre (CHEREMISINOFFf, 1981 apud MELO, 2008) .

Define-se make-up como sendo a reposição de água da torre de resfriamento para suprir a perda por arraste, evaporação e purga, entretanto, se no balanço global (Figura 20) ,a reposição calculada em 2014 da torre foi de $173 \text{ m}^3/\text{h}$.

Entretanto, avaliando a equação (3.2- 1) e subtraindo o volume de make up total da torre 1 com a equação (3,2-4) , teremos:

$$P + B = 48,34 \text{ m}^3/\text{h} \quad (3.3 - 5)$$

Os valores de perdas e purgas são altos para processos comuns, porém, na cloro soda tem um agravante , que é o condensado contaminado contendo presença de partículas de soda cáustica para a torre de resfriamento 1, oriundos do processo.

3.4 – Ciclo de Concentração

O Ciclo de concentração de projeto da torre de resfriamento é igual a 4, entretanto, atualmente, utilizando a equação (2.8-1) temos:

$$\text{Ciclo de Concentração} = \frac{\text{Evaporação}}{\text{Descargas+Arraste}} + 1 \quad (3.4 - 1)$$

$$\text{Ciclo de Concentração} = \frac{101,66}{48,34+23} + 1 \quad (3.4 - 2)$$

$$\text{Ciclo de Concentração} = 2,42 \quad (3.4 - 3)$$

O aumento da evaporação da água (E), maior será o Ciclo de Concentração do sistema. Por outro lado, com o aumento das descargas (D), percebemos uma diminuição nos ciclos.

Realizamos também o ciclo de concentração pela dureza total com os dados obtidos em 2014 :

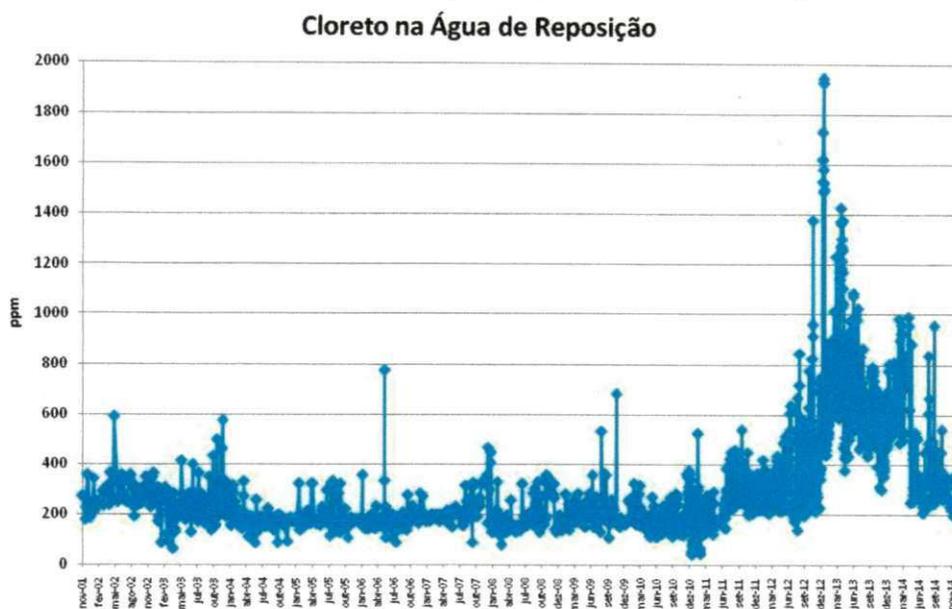
$$\text{Ciclo de Concentração} = \frac{84}{343} = 2,47 \quad (3.4 - 4)$$

Baseando-se nas informações da Tabela 8, teremos um ganho de 20% de economia de água de make-up se elevarmos o ciclo de concentração atual de 2,47 para 4, onde este é o ciclo de projeto.

3.5- Caracterização da água de reposição

Na Figura 22, mostra-se a caracterização em relação ao teor de cloreto da água de reposição da torre de resfriamento desde novembro de 2001 até novembro de 2014. Nota-se que a partir de 2012 ocorreram picos nos resultados das análises de cloreto da água da adutora que abastece a torre de resfriamento.

Figura 22 - Cloreto na água de reposição (Período de 2001 a 2014)



3.6- Caracterização da Corrente da purga da Torre de Resfriamento

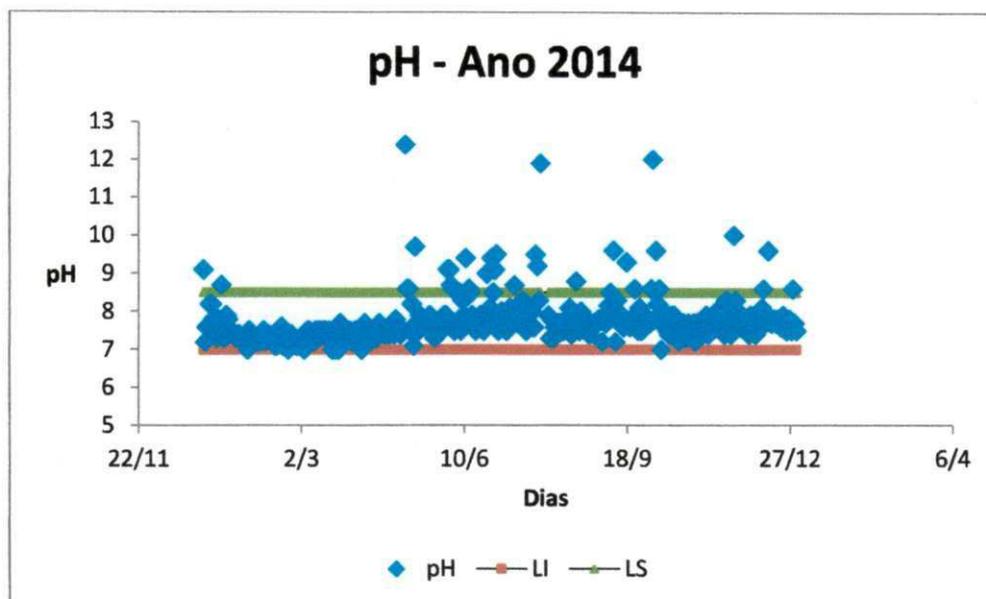
Na Tabela 12, relaciona-se os parâmetros de 2014 da torre de resfriamento, mostrando os valores mínimos, máximos e médios que ocorreram no decorrer do ano.

Tabela 12 - Parâmetros físico-químico realizado na torre de resfriamento em 2014

	Unidade	Min	Max	Média
Alumínio	ppm	0,34	2,43	1,0
Ferro	ppm	0,46	6,03	1,0
Sólidos em Suspensão	ppm	5	28	14,5
DQO	ppm	0	3	1,5
Silica	ppm	18	93,9	32,3
Sulfato	ppm	315	2175	881,9
Zinco	ppm	0,34	3,52	2,40
pH		7,0	12,4	7,8
Condutividade	µs/cm	3330	19983	7406,8
Dureza	ppm	80	300	200,6
Cloro Residual	ppm	0	3	0,8
Cloreto	ppm	819	3642	1944
Alcalinidade Total	ppm	30	570	92,4

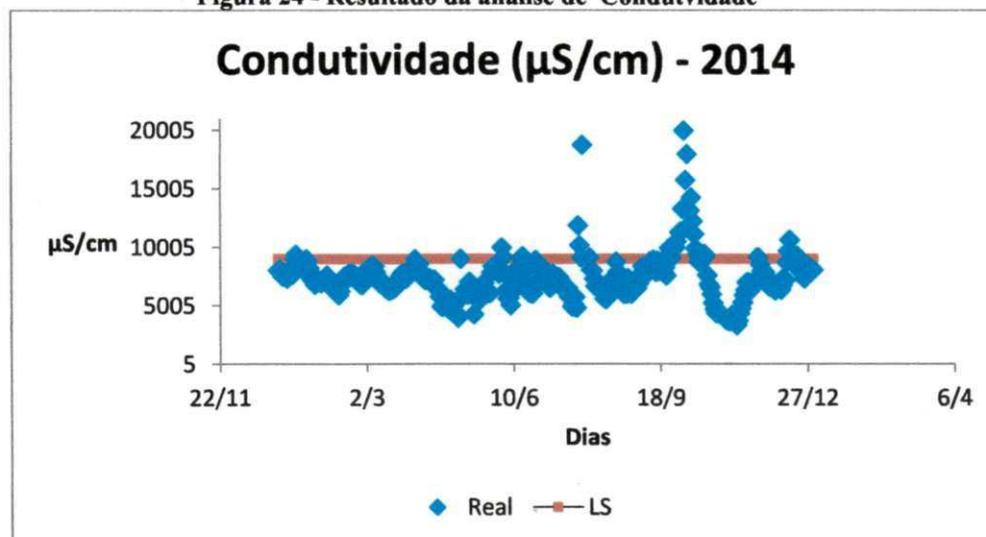
Nas Figuras 23 a 28 mostram o perfil físico-químico das amostras que foram realizadas em 2014, com seu respectivo limite superior e inferior quando aplicável.

Figura 23 - Resultado da análise de pH



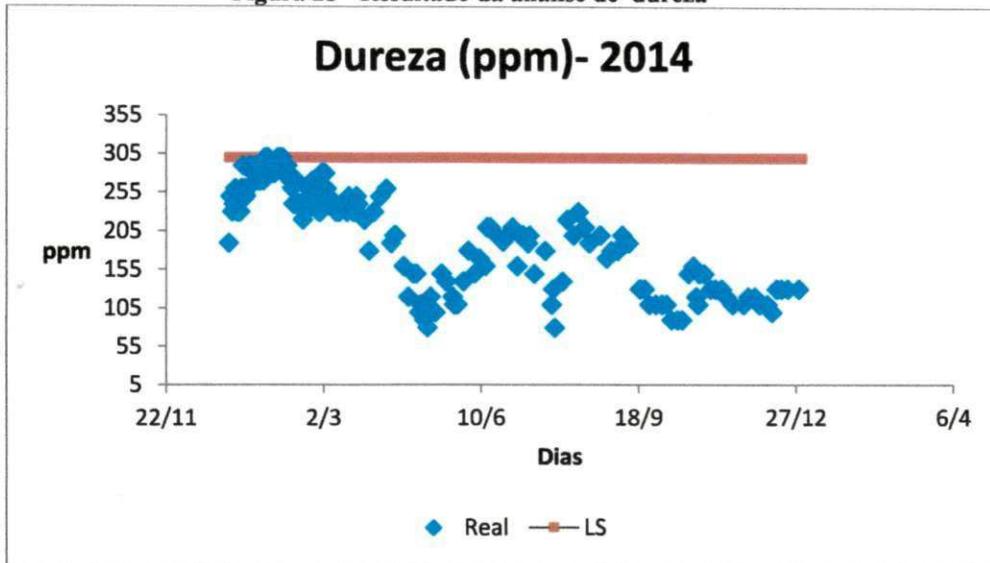
Na Figura 23, o resultado do pH tem uma variabilidade ente 7 a 8, com alguns picos que chegam a pH 13, isso se deve as contaminações ocorridas por soda cáustica.

Figura 24 - Resultado da análise de Condutividade



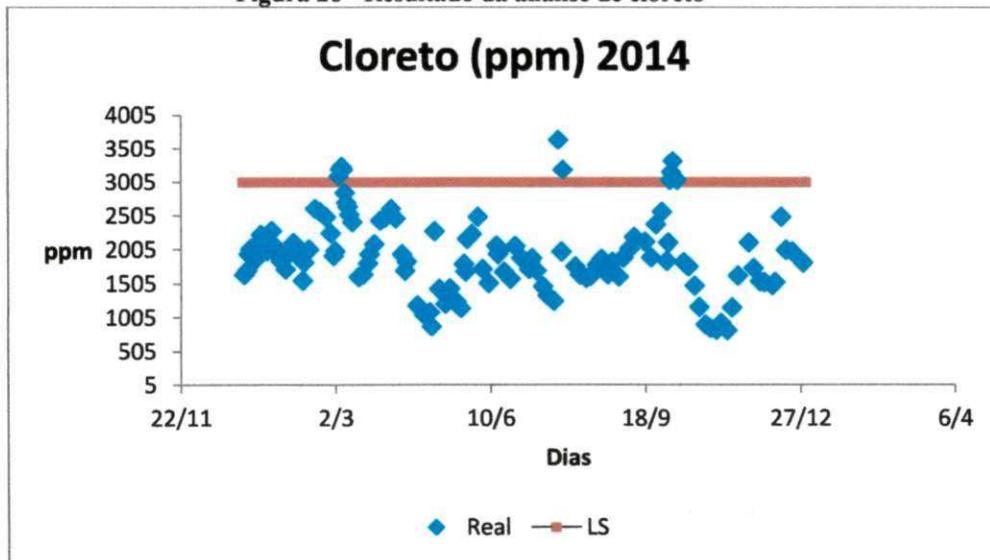
Na análise de condutividade há picos que refletem as contaminações ocorridas no período, destacando-se as mais prolongadas, Figura 24.

Figura 25 - Resultado da análise de dureza



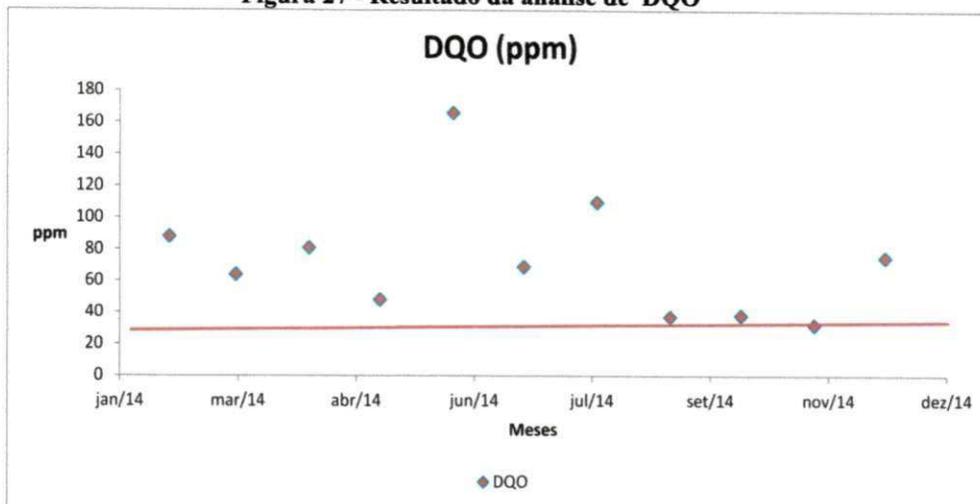
A Dureza total , Figura 25, mostra que no primeiro trimestre ocorreu um resultados acima do limite superior, onde no restante do período houve uma estabilização.

Figura 26 - Resultado da análise de cloreto



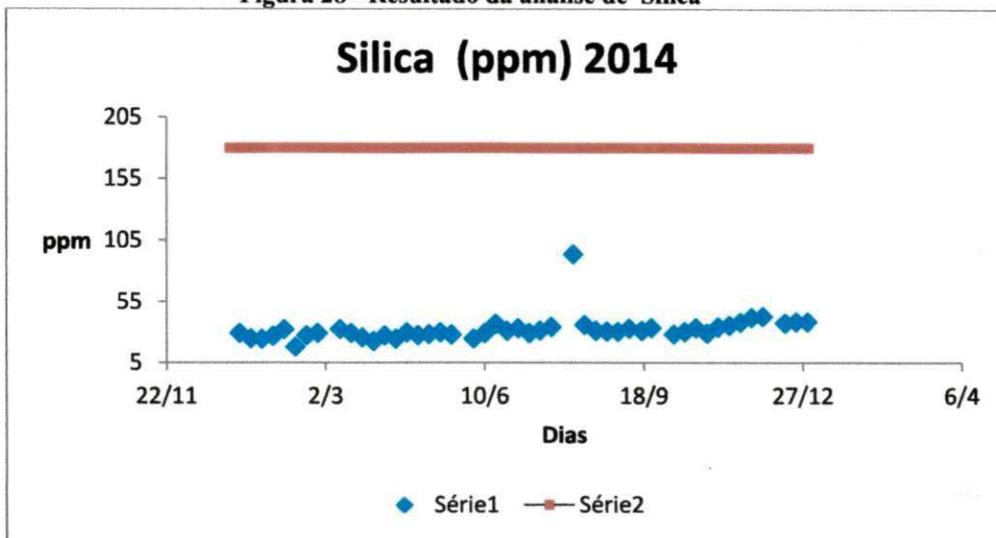
O teor de cloreto reflete a qualidade da água da adutora, devido a elevação dos teores de cloreto nos aquíferos que aqui abastecem, Figura 26.

Figura 27 - Resultado da análise de DQO



Um valor de DQO alto indica uma grande concentração de matéria orgânica e baixo teor de oxigênio, Figura 27.

Figura 28 - Resultado da análise de Sílica



Na maioria das vezes, é difícil de obter os ciclos de concentração de um sistema através da medição e cálculo das vazões de reposição, descarga, arrastes e evaporação. Assim, para um sistema de resfriamento, os ciclos são estimados através das respectivas relações de concentração de sílica, cálcio e/ou magnésio entre a água do sistema e a água de reposição. Algumas tratadora de água analisam o ciclo da torre pelos resultados da sílica. A Figura 28 mostra o perfil dos resultados em 2014.

Na Tabela 13, são mostrados os parâmetros recomendações pela empresa tratadora NALCO para a qualidade da água de resfriamento

Tabela 13 - Parâmetros físico-químico dos limites e make-up da TR1

Parâmetro	Make-Up Torre I	Limites
Turbidez (ppm)	< 1	< 30
pH	6,7	7,0 a 9,9
Condutividade (us/cm)	1194	< 9000
Alcalinidade-T (ppm)	126	< 1500
Dureza-T (ppm)	115	-//-
Dureza-Ca (ppm)	40	< 300
Cloretos (ppm)	220	< 3000
Sílica (ppm)	-	<180
Ferro (ppm)	0,7	< 5,0
Sólidos Suspensos (ppm)	-	< 45
DQO (ppm)	1	< 20

A revista SAE-SABESP publicou parâmetros recomendados a ser utilizados em água de refrigeração (Tabela 14), reforçando a necessidade de uma gestão permanente dos recursos hídricos, sendo motivada pelo programa de reuso de água, pois aproximadamente 75% de todo reuso industrial destina-se a refrigeração. Entretanto, salienta que os maiores problemas decorrentes do reuso para reposição de água de refrigeração são a tuberculização, a corrosão, os entupimentos pela proliferação

biológica, onde na Tabela 15 relata os cuidados que deve-se ter quanto a qualidade da água.

Tabela 14. Parâmetros físico-químico

	Unidade	Limite Recomendado
Alumínio	ppm	0,1
Ferro	ppm	0,5
Sólidos em Suspensão	ppm	100
Silica	ppm	50
pH		6,8-7,2
Condutividade	µs/cm	---
Dureza	ppm	650
Cloreto	ppm	500
Alcalinidade Total	ppm	350

Tabela 15. Fatores a observar quanto à qualidade da água

Fatores a Observar quanto à Qualidade da Água para Reuso Industrial

Resíduos Orgânicos	Reflorescimento bacteriológico Depósitos de limo e incrustações Escumas
Amônia	Corrosão de ligas baseadas em cobre Estímulo do crescimento microbiológico Interferência com a desinfecção
Sólidos em Suspensão	Deposições Entupimentos
Cálcio, Magnésio, Ferro, Sílica	Tuberculização

3.7- Caracterização baseando-se no Índice de Langelier e Ryznar

Em alguns compostos químicos encontramos sais, óxidos, gases, que em contato com a água solubilizam-se gerando íons positivos (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fé^{+3}) e negativos (HCO_3^- , CO_3^- , SO_4^{-2} , OH^-), e dentre este destacam-se os íons que chamamos de dureza e alcalinidade.

Com a evolução dos tempos e das necessidades de identificar a estabilidade da água, caracterizando sua tendência de ser corrosiva ou incrustante, é possível prever, se uma determinada água apresenta tendências de deposição na forma de Carbonato de Cálcio (CaCO_3), ou manter-se solúvel. O método de Langelier é definido como sendo a diferença entre o pH real da água e o pH de saturação (pH_s) dessa água. O cálculo é feito em função da dureza, devido ao cálcio (teremos CaCO_3) da alcalinidade total da água e da temperatura ($^{\circ}\text{F}$), os quais entrando em forma gráfica nos dão o pH de saturação, que nos dará determinação de índice de Langelier – IL , segundo a seguinte equação.

$$\text{IL} = \text{pH real} - \text{pH saturação.} \quad (3.7 - 1)$$

Para calcular o Índice de Langelier , plotamos em boxplot a tendência da água com os parâmetros que serão utilizados para o cálculo. A Figura 29 confirmou que a variabilidade da alcalinidade concentra-se entre 80 a 100 ppm, onde o cálculo da média também seria significativo, após análise do Boxplot .

Figura 29 - Boxplot das Análises de Alcalinidade Total

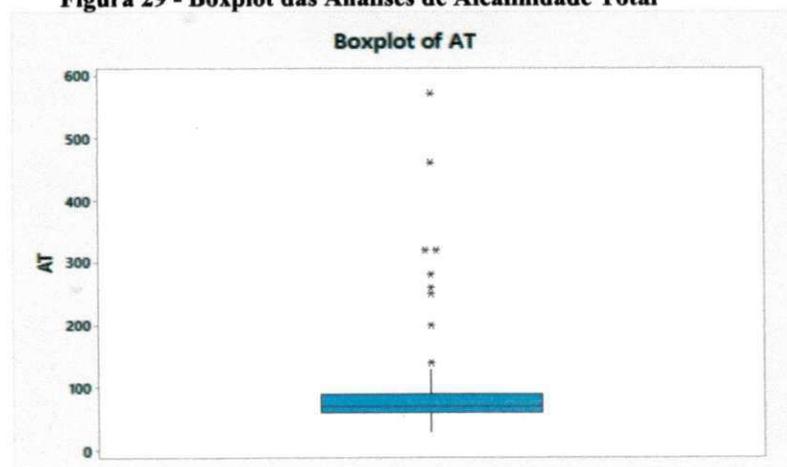
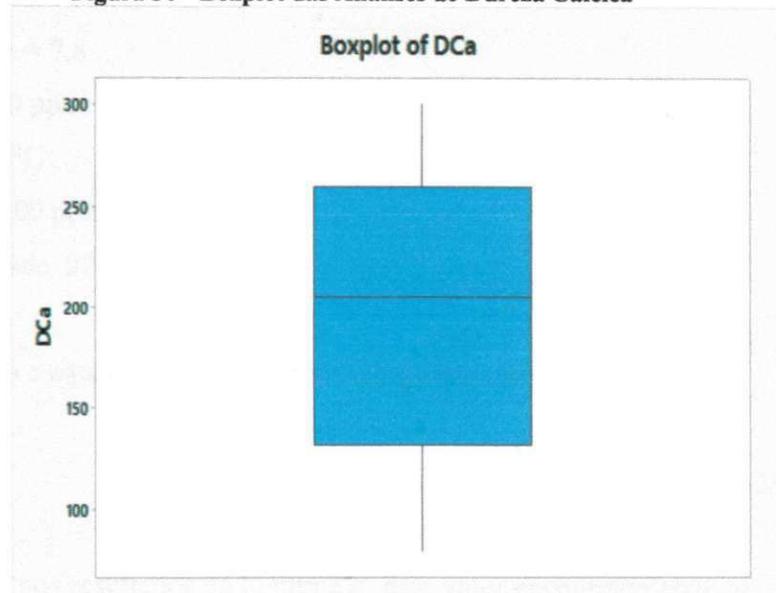


Figura 30 - Boxplot das Análises de Dureza Cálcica

Na análise de dureza há uma variação maior que a anterior, onde os valores encontrados na maioria das análises estão entre 130 a 260ppm, Figura 30.

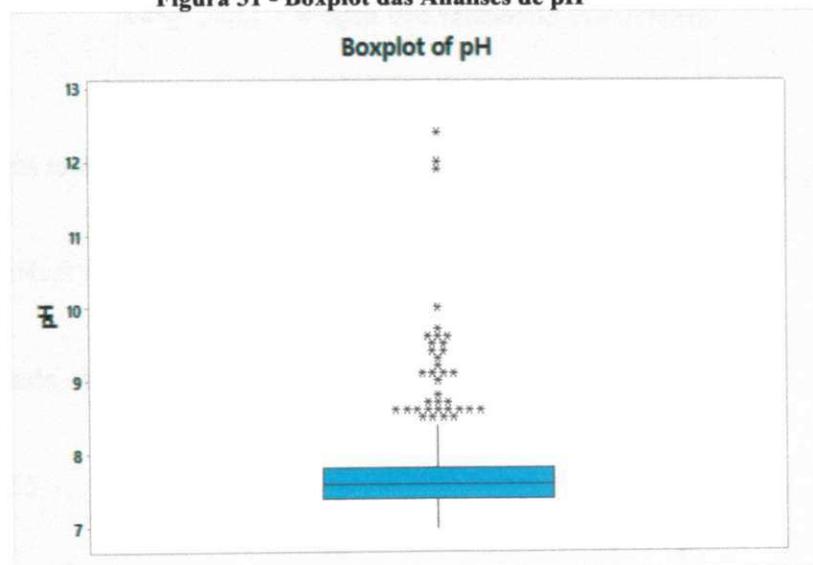
Figura 31 - Boxplot das Análises de pH

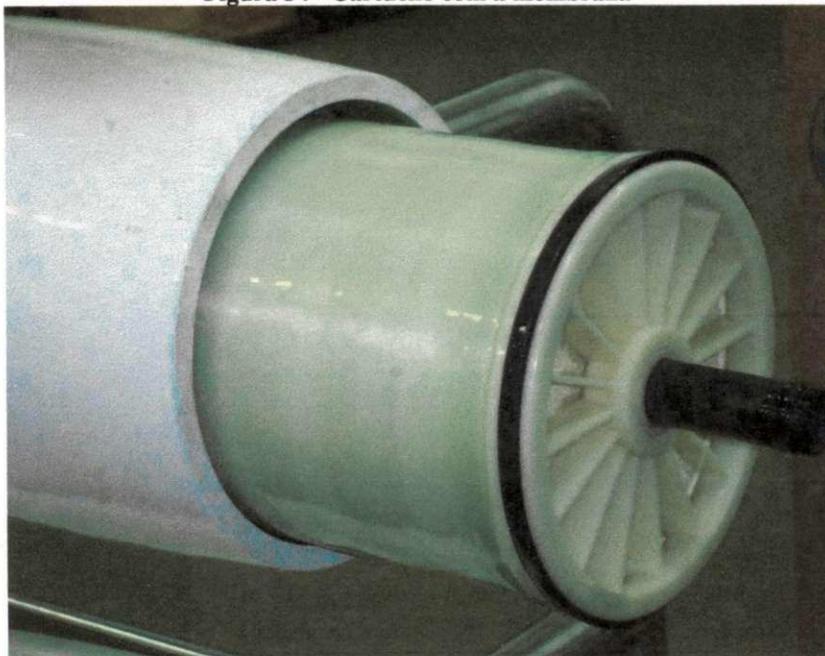
Figura 33 - Tabela do Índice de Ryznar

$RSI > 9,0$	intoleravelmente corrosiva
$7,5 < RSI < 9,0$	fuertemente corrosiva
$7,0 < RSI < 7,5$	significadamente corrosiva
$6,0 < RSI < 7,0$	ligeram. incrust. o corrosiva
$5,0 < RSI < 6,0$	ligeramente incrustante
$4,0 < RSI < 5,0$	fuertemente incrustante

3.8- Recursos utilizados:

O sistema de osmose é composto por uma membrana de 8" (Modelo Dow-Filmtec BW30-400-34i), conforme Figura 34, para avaliação da performance do sistema.

Figura 34 - Cartucho com a membrana



Na Figura 35, mostra o sistema montado para realizar o estudo. Na planta piloto montada há duas membranas, entretanto, para o presente estudo foi utilizada apenas uma membrana, pois a característica da água apresentava boas condições.

Figura 35 – Planta Piloto Osmose Reversa

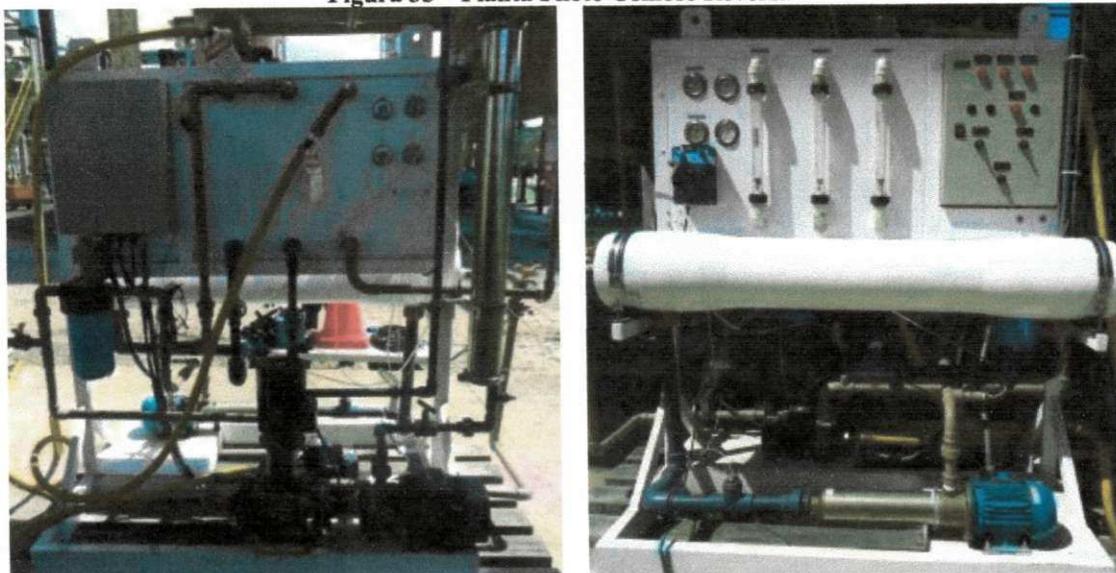
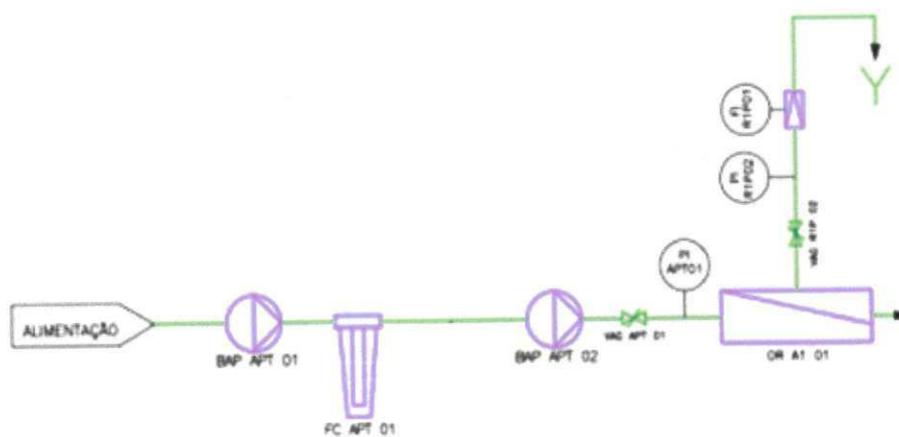
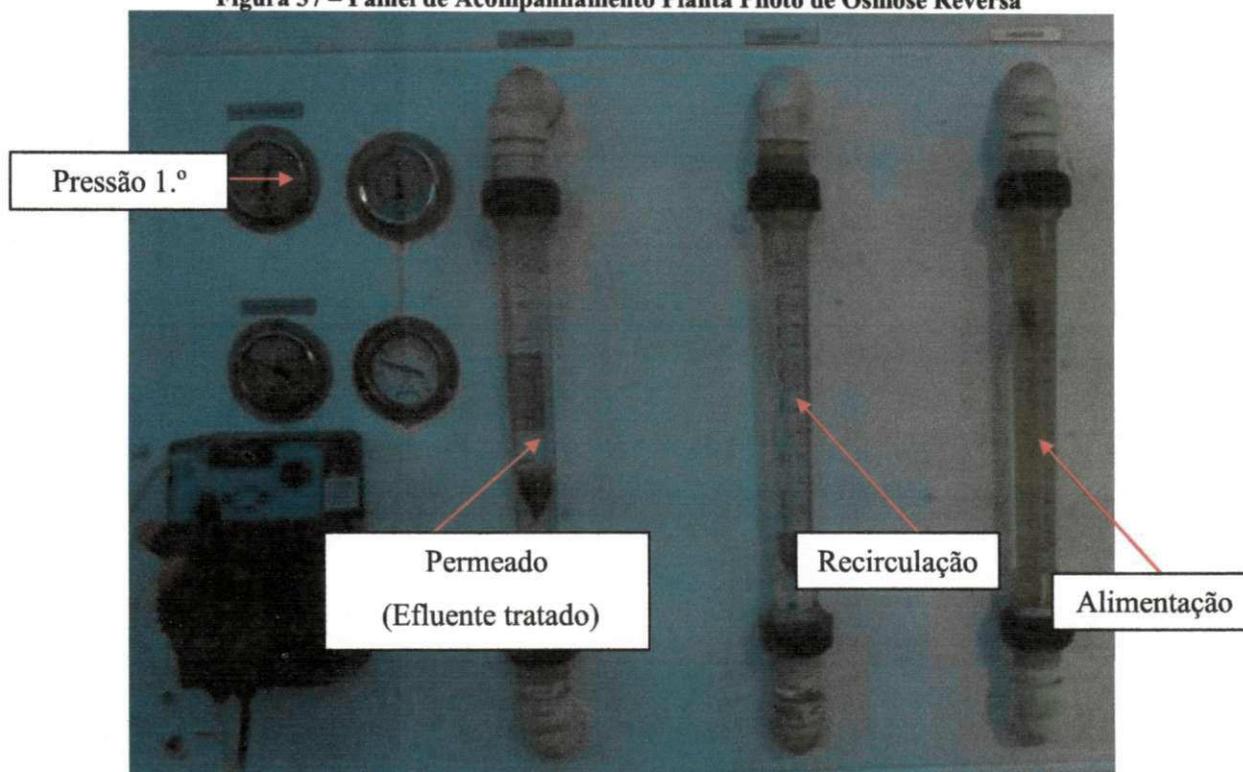


Figura 36 – Fluxograma Osmose Reversa



Na Figura 36, é representado o fluxograma da Planta Piloto montado com apenas uma membrana.

Figura 37 – Painel de Acompanhamento Planta Piloto de Osmose Reversa



Na Figura 37 ,mostra-se o painel que foi utilizado para controle de vazão do rejeito e permeado, como também da pressão do sistema.

3.9- Resultados e Discussões:

3.9.1- Resultados Analíticos da Osmose Reversa 1

Nas Tabelas 16 e 20, apresentam-se os resultados analíticos físico-químico do plano de amostragem.

Tabela 16 - Resultado da primeira análise do plano de amostragem para teste de reuso da torre de resfriamento

Plano Analítico - Sistema Piloto OR - Brakem/ Nalco				
Operação com 1.º Passe				
Parâmetro	Ponto de Amostragem			Taxa de remoção
	Entrada OR	Perm. OR 1º Passo	Rejeito OR	
Condutividade (uS/cm)	2758	46	4240	98,3%
pH (UPH)	7,3	6,4	6,7	
Cloreto (ppm)	661,6	18,21	1147,23	97,2%
Dureza Total (CaCO ₃) (ppm)	290	0	300	100,0%
Dureza Ca (CaCO ₃) (ppm)	80	0	120	100,0%
Dureza Mg (CaCO ₃) (ppm)	210	0	180	100,0%
AT (ppm)	60	5	80	91,7%
SS (ppm)	6	0	7	100,0%
Sílica (ppm)	33	1	50	98,4%
Ferro (ppm)	0,8	0,1	0,9	92,3%

Fonte: NALCO ECOLAB

Nesse primeira análise, a eficiência de retenção de contaminantes da membrana apresentou um resultado bastante significativo, cerca de 97,54%, Tabela 16

Tabela 17 - Resultado da segunda análise do plano de amostragem para teste de reuso da torre de resfriamento

Plano Analítico - Sistema Piloto OR - Brakem/ Nalco				
Operação com 1.º Passe				
Parâmetro	Ponto de Amostragem			Taxa de remoção
	Entrada OR	Perm. OR 1º Passo	Rejeito OR	
Condutividade (uS/cm)	3040	48,9	4820	98,4%
pH (UPH)	7,7	6,4	7,8	
Cloreto (ppm)	819,45	17	1390	97,9%
Dureza T. (CaCO ₃) (ppm)	285	0	480	100,0%
Dureza Ca (CaCO ₃) (ppm)	80	0	130	100,0%
Dureza Mg (CaCO ₃) (ppm)	205	0	305	100,0%
AT (ppm)	60	5	80	91,7%
SS (ppm)	6	0	5	100,0%
Sílica (ppm)	33	0	49	99,0%
Ferro (ppm)	0,8	0,0	0,9	96,1%

Fonte: NALCO ECOLAB

Nessa segunda análise, conforme Tabela 17 a eficiência de retenção de contaminantes da membrana apresentou também um resultado bastante significativo, cerca de 98,12%.

Tabela 18 - Resultado da terceira análise do plano de amostragem para teste de reuso da torre de resfriamento

Plano Analítico - Sistema Piloto OR - Braskem/ Nalco				
Operação com 1.º Passe				
Parâmetro	Ponto de Amostragem			Taxa de remoção
	Entrada OR	Perm. OR 1º Passo	Rejeito OR	
Condutividade (uS/cm)	3070	48,7	4800	98,4%
pH (UPH)	8	6,5	8	
Cloreto (ppm)	789,1	17	1341,47	97,8%
Dureza T.(CaCO3) (ppm)	290	0	470	100,0%
Dureza Ca(CaCO3) (ppm)	80	0	120	100,0%
Dureza Mg(CaCO3) (ppm)	210	0	350	100,0%
AT (ppm)	110	5	160	95,5%
SS (ppm)	7	0	6	100,0%
Sílica (ppm)	32	0	51	98,5%
Ferro (ppm)	0,8	0,1	0,9	90,7%

Fonte: NALCO ECOLAB

A Tabela 18, representa a terceira análise, a eficiência de retenção de contaminantes da membrana apresentou também um resultado bastante significativo, cerca de 97,88%.

Tabela 19 - Resultado da quarta análise do plano de amostragem para teste de reuso da torre de resfriamento

Plano Analítico - Sistema Piloto OR - Braskem/ Nalco				
Operação com 1.º Passe				
Parâmetro	Ponto de Amostragem			Taxa de remoção
	Entrada OR	Perm. OR 1º Passo	Rejeito OR	
Condutividade (uS/cm)	3070	46,7	4810	98,5%
pH (UPH)	8	6,1	7,8	
Cloreto (ppm)	819,45	17	1305,05	97,9%
Dureza T.(CaCO3) (ppm)	280	0	450	100,0%
Dureza Ca(CaCO3) (ppm)	80	0	130	100,0%
Dureza Mg(CaCO3) (ppm)	200	0	450	100,0%
AT (ppm)	110	5	160	95,5%
SS (ppm)	6	0	6	100,0%
Sílica (ppm)	33	0	51	99,0%
Ferro (ppm)	0,8	0,1	0,9	93,5%

Fonte: NALCO ECOLAB

Nessa quarta análise, a eficiência de retenção de contaminantes da membrana apresentou também um resultado bastante significativo, cerca de 98,26%, Tabela 19.

Tabela 20 - Resultado da quinta análise do plano de amostragem para teste de reuso da torre de resfriamento

Plano Analítico - Sistema Piloto OR - Braskem/ Nalco				
Operação com 1.º Passe				
Parâmetro	Ponto de Amostragem			Taxa de remoção
	Entrada OR	Perm. OR 1º e 2º Passo	Rejeito OR	
Condutividade (uS/cm)	3010	41,8	4440	98,6%
pH (UPH)	7,9	6,1	7,8	
Cloreto (ppm)	825,52	15,78	1159,37	98,1%
Fosfato (ppm)	9	0,6	10,5	93,3%
Dureza T.(CaCO3) (ppm)	280	0	410	100,0%
Dureza Ca(CaCO3) (ppm)	80	0	110	100,0%
Dureza Mg(CaCO3)ppm	200	0	300	100,0%
AT (ppm)	110	5	160	95,5%
SS (ppm)	4	0	6	100,0%
Sílica (ppm)	30,3	0,203	45,3	99,3%
Ferro (ppm)	1	0	1	97,3%
Zinco (ppm)	2,5	0,0	2,6	98,4%

Fonte: NALCO ECOLAB

Nessa quinta análise, a eficiência de retenção de contaminantes da membrana apresentou um resultado bastante significativo, cerca de 98,22%, Tabela 20. Nessa campanha, também foram analisados Fosfato e Zinco, produtos utilizados na torre para tratamento de água.

As Figuras 38 a 47, mostram-se graficamente os resultados das amostras por tipo de análise, segregando os resultados do permeado, rejeito e alimentação.

Figura 38 – Resultados Gráficos das análises de pH da entrada, permeado e rejeito

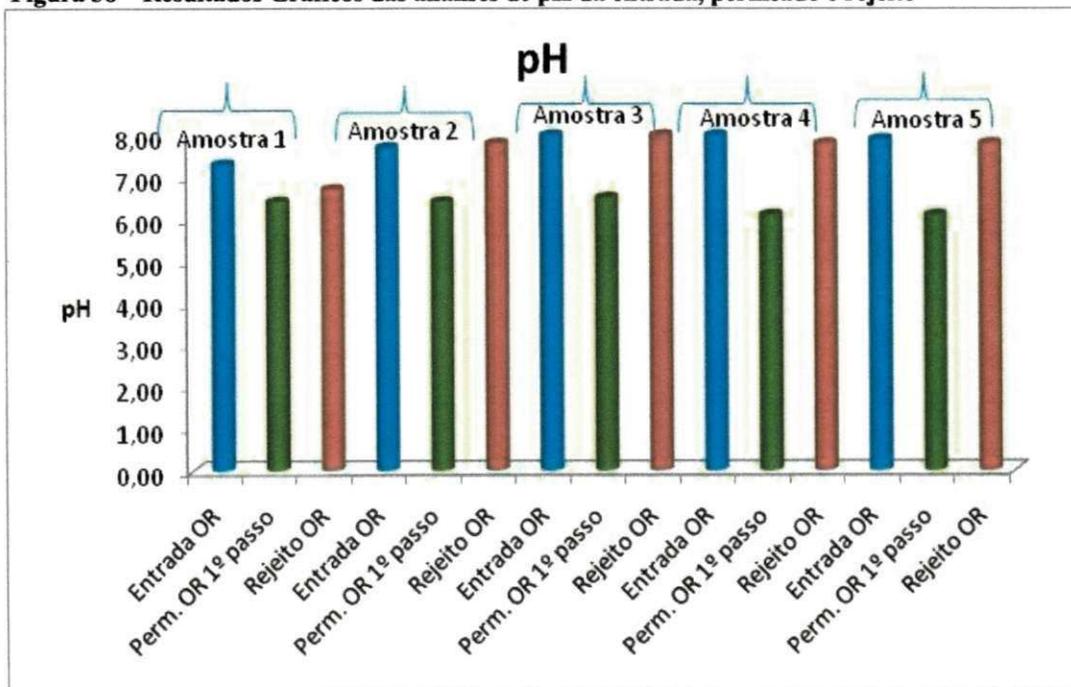


Figura 39 – Resultados Gráficos das análises de Condutividade da entrada, permeado e rejeito

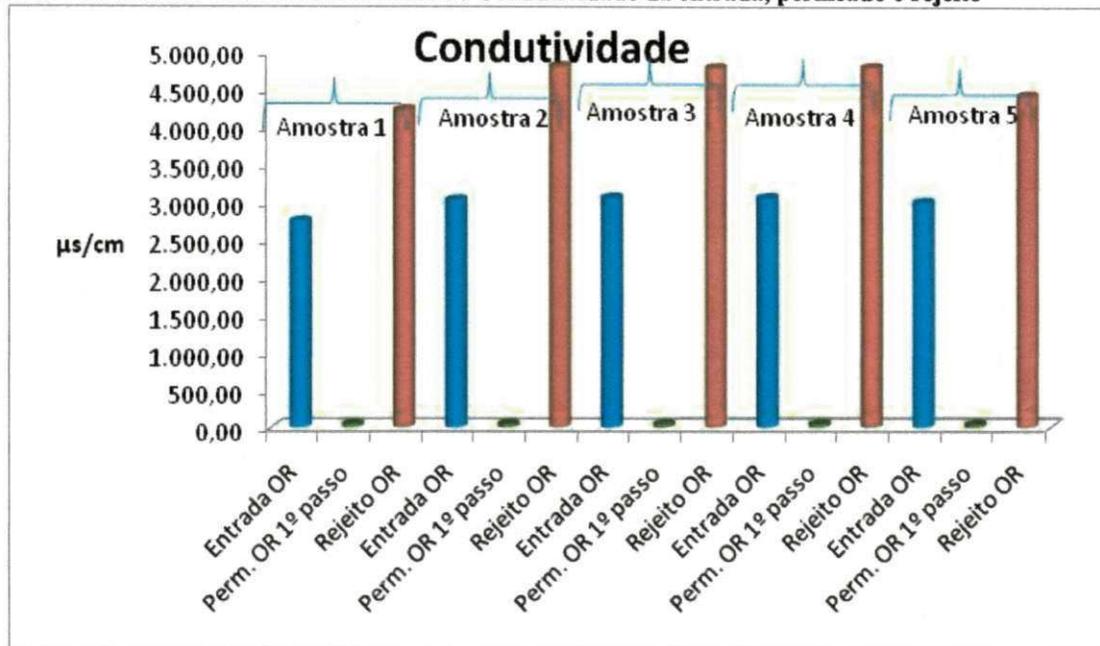


Figura 40 – Resultados Gráficos das análises de Cloreto da entrada, permeado e rejeito

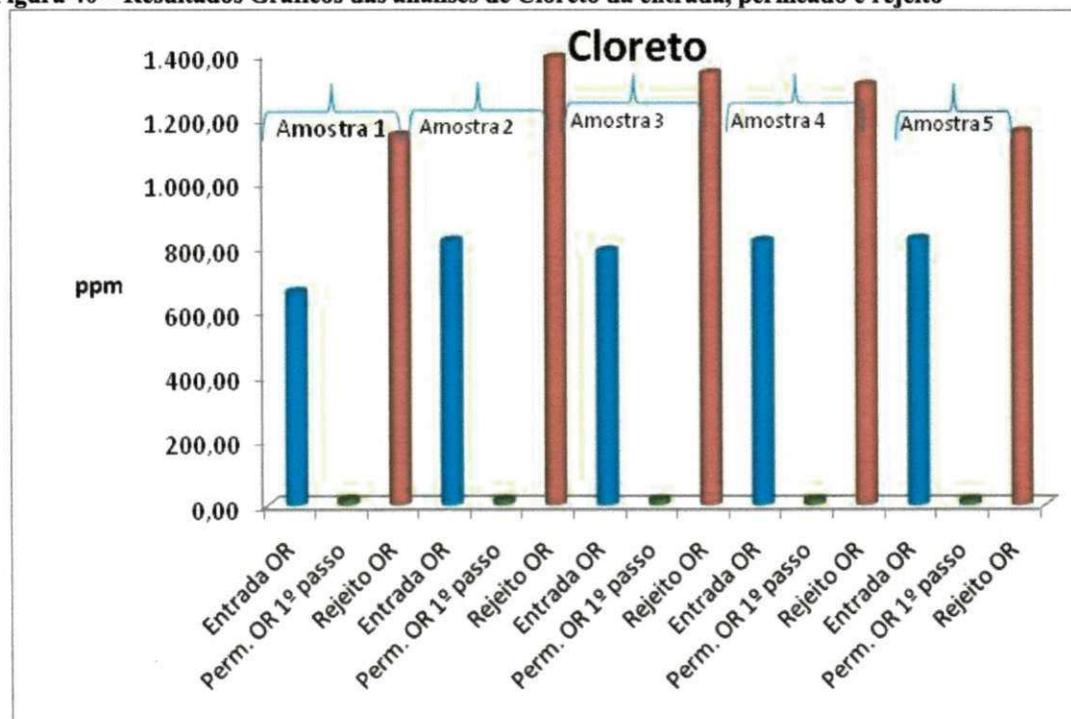


Figura 41 – Resultados Gráficos das análises de Dureza Total da entrada, permeado e rejeito

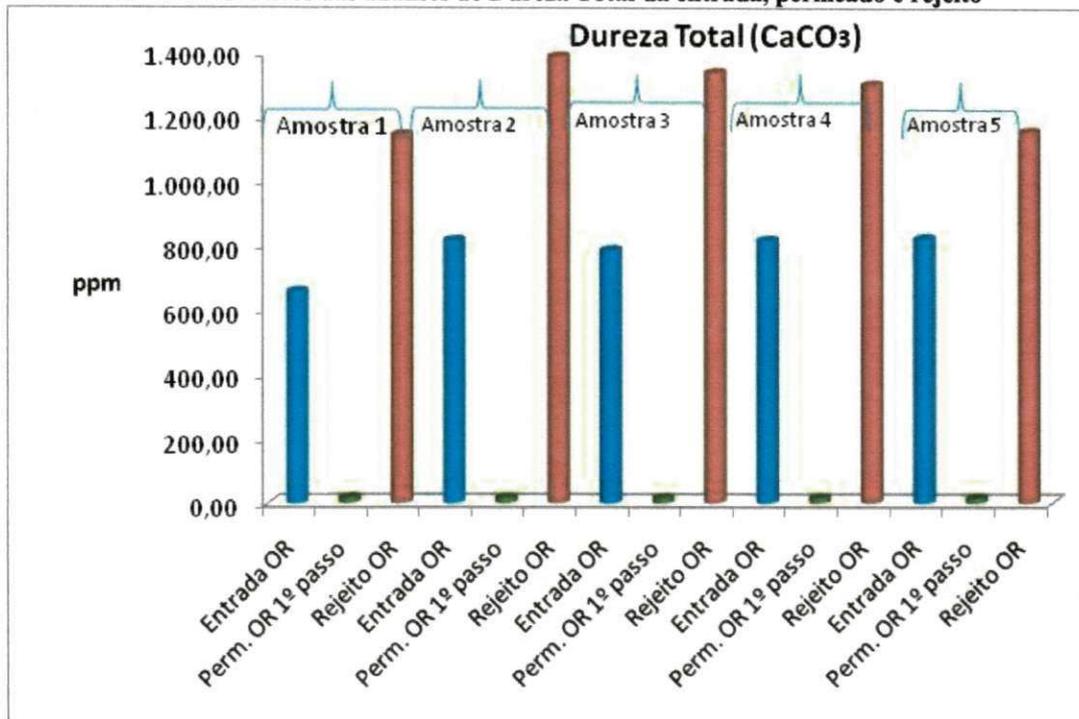


Figura 42 – Resultados Gráficos das análises de Dureza Ca da entrada, permeado e rejeito

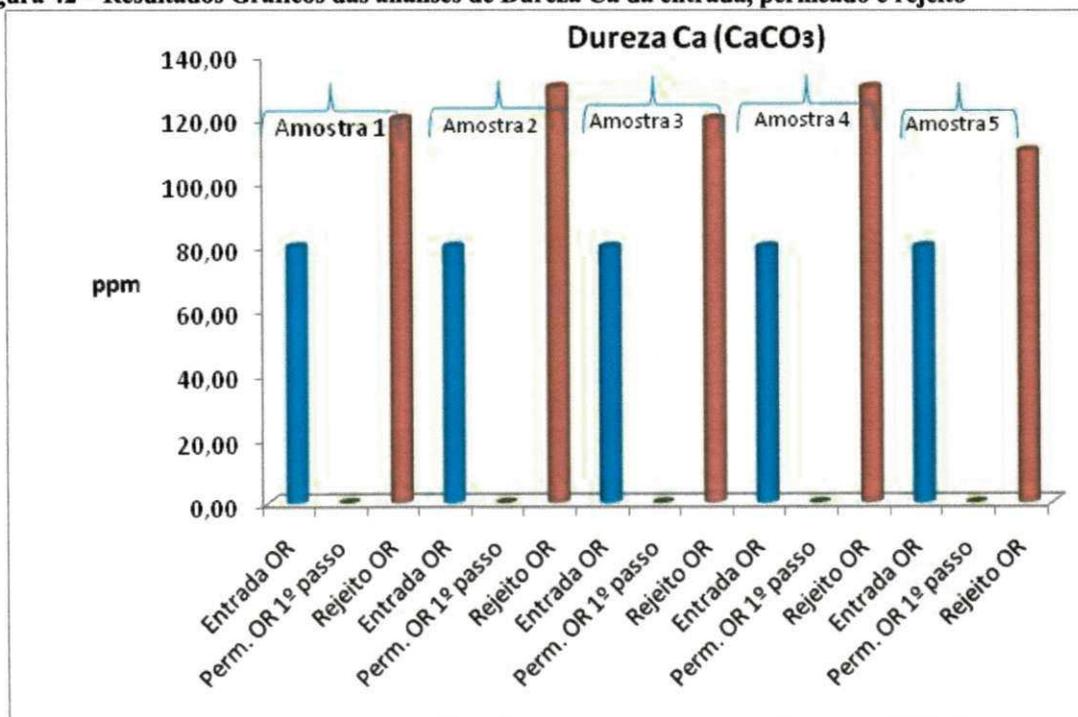


Figura 43 – Resultados Gráficos das análises de Dureza Mg da entrada, permeado e rejeito

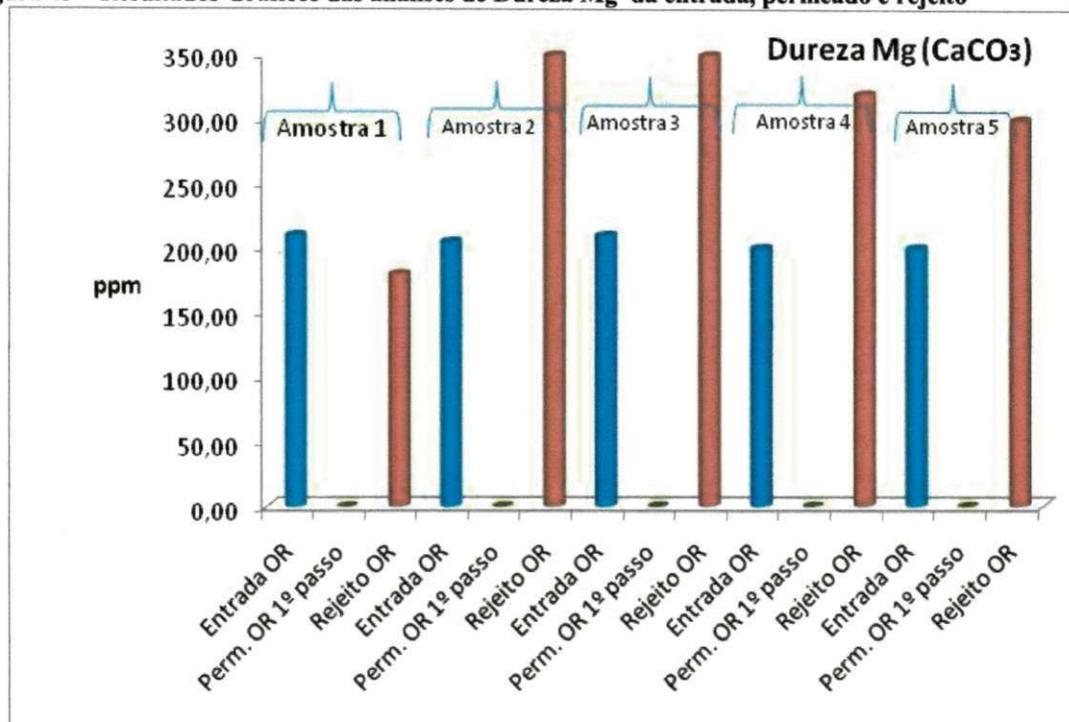


Figura 44 – Resultados Gráficos das análises de Alcalinidade da entrada, permeado e rejeito

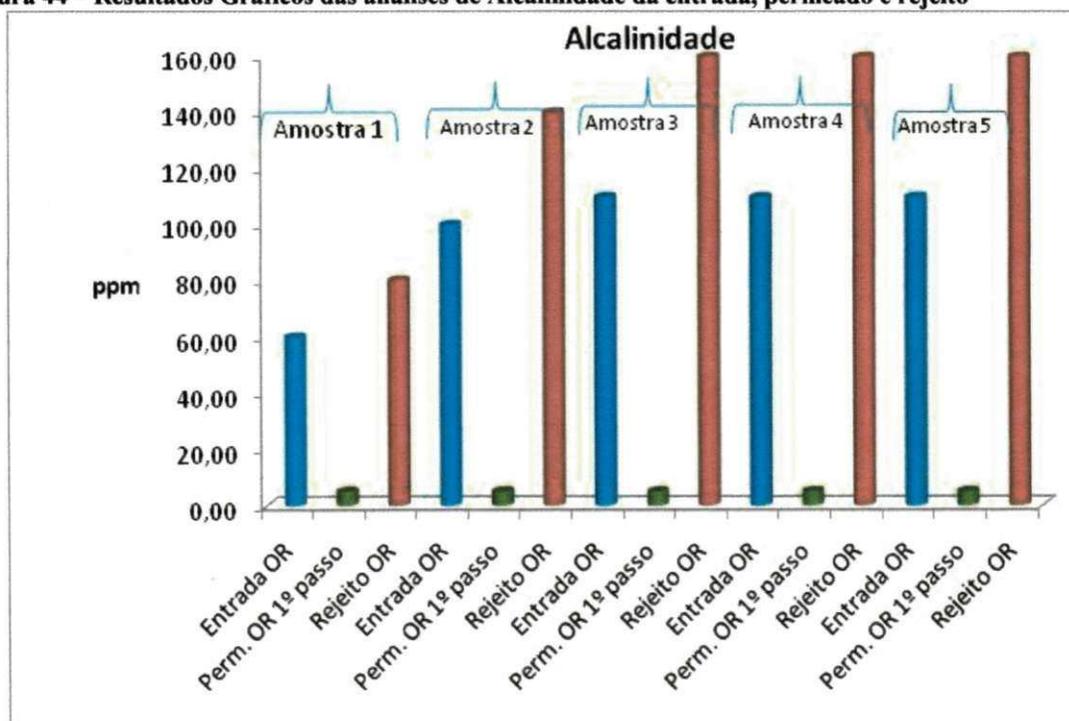


Figura 45 – Resultados Gráficos das análises de Sólidos Solúveis da entrada, permeado e rejeito

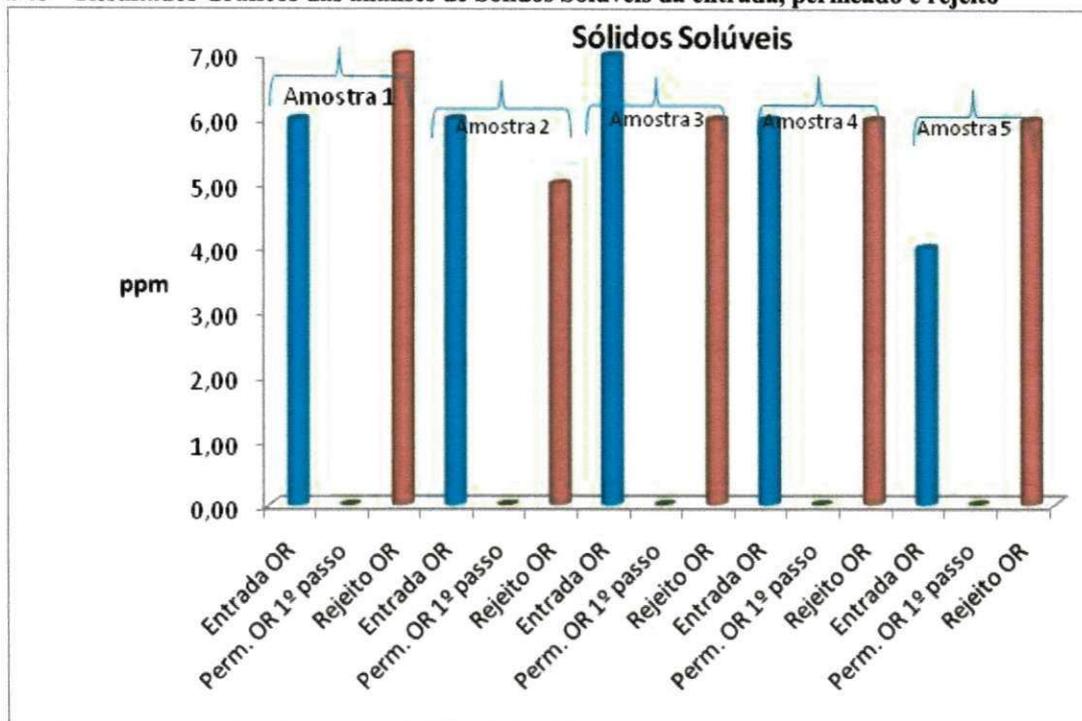


Figura 46 – Resultados Gráficos das análises de Silica da entrada, permeado e rejeito

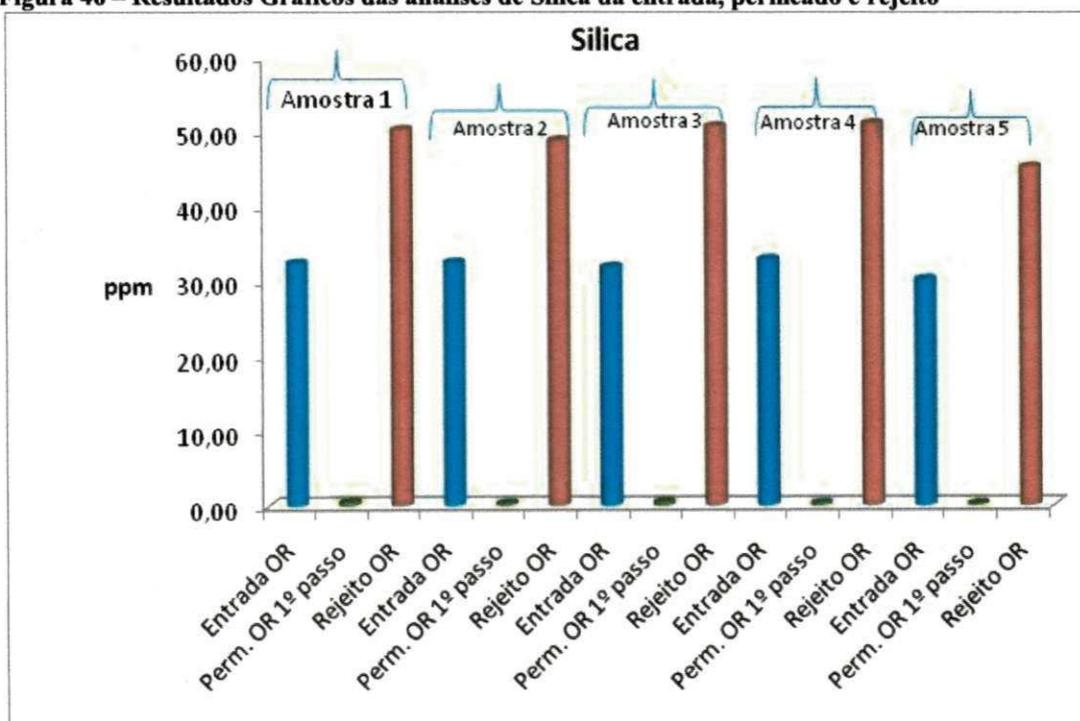
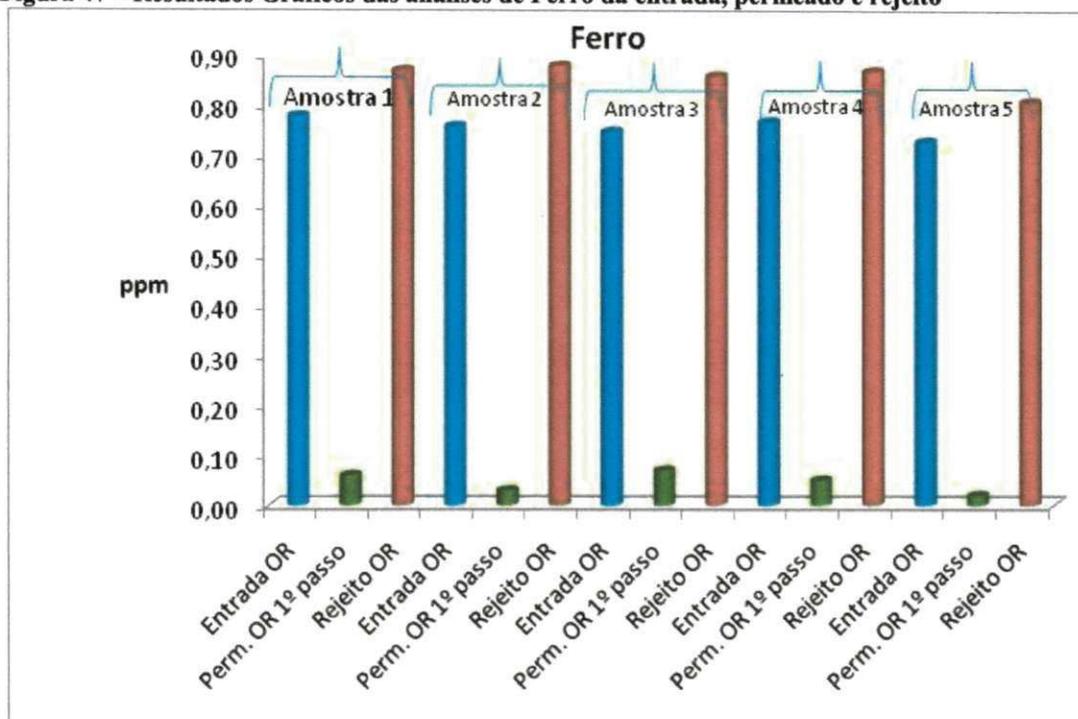


Figura 47 – Resultados Gráficos das análises de Ferro da entrada, permeado e rejeito



3.10 - Caracterização da Membrana

3.10.1 - Especificação da Membrana pelo Fabricante

- Material- Polyamide Thim Film Componte
- Tipo- água salobra, água industrial
- Produto - BW30-400/34i / Número de peça - 248151
- Área de Atividade - 37 m²
- Fluxo do permeado - 40 m³/d
- Diâmetro Nominal - 8"
- Média percentual de rejeição NaCl- 99.50 %
- Percentual de rejeição NaCl - mínimo 99.00 %
- Média percentual de rejeição MgSO₄ - 0.00 %
- KPa Pressão máxima - 4136.87
- Psi Pressão máxima- 600
- Temperatura máxima -45.0°C (113°F)
- Membrana Área Ativa ft² 400 ft² (37,1 m²)

3.10.2 - Limites de Operação Especificado na Membrana

- Temperatura máxima de operação - 113°F (45°C). Em operação contínua com o pH 10 a temperatura ficará estabelecida em 95°F (35°C)
- Pressão máxima de operação - 41 bar
- Queda de pressão máxima - 1, 0 bar
- Operação contínua - pH range - 2 - 11
- Fluxo de alimentação máximo - 19 m³/h
- Tolerância Cloro livre - <0,1 ppm. (sob certas condições, a presença de cloro livre e outros agentes oxidantes causará falha prematura de membranas. Como o dano de oxidação não é coberto pela garantia, Dow recomenda a remoção por pré-tratamento antes da exposição da membrana)
- Permeiam a 80 por cento de recuperação.

3.11 - Análises Físico-Químicas - Método Analítico realizado no plano de teste

As análises realizadas no laboratório da NALCO tem como referência o Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater - 21st editions - 2005, reference 2510 B.

a) Condutividade

- Condutímetro / STD Célula de condutividade constante K = 1,0;
- Faixa de resultados - verificar especificação do equipamento utilizado.

$$1 \mu\text{S/cm} = 1 \mu\text{mhos/cm}$$

$$1 \text{mS/cm} = 1000 \mu\text{S/cm}$$

b) pH

- O princípio básico da medição de pH por eletrodo é a medição do potencial hidrogeniônica de uma solução, a qual é medida em milivoltagem (mV) e convertida em pH, ou seja, em concentração de H⁺;
- pH portátil ou de bancada com eletrodo de medição de pH;
- Faixa de resultado -v0 - 14 unidades de pH;

c) Cloreto

- Cloreto pode ser titulado com uma solução de nitrato de prata em pH neutro ou levemente alcalino (pH 7 a 10), dando origem a um precipitado branco de cloreto de prata. O indicador de ponto final é o início da precipitação do cromato que forma com o nitrato de prata, um precipitado vermelho - tijolo um pouco mais solúvel que o cloreto de prata;
- Nota- Solubilidade do cloreto de prata = $2,4 \times 10^{-3} \text{g/L}$;
- Solubilidade do cromato de prata = $2,3 \times 10^{-2} \text{g/L}$;
- Faixa de resultado -limite de detecção - 2 mg/L como NaCl / 0,1 mL de titulante

d) Sólidos Suspensos

- Sólidos Suspensos Totais - uma porção de amostra homogênea é filtrada a vácuo com membrana de 0,45 μ , o resíduo retido é seco em estufa à temperatura de 103 à 105°C. O incremento de massa representa os sólidos suspensos totais. Se a suspensão dificultar a filtração e o tempo de filtração for muito prolongado, diminuir o volume de amostra. Para obtenção de uma estimativa dos sólidos suspensos da amostra, calcular a diferença entre o sólidos totais dissolvidos e sólidos totais.
- Sólidos Fixos e Voláteis - O resíduo proveniente da determinação de sólidos suspensos é levado a queima até massa constante a 550°C. Os sólidos remanescentes após a queima representam os suspensos fixos, enquanto a massa perdida representa os sólidos voláteis.

- Faixa de resultados - Sólidos Suspensos Totais, Fixos e Voláteis a partir de 5,0 mg/L.

e) Alcalinidade

- Os íons de hidroxila presentes numa amostra como resultado de dissociação ou hidrólise de solutos reagem com adições de ácido padrão. A alcalinidade assim, depende do pH do ponto final usado. A fenolftaleína ou roxo de metacresol podem ser usados para titulação de alcalinidade para pH 8.3.
- Faixa de Resultados- Ilimitada. Limite de Detecção (LD): 2,0 mg/L (ppm) como CaCO₃.

f) Dureza Total, Dureza Ca, Dureza Mg

O método colorimétrico para medição de dureza suplementa o método convencional titulométrico, porque ele é capaz de medir níveis muito baixos de cálcio e magnésio. Alguns interferentes metálicos no método colorimétrico se tornam inconsequentes quando da diluição da amostra para trazer sua concentração ao range desse teste. O indicador corante é calmagita que forma um azul – púrpura numa solução extremamente alcalina muda para vermelho quando reage com cálcio ou magnésio. Determinações de cálcio e magnésio são feitas então quelando o cálcio com EGTA para destruir a cor vermelha final do cálcio e então a chelação do cálcio e magnésio com EDTA para destruir a cor vermelha final de ambos (cálcio e magnésio). Por medida da cor vermelha em diferentes estados, as concentrações de cálcio e magnésio são determinados. O teste é realizado e medido em comprimento de onda de 522 nm.

Faixa de Resultados: 0,05 à 4,00 mg/L de Ca e Mg como CaCO₃ Limite de Detecção: 0,05 mg/L como CaCO₃

g) Zinco

O zinco e outros metais da amostra são complexados com cianeto. A adição de ciclohexano ocasiona uma liberação seletiva do zinco. O zinco então reage com o indicador 2 carboxi- 2 hidróxi- 5 sulfoformasil benzeno. A concentração de zinco é proporcional a coloração azul resultante. Para determinação de zinco total é necessário uma digestão ácida da amostra. Os resultados são medidos a 620 nm.

Faixa de resultados : 0,01 à 2 mg/L

h) Sílica

Sílica e fosfato na amostra reagem com íon de molibdato sob condições ácidas para formar complexos amarelos do ácido silicomolibdico e fosfomolibdico. A adição do ácido cítrico destrói, preferencialmente, os complexos de fosfato. A intensidade de cor amarela é proporcional a concentração de sílica "reativa-molibdato". Há uma pequena parcela de suas formas, sílica que não reage com o molibdato embora seja capaz de passar através de papel de filtro a não causar turbidez. A ocorrência de sílica não reativa em águas naturais ainda não é amplamente conhecida, termos semelhantes como "coloidal", "cristaloidal" e "iônico" têm sido usados para distinguir dentre várias formas de sílica, mas certas terminologias não podem ser evidenciadas. Sílica "não reativa-molibdato" pode ser convertida para a forma "reativa - molibdato" por aquecimento ou fusão com alcalis. Reativo-molibdato ou não reativo-molibdato não significa reatividade ou falta de reatividade para outros reagentes ou processos.

Faixa de resultados de Sílica alto teor: 1,0 a 75,0 ppm sílica (como SiO₂)

Faixa de resultados de Sílica baixo teor: 0 a 1,6 ppm sílica (como SiO₂)

i) Fosfato

O ortofosfato (no método molibdovanadate reage com o molibdênio em meio ácido, produzindo um complexo fosfomolibdico. Na presença de vanádio, o ácido vanadomolibdofosfórico amarelo é formado. A intensidade de coloração amarela formada é proporcional a concentração de fosfato. O resultado é medido a 430 nm.

Faixa de resultados 0,3 à 45,0 mg/L PO₄.

3.12 - Cálculo da Eficiência de Retenção dos Contaminantes

A eficiência de retenção dos contaminantes foi determinada em função da razão do contaminante existente no permeado com o contaminante existente na alimentação:

$$\text{Eficiência de retenção (\%)} = \left[1 - \left(\frac{\text{Resultado do permeado}}{\text{Resultado da alimentação}} \right) \right] \times 100 \quad (3.12-1)$$

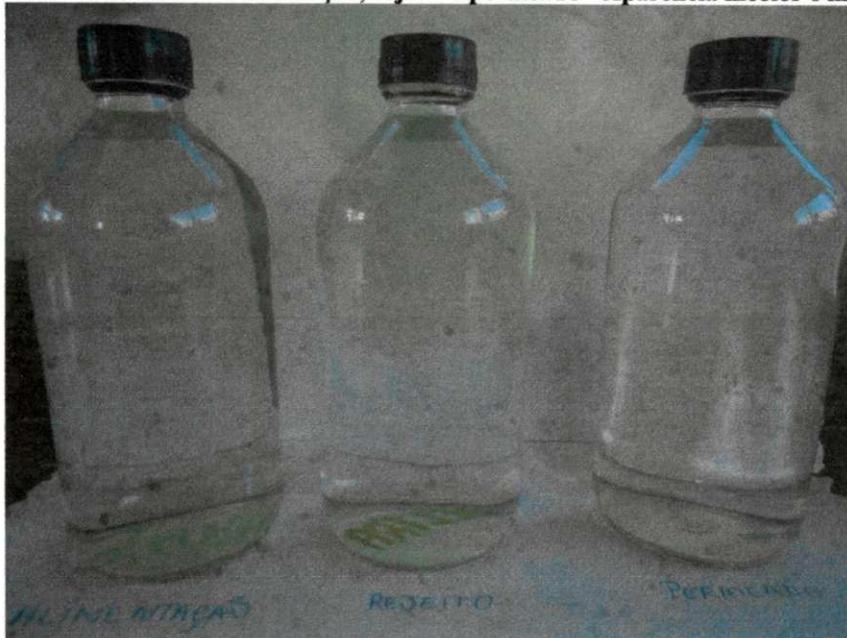
A eficiência de retenção dos contaminantes foi de 98,2%.

3.13 - Análises dos Resultados

Foram realizadas cinco amostragem em dias diferentes, sendo que a última amostra houve um campanha maior. Como podemos observar nas Figuras que ilustram os resultados, há uma redução significativa dos contaminantes comparando a água de alimentação da OR e o permeado.

O sistema de osmose reversa operou com passe único, com pressão de 10 kgf/cm² g, a vazão de entrada de 2,0, m³/h e rejeito com 35%. A vazão obtida no permeado equivale a 70% da vazão do rejeito, onde o rejeito da torre tem uma aparência incolor e inodoro, conforme Figura 48.

Figura 48 - Amostras da alimentação, rejeito e permeado - Aparência incolor e inodoro



A taxa de remoção de sais dissolvidos, utilizando a equação (3.12-1) que avalia a eficiência de retenção em percentual obteve uma média de 98,2%. Em todos os resultados, o permeado ficou isento de dureza total e de sólidos totais. O rejeito dos resultados está dentro dos parâmetros estabelecidos como de projeto da torre de resfriamento, isso se deve a água de alimentação de qualidade durante a realização deste trabalho.

O impacto para reduzir a vida útil da membrana seria a sílica, porém, os resultados apresentados não teriam problema algum, pois os teores estão muito abaixo do limite superior exigido pela especificação da membrana (150 ppm). Outro fator crítico é o Cloro residual, uma vez que teria de ser realizado um pré tratamento para neutralizar, como por exemplo, o metassulfito de sódio ou o bisulfito de sódio, devido a especificação da membrana estipular que o teor de cloro livre deverá ser menor que 0,1 ppm, pois ele age como agente oxidante energético, podendo afetar a maioria das membranas, sendo nestes casos, necessária a decoloração da água bruta.

Entretanto, os fenômenos como *fouling*, não foram observados como fatores significativos durante 16 horas de operação da osmose reversa.

Outras causas listadas abaixo, podem alterar o desempenho e o tempo de vida das membranas utilizadas como osmose reversa, como por exemplo, o pH, onde a operação

padrão sugere 8,0. Com relação a temperatura, não há restrições, pois a temperatura de água de retorno da torre não ultrapassa 35°C, onde a especificação da membrana é 45°C.

As incrustações na malha de membrana são devido a água bruta precipitar dureza temporária, carbonato de cálcio e hidróxido de magnésio, e dureza permanente, sulfato de cálcio. A dureza temporária é impedida de precipitar, trabalhando-se com valores de pH da água bruta entre 4,5 – 5,0. A dureza permanente é impedida de precipitar, dosando-se continuamente, um antiincrustante específico para sulfato de cálcio.

O pré-tratamento do sistema de OR é constituído por filtração multimédia, filtros de cartucho de 5-um, bissulfito de sódio e anti-incrustante.

O teor de ferro apresentado também foi bastante satisfatório, pois o limite máximo para água potável é de 0,3 ppm, onde nos resultados foram menores que esse.

CONCLUSÕES

A taxa de remoção de sais dissolvidos avalia a eficiência de retenção da membrana, em valor percentual obtendo-se uma média de 98,2%. Em todos os resultados o permeado ficou isento de dureza total e sólidos totais.

Os resultados físico-químico do rejeito estão dentro dos parâmetros estabelecidos, de acordo com o projeto da torre de resfriamento, isso se deve a boa qualidade da água de alimentação, durante a realização deste trabalho.

O impacto para reduzir a vida útil da membrana seria a sílica, porém, os resultados apresentados não teriam problema algum, pois os teores estão muito abaixo do limite superior exigido pela especificação da membrana (150 ppm). Também foi instalado no sistema de OR, filtros tipo cartucho, a montante da membrana.

Fator crítico é o cloro residual, uma vez que se teria de realizar um pré tratamento para neutralizá-lo. Como exemplo de neutralizante há o metabissulfito de sódio, que é conhecido comercialmente como bissulfito de sódio, devido a especificação da membrana estipular que o teor de cloro livre deverá ser menor que 0,1 ppm; ele age como agente oxidante energético, podendo afetar a maioria das membranas, por isso há necessidade da decoloração da água bruta.

Os fenômenos como fouling não foram observados como fator significativo durante 16 horas de operação da osmose reversa.

Um fator relevante é que a purga da torre de resfriamento é realizada pela header de retorno, e não pela bacia de água fria, assim são evitados quantidades significativas de sólidos em suspensão.

O pH, onde a operação padrão especificado pela membrana sugere um range de 2 - 11, nesse caso, obtivemos resultados médios de um pH de 8,0 em 2014. Com relação a temperatura, não há restrições, pois a temperatura de água de retorno da torre não ultrapassou 35°C, onde a especificação da membrana são 45°C.

O teor de ferro apresentado também foi bastante satisfatório, pois o limite máximo para água potável é de 0,3 ppm, uma vez que os resultados obtidos foram menores que o estabelecido em torres de resfriamento.

RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

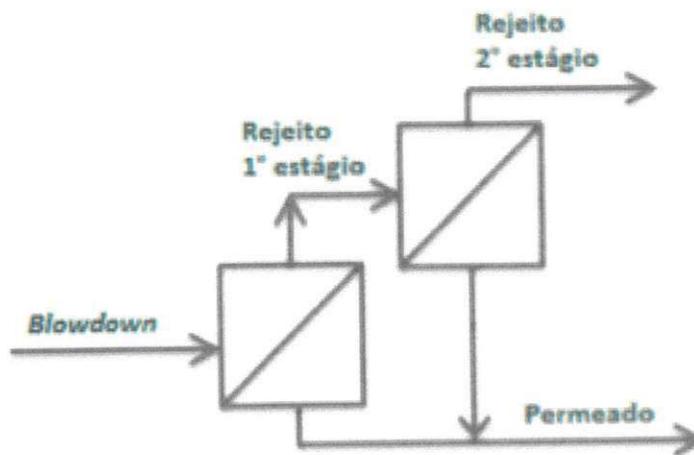
Com base nos resultados obtidos, pode-se fazer as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

1. Avaliar a campanha máxima da membrana para o ciclo de concentração desejado e calcular o custo benefício para implantação deste projeto. Nesse estudo o foco será o pré tratamento da água de alimentação para aumentar a vida útil da membrana.
2. Neste trabalho foi utilizado apenas um passe no sistema de osmose reversa. Como recomendação, poderia ser utilizado um segundo passe para reaproveitar o rejeito, conforme esquemático da Figura 70. Assim, teria um maior ganho na quantidade do permeado final. Um outra alternativa seria reutilizar o rejeito/concentrado na alimentação, como o processo em estudo tem a opção de ser por batelada, ver ilustração na Figura 69.

Figura 49 - Representação esquemática de um sistema de OR em processo de batelada



Figura 50 - Representação esquemática de um sistema de OR com duplo estágio para recuperação do rejeito



REFERÊNCIAS

ANA, **Manual GEO Brasil Recursos Hídricos**, 264 p., Brasília, 2007

ANA, **Agência Nacional de Águas**, 2015 . Disponível em <http://www.ana.gov.br>. Acesso em fevereiro de 2015

AMJAD, Z. **Reverse Osmosis - Membrane Technology, water chemistry and industrial applications** 1ªed. New York; Chapman & Hall, 1993

AZEVEDO, C. A. L. de, KAYANO, C. A. S., ABREU, G. M. R. de & SALVESTRO, R. E. **Reutilização de Efluentes Líquidos de uma Refinaria de Petróleo**, São José dos Campos: 1999 monografia (Pós Graduação), Fundação Armando Alvares Penteado - FAAP, 1999. 220p.

AZEVEDO NETTO, J. M., RICHTER, C.A. **Tratamento de Água**. 1ª ed. São Paulo: Editora Edgar Blucher, 1995. 332 p.

AZEVEDO, C. A. L. de, KAYANO, C. A. S., ABREU, G. M. R. de & SALVESTRO, R. E. **Reutilização de Efluentes Líquidos de uma Refinaria de Petróleo**, São José dos Campos: 1999 monografia (Pós Graduação), Fundação Armando Alvares Penteado - FAAP, 1999. 220p.

BEER, Raquel et all. **Tudo é Água**. *Revista Veja*, 85p.,ed.2397, 2014

BETZ. **Handbook of industrial water conditioning**. 9ª ed. Treviso; Betz Laboratories, 1991

BARBIERI, J. C. **Desenvolvimento e Meio Ambiente - As Estratégias de Mudança da Agenda 21**. Petrópolis / RJ: Vozes, 1997

CHEN, C. L.; HUNG, P. S. **Simultaneous synthesis of mass exchange networks for waste minimization**. *Computers and Chemical Engineering*, 2005.

- CROOK, J. Critérios de qualidade da água para reuso. **Revista Dae-Sabesp**, 174, 1993
- DANTAS, E. **Tratamento de água de refrigeração e caldeiras**. Editora ECOLAB, 1988
- DREW. **Princípios de Tratamento de Água Industrial**. São Paulo: Drew Produtos Químicos LTDA, 1979. pp. 48-166.
- FARIA, D. C., **Reuso das Correntes de Efluentes Aquosos em Refinarias de Petróleo**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, fevereiro de 2004
- FERIS, L.A. Tratamento eficiente de efluentes e reuso da água na indústria: uma meta a ser atingida. **Revista do CREA-RS**, 44 p., 31, 2008
- FERRARO, Ronaldo José Silva. **Sistema de Osmose Reversa**, 2008
- FILHO, D.F.S. **Tecnologia de tratamento de água: água para indústria**, 3ªed, São Paulo:Nobel, 1985
- KRAEMER, C.F. **Construção e Pré-operação de uma Planta Piloto de Osmose Inversa e Nanofiltração**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009
- LOBO, L.P. **Análise Comparativa dos Processos de filtração em membranas e clarificação físico-química para reuso de água na indústria** , Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, 2004
- MAJOZI, T. **Wastewater minimisation using central reusable water storage in batch plants**. *Computers and Chemical Engineering*, Oxford, v. 29, 2005.
- MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. dos; **Reuso de Água**. 1ª ed. São Paulo: Editora Manole LTDA, 2003. 579p.

MERZWA, J.C.; e HESPANHOL, I. **Água na Indústria: Uso racional e reuso** - São Paulo: Oficina de Textos, 2005

METCALF; EDDY. **Wastewater engineering treatment disposal reuse**. 4. ed. Revised by G. Tchobanoglous, F. Burton e D. Stensel. New York: McGraw Hill Book, 2003.

MILLER, G.W. **Integrated concepts in water reuse: managing global water needs**, Desalination, 187, 65-75, 2007

NALCO ECOLAB- Estudo de Caso - **3D TRASAR™ Technology delivers sustainability performance improvement by enabling process water reuse at a pharmaceutical active ingredients plant**, 2014

ORNELAS, P. **Reuso de água em edifícios públicos: o caso da Escola Politécnica da UFBA**. 2004. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2004.

PACHAURI, Rajendra. **Água, a essência da vida, Ciranda da Água**, 2011

POLLO, L.D. **Reaproveitamento de águas e efluentes inorgânicos de uma indústria petroquímica**. Dissertação de mestrado, departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004

RICHTER, C.A. NETTO, J.M.A. **Tratamento de água**. 1ª ed. São Paulo Edgard Blucher Ltda, 1991.

ROGERS, P. P. et al. (ed.) **Water crisis: myth or reality?** London: Fundación Marcelino Botín, Taylor & Francis, 2006. 331p.

SOMLYODY, L; VARI, O. **Freshwater under pressure**. International Review for Environmental Strategies, v.6, n.2, p.181-204, 2006.

SPERLING, M.V. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos** – 2ª edição, Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 1996.

TELLES, D.; COSTA, R.H.P.G. **Reuso de água: Conceito, teorias e práticas**. 1ª ed. São Paulo Edgard Blucher, 2007

TUNDISI, J. G. et al. **Conservação e uso sustentável de recursos hídricos**. Belo Horizonte: editora UFMG, 2008.

VIEIRA, F.C. **Viabilidade Técnica e Econômica do reaproveitamento do efluentes de Torre de resfriamento** - Trabalho de diplomação em Engenharia Química - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2 ed – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

Sites consultados:

<http://www.amazon.com/Dow-Filmtec-BW30-400-34I-Brackish-Membrane/dp/B00D43H8M8>- Acesso em 20/01/2015

<http://www.mma.gov.br/> - Ciranda das Águas - acesso em 20/01/2015

http://www.meiofiltrante.com.br/materias_ver.asp?action=detalhe&id=582&revista=n43 - acesso em 20/01/2015

http://www.meiofiltrante.com.br/materias_ver.asp?action=detalhe&id=72 - Acesso em 20/01/2015