

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

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO E CUSTO BENEFÍCIO DA  
MANUTENÇÃO DE SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO VIA  
OSMOSE INVERSA NO CAMPO**

**JOALDO BEZERRA DE MELO**

**CAMPINA GRANDE – PB  
2007**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA – CCT  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA  
LABORATÓRIO DE REFERÊNCIA EM DESSALINIZAÇÃO

Dissertação de Mestrado

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO E CUSTO BENEFÍCIO DA MANUTENÇÃO  
DE SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE INVERSA NO CAMPO**

**JOALDO BEZERRA DE MELO**

CAMPINA GRANDE – PB

ABRIL DE 2007

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO E CUSTO BENEFÍCIO DA MANUTENÇÃO DE  
SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE INVERSA NO CAMPO**

**JOALDO BEZERRA DE MELO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Operações e Processos.

Orientador: Prof. Kepler Borges França. (PhD).

CAMPINA GRANDE – PB

ABRIL DE 2007



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

M528a

Melo, Joaldo Bezerra de.

Avaliação do desempenho e custo benefício da manutenção de sistemas de dessalinização via osmose inversa no campo / Joaldo Bezerra de Melo . – Campina Grande, 2007, .  
90f. : il. color.

Referências

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

Orientador: Kepler Borges França, PhD.

1. Dessalinização. 2. Osmose inversa. 3. Custo benefício. I. Título.

CDU- 628.165:544.725.7

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO E CUSTO BENEFÍCIO DA MANUTENÇÃO DE  
SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE INVERSA NO CAMPO**

**JOALDO BEZERRA DE MELO**

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 30/04/2007

BANCA EXAMINADORA



---

Prof. Dr. Kepler Borges França  
Orientador



---

Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves  
Examinador Interno



---

Prof. Dr. Hélio de Lucena Lira  
Examinador Externo

Campina Grande – PB

Abril de 2007

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus queridos pais, Manoel Bezerra de Melo e M. de Lourdes Bezerra;  
Irmãos e Familiares.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por conceder-me a vida, saúde, perseverança e muita coragem para prosseguir em caminhadas, buscando realizar-se e realizar sonhos.

A minha família pelo apoio, atenção e compreensão em todos os momentos em que as dificuldades interpelam.

Ao meu orientador, professor Kepler Borges França, pelos conhecimentos transmitidos, empenho, encorajamento e amizade ao longo do desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos e amigas do Laboratório de Referência em Dessalinização, pelo apoio, amizade e primorosas contribuições nas realizações de tarefas, por vezes impensáveis, ao longo da jornada. Citar nomes talvez seja injusto, se por inoperância do pensamento, esquecer de algum. Um muito obrigado a todos.

Aos Colaboradores das análises laboratoriais, com destaque, Nilton e Giovane pelas contribuições na organização gráfica desse trabalho.

A Jorge “Marral”, pelo apoio mecânico dado nas montagens dos testes laboratoriais.

A Fernando e Esivaldo pelas ajudas na organização do trabalho.

A coordenação de Pós-graduação em Engenharia Química, nas pessoas do Coordenador professor Luiz Gonzaga S. Vasconcelos e da secretária, a “conterrânea” e amiga Maricé Pereira da Silva, que no desempenho de suas funções foram atenciosos e compreensivos.

A todos os professores do Mestrado em Engenharia Química pelos conhecimentos prestados nas disciplinas e amizade criada nesse período.

A prefeitura Municipal de Riacho de Santo Antonio pelas colaborações, com os sistemas para o estudo.

Aos operadores dos Sistemas de Dessalinização de Riacho de Santo Antonio e do Sítio Tanque Raso, Raminho e Raimundinho pela gentileza em colaborar com a pesquisa.

Ao CNPq pelo suporte financeiro tão imprescindível para a realização desse trabalho.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram, meu muitíssimo obrigado.

## **ABSTRACT**

The present work has the objective to study the performance and maintenance of desalination systems in the field in term of desalinated water production and its quality for human being consumption. The following systems were studied: Riacho de Santo Antonio/Sede (System I) and Sítio Tanque Raso (System II) both belong of Riacho de Santo Antonio city. The measure variables and the variation of cation and anion concentrations were evaluated before and after the process of membrane chemical cleaning as function of time of operation. From this study it was done a balance of cost of desalinated water per family which reached R\$ 3.00 per month at water average consumption of 2.7 liter per person day.

**KEY – WORDS:** Desalination, Reverse Osmosis, Benefit Cost.



## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>i</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b> .....	<b>iv</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>vii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>1 – INTRODUÇÃO</b> .....	<b>01</b>
1.1 – Problemática.....	02
1.2 – Justificativa.....	04
1.3 – Objetivos.....	06
<b>2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>07</b>
2.1 – Dessalinização.....	08
2.2 – Processos de Dessalinização.....	09
2.3 – Dessalinizadores.....	11
2.4 – Membranas.....	12
2.5 – Módulos Comerciais.....	13
2.6 – Processos de Separação por Membranas.....	15
2.7 – Osmose.....	18
2.8 – Osmose Inversa.....	18
2.9 – Aplicações e Vantagens da Osmose Inversa.....	20
2.10 – Sistemas de Dessalinização por Osmose Inversa.....	21
2.11 – Operação e Manutenção.....	22
2.12 – Incrustações.....	23
2.12.1 – Indicadores de Incrustações.....	24
2.13 – Limpeza Química das Membranas.....	26
2.14 – Pré-tratamento e Pós-tratamento.....	28
2.15 – Principais Equações Empíricas e Fatores que Regem o Processo de OI.....	30
2.15.1 – Pressão Osmótica de uma Solução Iônica.....	30

2.15.2 – Fluxo do Permeado.....	30
2.15.3 – Fluxo do Concentrado .....	31
2.15.4 – Taxa de Rejeição de Sais.....	32
2.15.5 – Fluxo de Passagem de Sais (PS) .....	33
2.15.6 – Recuperação .....	33
2.15.7 – Balanço de Massa.....	34
2.15.8 – Consumo de Energia .....	35
2.16 – Custo de Operação .....	36
<b>3 – EXPERIMENTAL .....</b>	<b>38</b>
3.1 – Equipamentos Utilizados e Produtos Químicos.....	38
3.1.1 – Equipamentos .....	38
3.1.2 – Produtos Químicos .....	38
3.1.3 – Sistema de Dessalinização e água para estudo.....	38
3.1.4 – Sistema de Dessalinização .....	39
3.1.5 – Procedimentos Experimentais .....	39
3.1.6 – Dados Obtidos dos Sistemas de Dessalinização por OI Estudados.....	40
3.1.7 – Sistema de Dessalinização de Riacho de Santo Antonio-PB, (Sede).....	40
3.1.8 – Sistema de Dessalinização de Riacho de Santo Antonio-PB, (Tanque Raso) ....	42
3.2 – Processo Experimental .....	43
3.2.1 – Observações Importantes na Limpeza Química das Membranas.....	44
<b>4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>45</b>
4.1 – Avaliação do Desempenho do Sistema I .....	45
4.1.1 – Avaliação da Limpeza Química .....	45
4.1.2 – Desempenho do Sistema, Antes e Após a Limpeza Química .....	47
4.1.3 – Variação da Concentração de Sais Antes e Após a Limpeza Química .....	48
4.1.4 – Comportamento do pH e da Condutividade Elétrica .....	50
4.1.5 – Comportamento da Variação das Pressões e Vazões .....	51
4.1.6 – Comportamento do ISL e STD.....	53

4.2 – Avaliação do Desempenho do Sistema II .....	55
4.2.1 – Avaliação da Limpeza Química .....	55
4.2.2 – Desempenho das Membranas Após o Processo de Limpeza .....	57
4.2.3 – Variação da Concentração de Sais Antes e Após a Limpeza Química .....	59
4.2.4 – Comportamento do pH e da Condutividade Elétrica .....	60
4.2.5 – Comportamento da Variação das Vazões e Pressões .....	61
4.2.6 – Comportamento do ISL e STD .....	63
4.3 – Estimativa de Custo.....	65
<b>5 – CONCLUSÕES .....</b>	<b>70</b>
<b>6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>72</b>
<b>7 – REFERÊNCIAS .....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>79</b>

**LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

- A - área da membrana ( $m^2$ )  
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ALQ - Antes da limpeza química  
Alk - Alcalinidade Total  
 $c_i$  - concentração molar do soluto (mol/L)  
Ca - concentração da solução de alimentação (mg/L)  
Cat - concentração total de cálcio (g-mol/L)  
Cc - concentração do concentrado (mg/L)  
Cp - concentração do permeado (mg/L)  
DLQ - Depois da limpeza química  
E - constante dielétrica  
ED - Eletrodiálise  
HCl - Ácido Clorídrico  
I - força Iônica da solução  
IDS - índice de densidade de sedimentos  
Ipc - produto iônico da água do concentrado  
ISL - índice de Saturação de Langelier  
IS - índice de Saturação  
 $J_p$  - fluxo do permeado ( $L/m^2 \cdot h$ )  
 $J_s$  - fluxo mássico do soluto ( $kg/m^2 \cdot h$ )  
K - fator de correção da força iônica da solução  
 $K_a$  - coeficiente de permeação de água ( $L/m^2 \cdot h \cdot kgf/cm^2$ )  
 $K_s$  - coeficiente de permeação do soluto (m/s)  
 $K_{s_c}$  - produto de solubilidade do concentrado  
 $K_c$  - Condutividade Elétrica do Concentrado  
 $K_p$  - Condutividade Elétrica do Permeado  
 $K_i$  - Coeficiente de Transferência de Massa do Solute  
 $K_w$  - Coeficiente de Transferência de Massa do Solvente

LABDES - Laboratório de Referência em Dessalinização

LPM - Litros por Minuto

MAC - Membrana de acetato de celulose

MED - Dessalinização multi-estágio

MEE - Múltiplo efeito de evaporação

MF - Microfiltração

NF - Nanofiltração

OI - Osmose inversa

TFC - Membrana de compósito de filme fino

P1 (kgf/cm<sup>2</sup>) - Pressão de entrada dos elementos de filtros

P2 (kgf/cm<sup>2</sup>) - Pressão de saída dos elementos de filtros

P3 (kgf/cm<sup>2</sup>) - Pressão de entrada dos elementos de membranas

P4 (kgf/cm<sup>2</sup>) - Pressão de saída dos elementos de membranas

PB - Paraíba

PPM - Partes por Milhão

PS - Passagem de sais

P<sub>a</sub> - Pressão de alimentação (kgf/cm<sup>2</sup>)

P<sub>c</sub> - Pressão do concentrado (kgf/cm<sup>2</sup>)

P<sub>p</sub> - Pressão do permeado (kgf/cm<sup>2</sup>)

pH - Potencial hidrogeniônico

pH<sub>c</sub> - Potencial hidrogeniônico do concentrado

PS - Passagem de Sais (%)

PSM - Processos de Separação com Membranas

Q<sub>a</sub> - Vazão de alimentação (m<sup>3</sup>/h)

Q<sub>p</sub> - Vazão do permeado (m<sup>3</sup>/h)

Q<sub>c</sub> - Vazão do concentrado total (m<sup>3</sup>/h)

OI - Osmose Inversa

RS - Rejeição de sais (%)

r - recuperação do sistema (%)

R - Constante dos gases ideais (kgf.L/cm<sup>2</sup>.mol.K)

S&DSI - Índice de Estabilidade de Stiff e Davis  
STD - Sólidos totais dissolvidos  
T - Temperatura (°C)  
TFC - Membrana de compósito de filme fino  
UF - Ultrafiltração  
UFCG - Universidade Federal de Campina Grande  
UFPB - Universidade Federal da Paraíba

### **Letras gregas**

$\Delta C$  - Variação de concentração de sais (mg/L)  
 $\Delta\pi$  - Gradiente de pressão osmótica (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $\Delta P$  - Gradiente de pressão (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $\pi$  - Pressão osmótica (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $\pi_a$  - Pressão osmótica da alimentação (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $\pi_c$  - Pressão osmótica do concentrado (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $\pi_p$  - Pressão osmótica do permeado (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $\nu_i$  - n° de íons formados na dissociação do soluto  
 $f_m$  - Coeficiente de atividade específica à temperatura específica.  
 $\gamma$  - Coeficiente de atividade dos componentes do sal na solução.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1 - Fluxograma Típico de um Processo de Dessalinização de Água por OI .....	11
Figura 2.2 - Elemento de Membrana em Espiral para o Processo de Osmose Inversa .....	14
Figura 2.3 - Representação do processo de osmose e osmose inversa .....	19
Figura 2.4 - Equipamento básico para medida de IDS.....	25
Figura 2.5 - Esquema típico de um sistema de limpeza química .....	28
Figura 2.6 - Porcentagem de custos de diferentes componentes de operação e manutenção de unidades de dessalinização de águas salobras.....	37
Figura 3.1 - Sistema de dessalinização de Riacho de Santo Antonio-PB, Sede.....	41
Figura 3.2 - Sistema de dessalinização de Riacho de Santo Antonio –PB, Tanque Raso..	43
Figura 4.1 - Variação do pH da solução de HCl, usada na limpeza química dos elementos de membrana do Sistema I .....	45
Figura 4.2 - Variação da condutividade elétrica da solução de HCl usada na limpeza química dos elementos de membrana do Sistema I.....	46
Figura 4.3 - Perfil da concentração de sais presentes na água do Sistema I, antes da limpeza química .....	49
Figura 4.4 - Perfil da concentração de sais presentes na água do Sistema I, após a limpeza química .....	49
Figura 4.5 - Comportamento da condutividade da água do Sistema I, com o tempo .....	50
Figura 4.6 - Comportamento do pH da água do Sistema I, com o tempo .....	51
Figura 4.7 - Variação da pressão de operação do Sistema I, com o tempo.....	52
Figura 4.8 - Variação da vazão dos efluentes do Sistema I, com o tempo.....	52
Figura 4.9 - Comportamento do Índice de Saturação de Langelier da água do Sistema I, com o tempo .....	53
Figura 4.10 - Comportamento dos Totais de Sólidos Dissolvidos da água do Sistema I, com o tempo.....	54

Figura 4.11 - Variação do pH da solução de HCl, usada na limpeza química da membrana I, do Sistema II, em função do tempo .....	55
Figura 4.12 - Variação do pH da solução de HCl, usada na limpeza química da membrana II, do Sistema II .....	56
Figura 4.13 - Variação do pH da solução de HCl, usada na limpeza química da membrana III, do Sistema II .....	56
Figura 4.14 - Perfil da concentração de sais presentes na água do Sistema II, em funcionamento no campo Janeiro/2007 .....	59
Figura 4.15 - Perfil da concentração de sais presentes na água do Sistema II, no campo, Março/2007 .....	59
Figura 4.16 - Comportamento da condutividade da água do Sistema II .....	60
Figura 4.17 - Comportamento do pH da água do Sistema II.....	61
Figura 4.18 - Variação da pressão de operação do Sistema II, com o tempo.....	62
Figura 4.19 - Variação da vazão dos efluentes do Sistema II, com o tempo .....	62
Figura 4.20 - Comportamento do Índice de Saturação de Langelier do Sistema II .....	63
Figura 4.21 - Comportamento do Total de Sólidos Dissolvidos do Sistema II.....	64



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Porosidade de membranas, pressões de operação usuais e rendimento total do processo .....	17
Tabela 3.1 - Características do sistema de dessalinização de Riacho de Santo Antonio – PB - SEDE.....	41
Tabela 3.2 - Características do sistema de dessalinização do Sítio Tanque Raso.....	42
Tabela 4.1 - Condições de funcionamento do sistema I de dessalinização antes da limpeza química das membranas .....	47
Tabela 4.2 - Condições de funcionamento do sistema I de dessalinização após a limpeza química das membranas .....	47
Tabela 4.3 - Condições de operação das membranas do Sistema II .....	57
Tabela 4.4 – Condições - teste de operação das membranas do Sistema II (em série), no LABDES .....	58
Tabela 4.5 - Condições de operação das membranas do sistema II, “in loco”.....	58
Tabela 4.6 - Custos médios de água potável para o semi-árido nordestino .....	68
Tabela A 1 - Dados referentes à limpeza química das membranas do sistema I .....	79
Tabela A 2 - Dados referentes à limpeza química da membrana I do sistema II.....	79
Tabela A 3 - Dados referentes à limpeza química da membrana II do sistema II .....	80
Tabela A 4 - Dados referentes à limpeza química da membrana III do sistema II .....	80
Tabela A 5 - Dados referentes ao monitoramento do desempenho do Sistema I.....	80
Tabela A 6 - Dados referentes ao monitoramento do desempenho do Sistema I.....	80
Tabela A 7 - Dados referentes ao monitoramento do desempenho do Sistema I.....	80
Tabela A 8 - Dados referentes ao monitoramento do desempenho do Sistema I.....	81
Tabela A 9 - Dados referentes ao monitoramento do desempenho do Sistema II .....	81
Tabela A 10 - Dados referentes ao monitoramento do desempenho do Sistema II .....	81
Tabela A 11 - Dados referentes ao monitoramento do desempenho do Sistema II .....	81

Tabela A 12 - Apresentação dos valores das tarifas médias de fornecimento aplicadas no território nacional, por classe de consumo e por região, e sua evolução ano a ano .....	82
Tabela B 1 - Dados referentes às análises físico-químicas da água do sistema I, antes da limpeza química das membranas.....	83
Tabela B 2 - Dados referentes às análises físico-químicas da água do sistema I, após limpeza química das membranas.....	84
Tabela B 3 - Dados referentes às análises físico-químicas da água do sistema I, após quatro meses da limpeza química das membranas .....	85
Tabela B 4 - Dados referentes às análises físico-químicas da água do sistema II, após recuperação.....	86
Tabela B 5 - Dados referentes às análises físico-químicas da água do Sistema I .....	87
Tabela B 6 - Dados referentes às análises físico-químicas da água do Sistema I Janeiro/2007 .....	88
Tabela B 7 - Dados referentes às análises físico-químicas da água do Sistema I Março/2007 .....	89
Tabela B 8 - Dados referentes às análises físico-químicas da água do Sistema II Março/2007 .....	90

---

## 1. INTRODUÇÃO

A água é um bem vital para a sobrevivência da espécie humana e de todas as outras em nosso planeta, sendo também considerada, como um recurso finito, escasso e que ainda, está enfrentando problemas de quantidade e de qualidade. É o produto de maior quantidade do nosso planeta e de maior importância para a vida, já que participa em grande porcentagem na composição metabólica dos seres vivos, como também está necessariamente ligada à maioria dos processos químicos.

Toda vida existente na Terra nasceu da água e poderá desaparecer pela própria água, por ser ela, um dos elementos indispensáveis ao ecossistema. Nosso corpo também é em sua maior parte constituído por água e por isso nossa vida depende diretamente dela (JUNIOR, 2006).

No entanto, o que se assiste é uma crise de sustentabilidade para as vidas no nosso planeta podendo-se verificar que do total de água existente, cerca de 97,5% são de águas salgadas, e, conseqüentemente, cerca de 2,5% são de águas doces. Destas, apenas 0,03% estão fáceis e diretamente disponíveis para o uso do homem nos rios, lagos e subsuperfícies. Entretanto, cerca de 68,7% desses recursos são constituídos por águas armazenadas nas regiões polares e em geleiras diversas, e cerca de 30,1% são águas doces, as quais se encontram em reservatórios subterrâneos (CARVALHO, 2005).

Assim, a água doce encontrada nos rios e lagos corresponde à apenas 0,27% do volume de água doce e à cerca de 0,007% do volume total de água do planeta. Pode-se inferir então que o volume de água disponível para o consumo humano é muito pequeno e que a água salgada é o maior volume existente. Ademais, existem variações de disponibilidade de água e de populações no planeta, ocasionando situações díspares, em que o volume per capita é alto, decorrente de áreas com grande disponibilidade de água e com densidade populacional pequena, e regiões com situação inversa, com grande concentração populacional e baixa disponibilidade desse bem (CARVALHO, 2005).

No caso particular do Brasil, o seu maior recurso hídrico e também do Mundo, correspondendo a 20% de toda a água doce disponível no planeta e cerca de 73% do país, é a bacia Amazônica, que está distante das grandes concentrações urbanas e industriais e

---

habitada por 7% da população, o que implica, apesar dos outros recursos do país, tornar a água doce um bem de extremo valor para as demais regiões longe daquela riqueza (PORTUGAL, 2000).

O volume total de água não está se reduzindo, porque não há perdas no ciclo de evaporação e precipitação; o que caracteriza a escassez é a poluição. A distribuição deste volume no Brasil deixa apenas 3% de água para o nordeste, formado pelos Estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Alagoas, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Sergipe e Bahia, que em razão da variedade de clima, vegetação e economia, está dividida em cinco grandes zonas: litoral, zona da mata, agreste, sertão e meio norte (LOPES, 2004).

Em busca de soluções, as águas subterrâneas têm sido mais exploradas pelo homem, todavia, as águas comumente encontradas são impróprias para o consumo devido seus altos índices de sais dissolvidos (FRANÇA, 2001). Esta característica em algumas regiões é função dos tipos de rochas encontradas. Na região semi-árida, por exemplo, há grande predominância de rochas cristalinas, as outras apresentam baixos valores de porosidade e de permeabilidade primárias, condicionando uma circulação lenta dos fluidos e conseqüentemente maior tempo de permanência das águas percoladas nos aquíferos, acarretando numa maior salinização das mesmas (LOPES, 2004).

### **1.1 Problemática**

Atualmente, há mais de um bilhão de pessoas sem disponibilidade suficiente de água para consumo doméstico e com tendência de se agravar ainda mais essa grave situação, exatamente devido ao consumo exagerado ou sem previsão de quantidade, além de falta de conhecimento prévio e seguro da importância da água na vida de todos os seres sem distinção.

Neste sentido, vários especialistas apresentam estimativas negativas para o futuro (SETTI, 2001) aponta para uma situação de escassez que envolverá cerca de cinco e meio bilhões de pessoas vivendo em áreas com moderada ou séria falta de água, em um horizonte de trinta anos. Várias são as alternativas pensadas neste contexto e, dentre elas, está a provisão do monitoramento de produção de água de forma a assegurar uma possível segurança do custo e do fornecimento desse recurso tão importante.

---

Um fator preocupante consiste na crescente dinâmica de consumo de água pelo mundo. Estima-se um consumo mundial entre 2.879 a 5.187 km<sup>3</sup>/ano, para o ano de 2.025, o que representa um crescimento de aproximadamente 75% em trinta anos, do volume de água utilizado em todo o planeta. Assim, o consumo de água mundial apresenta escalada ascendente, superior inclusive aos níveis de crescimento populacional, ou seja, no último século, a população mundial cresceu a uma ordem de três vezes o seu tamanho e o consumo de água ampliou-se em cerca de seis a sete vezes (CARVALHO, 2005).

O homem é o grande consumidor de água doce, quer direta, quer indiretamente. Em números aproximados, temos que o consumo de uma família na cidade é seis vezes maior que de outra família no campo (JUNIOR, 2006).

No Nordeste brasileiro, as secas sucessivas, aliadas à falta total de planejamento dos órgãos públicos com relação à gestão da água, fazem com que se tenha plena convicção do colapso iminente desse setor (SUASSUNA, 2005). As variações climáticas que essa região enfrenta ao longo de cada ano é um dos parâmetros responsáveis pela falta de água para o consumo humano, acarretando em um dos problemas social e econômico da região.

Tendo em vista a escassez de água potável nos últimos anos em todo o mundo, a humanidade vem tentando explorar novas fontes e tecnologias para obtenção em curto prazo e baixo custo desse recurso natural. Dessa forma, entre as soluções encontradas, estão os métodos de dessalinização de águas salobras e da água do mar, tornando a água potável para o consumo humano, com propósitos domésticos e municipais (ALMEIDA, 2002).

Há muitos anos, processos de dessalinização de águas salobras ou salinas vêm sendo estudados. O maior passo no desenvolvimento das tecnologias de dessalinização foi dado durante a Segunda Guerra Mundial, devido à necessidade de água potável para suprir as tropas militares em áreas áridas. Desde então, o grande potencial de dessalinização foi reconhecido e os estudos nessa área foram intensificados (IDAE, 1995).

Sabe-se que existem vários sistemas de dessalinização instalados na região do semi-árido do estado da Paraíba, beneficiando a comunidades difusas com água doce para as primeiras necessidades. Considerando que muito desses sistemas fazem parte de programas de governo e que ficaram sob a responsabilidade de prefeituras, cooperativas, associações, organizações não governamentais, e outras, esses sistemas operam dentro de

---

uma faixa de risco (de entrar em colapso) ou não, dependendo do serviço de manutenção do órgão responsável.

Através do acompanhamento periódico desses sistemas, tem-se detectado os principais problemas técnicos que afetam de forma direta o processo como um todo, a ponto de causar a paralisação da produção de água dessalinizada (FORMIGA, 2005). Problemas tais como a falta de pré-tratamento da água bruta, manutenção preventiva, monitoração adequada e pessoal qualificado levaram à elaboração do projeto de avaliação de desempenho e custo benefício.

É imprescindível, portanto, a avaliação contínua da manutenção de sistemas de dessalinização existentes no semi-árido nordestino, com vistas ao desempenho dos mesmos, no sentido de manter as estruturas aptas para o trabalho ao qual são destinados.

Dessalinizar a água potável sem agredir o meio ambiente, requer um programa bem formulado. O semi-árido tem muitos exemplos de programas ineficientes marcados pela improvisação, paternalismo e com o desperdício de dinheiro público. Para enfrentar estes desafios é necessária a capacitação de pessoal, o avanço e as escolhas tecnológicas adequadas (LOPES, 2004).

O fornecimento de água de boa qualidade é um fator preocupante e requer cada vez mais atenção dos órgãos responsáveis, como também das entidades de pesquisa e estudos referentes. Dentre as preocupações, esta a relação custo benefício, de acordo com as condições das comunidades beneficiadas, propositando serem agraciadas com água potável dentro de parâmetros físico-químicos recomendados pelo Ministério da Saúde.

## **1.2 Justificativa**

A escassez de mananciais hídricos tem evidenciado a importância de águas subterrâneas. De acordo com estudos realizados pela Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS, 2003) pelo menos 19,5 bilhões de metros cúbicos de água poderiam ser extraídos por ano da região do subsolo do Nordeste do Brasil, através da perfuração de poços em locais adequados, sem o risco de esgotamento dos mananciais. Mas a utilização desta água é limitada por um problema típico dos poços localizados no interior da região, os altos índices de salinidade.

---

O nível de salinidade da água aceitável para o consumo humano é de 500 ppm, ou seja, de 500 mg/L de sais totais dissolvidos. Um fato observado, é que diversas comunidades rurais, onde o abastecimento é feito através de poços perfurados em aquíferos cristalinos, são obrigados ao consumo de água com níveis de salinidade acima dos padrões recomendados, devido à falta de alternativas (BARBOSA et al, 1998).

Sendo notável a grande carência de água potável na região Nordeste, o Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES) da Universidade Federal de Campina Grande, com o apoio da Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente, vem desenvolvendo pesquisas e foi responsável pelos projetos e implantações, de sistemas de dessalinização via osmose inversa para atender a pequenas e médias comunidades de vários estados do Nordeste.

A união da problemática da seca na região do semi-árido nordestino e da falta de manutenção nos sistemas de dessalinização instalados em determinadas comunidades, com a não existência de pessoal qualificado e tomada de devidas providencias na operação dos mesmos, aponta para uma solução de estudo direcionada, que utilize parâmetros relacionados aos custos em se obter água de boa qualidade e mantenha um desempenho aceitável dos sistemas por períodos longos.

Este trabalho apresenta e analisa sistemas de dessalinização por osmose inversa, instalados no campo, estudando-se seus desempenhos e custo benefícios, fazendo-os operar de forma que haja vantagem em prol da comunidade para a qual a água é fornecida.

Em sistemas de dessalinização por osmose inversa, a manutenção adequada com pessoal qualificado e uso de tecnologia viável, determinam bom desempenho dos mesmos com possíveis vantagens na obtenção da água, em relação a outros meios, incluindo diminuição de custos e aumento da vida útil dos elementos de membranas, como também das demais dependências de instalação do equipamento.

---

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o desempenho da manutenção de sistemas de dessalinização instalados no campo, no sentido de averiguar, em prol da comunidade para a qual a água é fornecida e do órgão responsável pelo sistema, as vantagens em obter água de boa qualidade. Tal estudo é realizado através do monitoramento da manutenção dos sistemas e avaliação dos resultados obtidos, coleta de dados do sistema, estudo dos parâmetros como: pressões e vazões, além dos parâmetros das análises físico-químicas de águas, com vistas à produção de água potável no campo.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Caracterizar o funcionamento de um dessalinizador em função de suas variáveis de medidas como: pressões de operação, vazão do concentrado e do permeado e condições gerais de funcionamento;
2. Acompanhar o funcionamento de dois sistemas de dessalinização por osmose inversa instalados no campo, observando as possíveis diferenças e semelhanças na produção de permeado e manutenção dos mesmos;
3. Medir e estudar determinados parâmetros químicos e físicos da água dessalinizada, com o STD (Sólidos Totais Dissolvidos), ISL (Índice de Saturação de Langelier) e concentração de sais, no sentido de acompanhar o desempenho dos sistemas e o possível entupimento das membranas;
4. Realizar uma análise econômica preliminar do sistema, com estudo do custo benefício de manutenção, incluindo limpezas químicas realizadas, troca de membranas, troca de filtros e gasto de energia na operação.



---

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Muitos trabalhos têm sido publicados por diversos pesquisadores sobre métodos de dessalinização, com a finalidade de reduzir os custos dos dessalinizadores e aumentar o acesso à água potável, nas regiões onde a água possui um teor médio de sais acima do permitido para consumo, pela organização mundial de saúde, que é de 500 mg/L.

Na tentativa de fornecer mais uma alternativa para solucionar o problema, apresenta-se este trabalho visando obter a água potável a partir da água salobra no campo, utilizando sistemas de dessalinização por osmose inversa e estudando seu desempenho para avaliação do custo benefício.

Diversos são os estudos teóricos e experimentais voltados para dessalinização em diversas condições e diferentes métodos.

O estudo sobre estratégia para formação e implantação de um programa de dessalinização da água salobra no Ceará, foi efetuado por PINHEIRO & SILVA (2000), investigaram que cerca de 75% do território cearense é formado por rochas cristalinas com disponibilidades hídricas limitadas, com vazão média por poço de 3 m<sup>3</sup>/h e presença de sólidos totais disponíveis (STD) de 300 mg/litros, até 1997 haviam apenas 10 dessalinizadores financiados pelo Governo do Estado e em 2000, este número aumentou para 160 unidades, atendendo 21,100 famílias. Concluíram que a escolha de comunidade pelo critério de salinidade para instalação de dessalinizador não é uma estratégia adequada para enfrentar o desafio de suprir a população com água potável.

FERREIRA (2002), estudou toda a evolução histórica da dessalinização de água salgada ou salobra, do mar, dos açudes e dos poços, verificando que os cientistas pesquisam as soluções há mais de 2300 anos, tendo em Aristóteles o seu precursor.

SUASSUNA et al (2005), estudou o problema da água potável no semi-árido brasileiro e, fez um alerta para os governantes sobre a necessidade de mais dessalinizadores, devido o teor salino, tornar imprestável para o consumo humano a água existente no sub solo dessa região.

CALLADO (2003), avaliou o desempenho dos dessalinizadores instalados em municípios cearenses, sob os aspectos econômicos e sociais. As variáveis identificadas que

---

influenciam no desempenho dos dessalinizadores foram: marca (fabricante), capacidade instalada, salinidade do poço e formação do operador.

## 2.1. DESSALINIZAÇÃO

A dessalinização é usada para designar qualquer processo empregado na desmineralização parcial ou na desmineralização completa da água salina, como a água do mar que apresenta uma concentração de 35.000 mg/L dissolvidos ou as águas salobras. O objetivo do processo de desmineralização parcial é diminuir o teor de sal a um grau que torne a água conveniente para ser bebida, preferivelmente com 500 mg/L de sais ou menos.

O método de dessalinização estudado neste trabalho funciona segundo o princípio da osmose inversa. Este fenômeno, conhecido dos cientistas desde o fim do século passado, passou a ser aplicado em processos industriais na década de 60. Desde a década de 80 o emprego de membranas semipermeáveis sintéticas em aplicações industriais passou a se difundir, ampliando o campo de aplicação deste processo. Isto resulta em contínuas reduções de custo, não só pela maior escala de produção permitida como também pelo crescente conhecimento tecnológico adquirido. Por questões de redução de custos, os conhecimentos tecnológicos da área ganham investimentos e novas incrementações, de forma a aprimorar a tecnologia com estudos direcionados, como é o caso deste trabalho.

Nos anos recentes, os avanços científicos no campo de indústria de microchips e da biotecnologia provocaram uma demanda por água de elevada pureza. Por outro lado, a consciência de preservação do meio ambiente da sociedade implica também em tratamentos de rejeitos industriais mais sofisticados e de maior eficiência. Nestes campos a osmose inversa tem se desenvolvido bastante. O processo de osmose inversa será explicado no item 2.8.

A escassez de água potável em muitas regiões do planeta também determina uma demanda por processos de dessalinização seguros e econômicos. Assim, o processo de dessalinização por osmose inversa tem se difundido, seus custos vêm decrescendo e sendo colocado até ao alcance do indivíduo, viabilizando muitos projetos antes impensáveis (SATTAMINI et al, 1999).

---

Quanto ao processo da desmineralização completa, visa a fornecer água apropriada para utilização em caldeiras de alta pressão e em algumas outras aplicações industriais. Os processos de desmineralização por troca iônica, não são aplicáveis à dessalinização das águas muito salgadas. É indispensável usar outros processos (LOPES, 2004).

## 2.2. PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO

Os novos avanços tecnológicos nos últimos 30 anos reduziram muito o custo e o consumo de energia, de modo que os projetos de dessalinização pudessem ser considerados como soluções alternativas para melhorar o desenvolvimento. Entretanto estes projetos são ainda muito onerosos para economia de muitos países, o consumo de energia é comparativamente muito elevado, e a aceitação de tais projetos é questionada pelos ecologistas, pelos políticos, pelos coordenadores e por outros grupos da população em caráter econômico, social e ambiental (TSIOURTIS, 2001).

Existem hoje vários processos de dessalinização para grandes e pequenas quantidades de águas muito salinas ou as águas salobras. Estudou-se especificamente neste trabalho a manutenção de sistemas de osmose inversa, mas aqui será descrito um pouco a título de conhecimento, outros processos conhecidos, e que não deixam de serem importantes para desenvolvimento de estudos relativos:

- (I) Processo de destilação em tubo vertical longo a múltiplo efeito.
- (II) Processo de evaporação instantânea em etapas múltiplas.
- (III) Processo de congelamento.
- (IV) Processo de eletrodialise.
- (V) Processo de compressão de vapor a circulação forçada.
- (VI) Processo por osmose inversa.
- (VII) Processo de dessalinização solar híbrido.

Nos processos de destilação em tubo vertical longo a múltiplo efeito, de evaporação instantânea em etapas múltiplas e processos de compressão do vapor da circulação forçada, as águas salgadas são purificadas por evaporação, o vapor é condensado de modo a permitir a recuperação e reutilização da maior parte do seu conteúdo térmico, e a

---

salmoura concentrada é descarregada como rejeito. Estes processos são usados há décadas em navios e em outras circunstâncias.

O processo de congelamento é efetuado pela cristalização de águas muito salgadas, constituindo-se uma suspensão grossa de cristais de gelo e de salmoura, de onde se separam os cristais de gelo, que são lavados e fundidos.

O processo de eletrodialise não envolve modificações de fase, mas membranas de troca iônica em um campo elétrico; baseia-se no efeito que se consegue quando uma corrente elétrica contínua passa pela água salgada e numa sucessão de membranas trocadoras de cátions e de ânions alternadamente colocadas. Os cátions passam pelas membranas trocadoras de cátions e os ânions pelas trocadoras de ânions, o que provoca uma diminuição de salinidade num compartimento e um aumento no seguinte, e assim sucessivamente ao longo de todo o equipamento. A água com aumento de salinidade pode ser rejeitada, e a água com a salinidade diminuída pode ser recirculada ou passar por uma outra unidade. Este processo não leva a uma água completamente dessalinizada, mas reduz a salinidade da água salobra, tornando-a potável e conveniente para usos gerais.

Tem-se observado que em função do desenvolvimento tecnológico, os processos térmicos de dessalinização, apesar de serem bastante utilizados, vêm sendo substituídos por processos com membranas, devido complexidade de instalação, alto custo energético e de manutenção dos mesmos (IDAE, 1995).

Dentre os processos conhecidos, este trabalho trata apenas da osmose inversa, já que se busca com esta pesquisa, estudar o custo benefício da manutenção de sistemas de OI. Comparativamente o processo de OI é o que importa menos gastos em sua manutenção, de modo que torna viável e econômica, a distribuição de água de boa qualidade a partir da água salobra de poços tubulares instalados no campo.

Um fluxograma típico de um processo de dessalinização de água por osmose inversa é mostrado na Figura 2.1.

### 2.3. DESSALINIZADORES

São equipamentos destinados a produzir água potável a partir de água do mar ou salobra, empregando o processo de osmose inversa e membranas osmóticas sintéticas. As condições de trabalho de um dessalinizador são bastante severas, pois aliam um elemento altamente corrosivo (íon cloreto) a altas pressões (28 a 84 kgf/cm<sup>2</sup>). São equipamentos de custo relativamente elevado, mas, comparando-se com os custos normais de água encanada, o investimento se torna bem mais proveitoso (AQUANET, 2006).

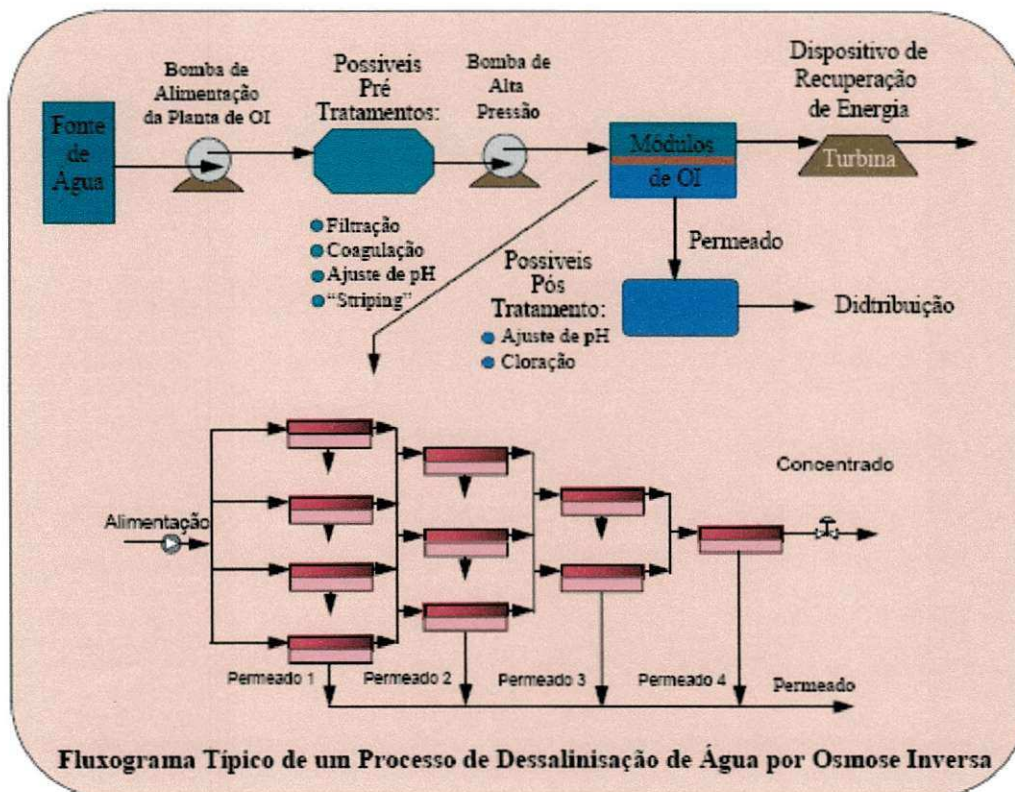


Figura 2.1 - Fluxograma Típico de um Processo de Dessalinização de Água por Osmose Inversa (Fonte: HARBERT, 1997)

As especificações de dessalinizadores por osmose inversa (OI) devem considerar algumas questões básicas.

- Devem ser conhecidas as quantidades de água disponível a ser tratada, as suas características e qualidades (concentração de sais).
- Análise físico-química e bacteriológica completa da água.

---

c) Pré-tratamento da água que apresenta sedimentos em suspensão, para evitar obstruções das membranas.

d) Compreender que a recuperação (%) refere-se à quantidade de água doce produzida, por exemplo: se para cada 1000 litros de água retirada de um poço tubular, são produzidos 200 litros de água doce e 800 litros de rejeito (salmoura), a recuperação é 20%.

O que diferencia os vários dessalinizadores disponíveis no mercado é a qualidade dos materiais neles empregados, a tecnologia de produção, o grau de automação incorporado, a experiência do fabricante e a disponibilidade de assistência e serviços técnicos (AQUANET, 2006).

As análises físico-química e bacteriológica da água são os principais parâmetros na determinação do pré-tratamento necessário e na escolha dos tipos de elementos de membranas que irão operar durante o processo, nos dessalinizadores. O número de elementos de membranas depende do potencial hídrico e da demanda de água. Atualmente, existem mais de mil unidades de dessalinização instaladas no Nordeste e nenhuma delas apresenta um sistema de proteção para os componentes do dessalinizador, inclusive para os elementos de membranas (NOTÍCIAS CNPQ, 2005).

#### **2.4. MEMBRANAS**

Membranas são elementos, filmes ou barreiras para a filtração de água e de esgoto, que permitem, dependendo do tamanho dos poros, separar partículas (membranas de microfiltração ou ultrafiltração), moléculas e íons de diâmetro maior (membranas de nanofiltração) ou íons de diâmetro pequeno, como o cloreto de sódio (membranas de osmose inversa). As membranas podem ser sintetizadas a partir de precursores orgânicos ou inorgânicos. O mercado de tratamento de água e de esgoto é atualmente dominado por membranas produzidas a partir de polímeros orgânicos (MEMBRANAS FILTRANTES, 2006). De uma maneira geral, uma membrana é uma barreira que separa duas fases e que restringe, total ou parcialmente, o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes nas fases (HARBERT et al, 1997).

As membranas osmóticas utilizadas em equipamentos para dessalinização da água são do tipo sintética, produzidas especialmente para este fim. Consistem de várias

---

camadas finas ou “folhas de filme” que são unidas e enroladas em espiral ao redor de um tubo plástico, também conhecido como membrana TFC “(THIN FILM COMPOSITE)”. O material da membrana é semipermeável, permitindo que atravessem as moléculas e que sejam retidos os sólidos dissolvidos. Quando a água a ser tratada passa através da superfície da membrana, é coletada no centro do tubo (água doce) enquanto os resíduos são levados da superfície da membrana, para fora, através de drenos.

Pelo fato de a água a ser tratada, ter que fluir através de passagens muito pequenas, (poros da membrana) durante o processo, um pré-tratamento se faz necessário para remoção de eventuais sólidos em suspensão e para que não ocorra precipitação de sais ou crescimento de microorganismos sobre as membranas. Atualmente o pré-tratamento consiste de filtração fina e a adição de ácidos ou outros produtos químicos para inibir aquela precipitação, constituindo na remoção de gases e ajuste do pH (LOPES, 2004).

## 2.5. MÓDULOS COMERCIAIS

Geralmente, as membranas são confinadas em módulos que as condicionam para a posição normal de trabalho. A escolha do módulo da membrana depende do tipo de aplicação e dos componentes que se deseja separar no processo (MALLEVIALE et al, 1996). Este módulo, no caso, é o elemento básico de um sistema de membrana que suporta todas as estruturas necessárias para viabilizar a operação da membrana como unidade de separação. Os elementos que o módulo contém são:

- Membranas;
- Estrutura de suporte da pressão, do vácuo ou da corrente elétrica aplicados ao sistema;
- Canais de alimentação e remoção do permeado e do concentrado.

Os módulos são projetados com os objetivos de:

- limitar o acúmulo de material retido pela membrana através da otimização da circulação do fluido a ser tratado;
- maximizar a superfície da membrana por volume de módulo;
- evitar a contaminação do permeado com o material do concentrado.

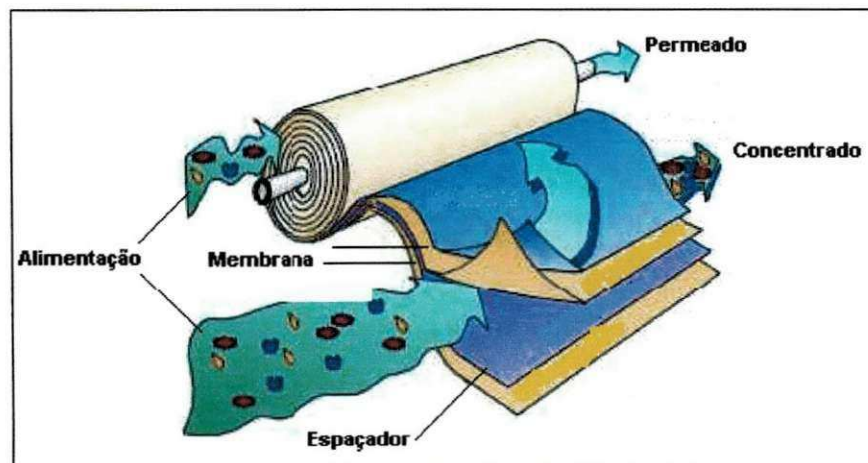
O projeto dos módulos deve atender também requisitos como:

- simplicidade de manuseio;
- permitir limpeza eficiente da membrana;
- volume mínimo retido no interior do módulo.

Os principais tipos de módulos comercializados no mercado são:

- módulos com placas, que dominam o mercado da eletrodialise (ED), mas também comercializados para tratamento de água por UF, OI e NF;
- módulos Tubulares, onde um tubo é revestido internamente com a membrana e aumenta o consumo de energia;
- módulos com fibras ocas utilizadas para produção de água em escala industrial por MF, UF e OI;
- módulo espiral que é o módulo mais utilizado em aplicações que demandam pressões altas e intermediárias, ou seja, na NF e na OI (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001).

O tipo de módulo, que é utilizado em osmose inversa, tema de estudo objetivo dessa pesquisa, pode ser observado na Figura 2.2, abaixo.



**Figura 2.2 – Elemento de Membrana em Espiral para o Processo de Osmose Inversa (SILVEIRA, 1999)**

O uso de membranas filtrantes está largamente disseminado na indústria e nas empresas de saneamento básico. Na indústria, as membranas são utilizadas em linhas de produção, para, por exemplo, clarificar cerveja, sucos ou separar as proteínas do leite. Outra



aplicação de membranas que está crescendo muito na indústria é a produção de água de processo de alta qualidade e o emprego de sistemas de membrana para tratamento e reuso de águas residuárias.

No saneamento básico as membranas são empregadas principalmente para a produção de água potável, dessalinização de águas salobras, remoção de cor e dureza da água e para o tratamento e reuso de esgotos. Uma membrana é semipermeável quando, sob condições idênticas, transporta espécies moleculares diferentes com velocidades diferentes.

As exigências sobre uma membrana conveniente para a osmose inversa são severas. Algumas propriedades como exemplo, da membrana de osmose inversa, importantes na economia do processo de dessalinização, são (PERRY E CHILTON, 1986):

- seletividade da membrana em relação à água, preferivelmente aos íons, o que determina o número de estágios pressurizados necessários à produção de água potável;
- taxa de permeação da água por unidade de gradiente de pressão, o que determina as dimensões do equipamento pela taxa de produção unitária de água potável;
- durabilidade da membrana, que determina o número de vezes que a membrana deve ser substituída.

Estas propriedades são inerentes à manutenção adequada, o que vai permitir cada vez mais uma longa vida nos sistemas de dessalinização, principalmente quando realizadas as limpezas químicas em tempos hábeis, o que leva a baixos custos de investimentos e benefícios em relação a outros métodos de obtenção de água de boa qualidade para consumo humano.

## 2.6. PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

A partir do início da década de 70, em adição aos processos clássicos de separação como, destilação, filtração, absorção, troca iônica, centrifugação, extração por solvente, cristalização e outros, surge uma nova classe de processos que utiliza membranas como barreira seletiva. Estes processos têm sido desde o surgimento, de elevada

---

importância para a humanidade apartir da comunidade científica, tendo em vista vários fatores apresentados pelos mesmos. Dentre esses fatores, estão as vantagens em seus usos, o que fizeram os processos de separação por membranas (PSM), atingirem o status de processos comerciais de larga escala.

As vantagens referentes são:

#### ECONOMIA DE ENERGIA

Os processos de separação por membranas, em sua grande maioria, promovem a separação sem que ocorra mudança de fase. Neste sentido são processos energeticamente favoráveis. Esta é uma das razões pela qual seu desenvolvimento coincide com a crise energética dos anos 70, devido ao elevado preço do petróleo na época.

#### SELETIVIDADE

A seletividade é outra característica importante dos processos com membranas. Em algumas aplicações estes processos se apresentam como a única alternativa técnica de separação. No entanto, na maioria dos casos, processos híbridos, envolvendo processos clássicos e processos com membranas, cada qual atuando onde é mais eficiente, tem se mostrado como a opção mais econômica e eficiente de separação.

#### SEPARAÇÃO DE TERMOLÁBEIS

Como, via de regra, os processos com membranas são operados à temperatura ambiente, eles podem ser aplicados no fracionamento de misturas envolvendo substâncias termo sensíveis. Por este motivo eles têm sido largamente empregados na indústria farmacêutica e de alimentos e, mais recentemente, como uma alternativa de "down steam processe" em biotecnologia.

#### SIMPLICIDADE DE OPERAÇÃO E DE "SCALE UP"

Ao contrário da maioria dos processos de separação, os processos com membranas apresentam, ainda, a vantagem de serem extremamente simples do ponto de vista operacional e em termos de "scale up". Os sistemas são modulares e os dados para o dimensionamento de uma planta podem ser obtidos a partir de equipamentos pilotos operando com módulos de membrana de mesma dimensão daqueles utilizados industrialmente. Além disso, a operação dos equipamentos com membranas é simples e não intensiva em mão de obra (HARBERT et al, 1997).

Os processos de separação por membranas em sua maioria utilizam o gradiente de pressão como força motriz. Estes processos são conhecidos como:

- Microfiltração (MF): que é aplicado na Esterilização em indústria farmacêutica e biotecnologia, Clarificação de vinhos e cervejas, Purificação de Águas e Substituição do Uso de Terras Diatomáceas como auxiliar de filtração clássica;
- Ultrafiltração (UF): que é utilizado em Recuperação de Tintas Coloidais Utilizadas na Pintura de Veículos, Recuperação de Proteínas do Soro de Queijo, Produção de Queijo, Recuperação da Goma na Indústria Têxtil, Concentração de Gelatina e Recuperação de Óleos entre outras utilizações;
- Nanofiltração (NF) e Osmose Inversa (OI): que são usadas em diversas situações, como: Dessalinização de Água do Mar e Águas Salobras e Aplicações na indústria de Alimentos.

As principais características desses processos de separação por membranas que utilizam o gradiente de pressão como força motriz, como porosidades, pressão de operação e rendimento no processo, estão apresentadas na tabela a seguir.

**Tabela 2.1 – Porosidade de membranas, pressões de operação usuais e rendimento total do processo (Fonte: SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001; HERBERT et al., 1997)**

Membrana	Porosidade	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Rendimento
Microfiltração	0,1 µm-10 µm	< 2,09	90% - 100%
Ultrafiltração	1 nm-100nm	2,09 - 10,47	90%
Nanofiltração	200-1.000D	5,23 – 40,89	80% - 90%
Osmose Inversa	< 200D	8,38 – 209,47	Água do mar 25%-50% Água salobra 95%-99%

No caso desta pesquisa, estuda-se a aplicação da osmose inversa apenas na dessalinização de águas salobras provenientes de poços tubulares existentes na região do semi-árido paraibano.

## 2.7. OSMOSE

Osmose é uma palavra adicionada aos nossos dicionários desde o final do século passado. A palavra vem do grego (osmós) e significa "impulso". Popularmente, os estudantes caracterizam a tentativa de "aprender por osmose" como a prática de andar com um livro debaixo do braço. A brincadeira conceitua bem o fenômeno: o conhecimento (a essência) seria absorvido, ficando as páginas do livro.

O processo de osmose natural ocorre quando duas soluções de concentração diferentes encontram-se separadas por uma membrana semipermeável. Neste caso, existe uma tendência do solvente (água), da solução menos concentrada, migrar para o ambiente onde se encontra a solução de maior concentração de sais, a qual sofre uma divisão progressiva até que as duas soluções atinjam as mesmas concentrações. Este processo é impulsionado por uma grandeza chamada "pressão osmótica", até que as duas soluções atinjam concentrações iguais que é o equilíbrio osmótico (SATTAMINI, 1999).

## 2.8. OSMOSE INVERSA

A osmose inversa é um fenômeno conhecido dos cientistas desde o fim do século XIX, passou a ser aplicado em processos industriais por volta de 1960. Desde 1980 o emprego de membranas semipermeáveis sintéticas em aplicações industriais passou a se difundir, ampliando o campo de aplicação deste processo. Isto resulta em contínuas reduções de custo, não só pela maior escala de produção permitida como também pelo crescente conhecimento tecnológico adquirido (SOUSA, 2003).

Se for aplicada uma pressão na região da solução mais concentrada, ou mais salina, contra uma membrana semipermeável para a solução em estudo, já explicada no processo de osmose, será provocada uma inversão no fluxo natural. A água da solução irá passar para a região de menor concentração de sais, restando-se os íons na membrana que separa as duas soluções, esse é o princípio da osmose inversa. A pressão a ser aplicada deve ser maior que a pressão osmótica.

O processo de osmose e osmose inversa pode ser entendido na figura 2.3.

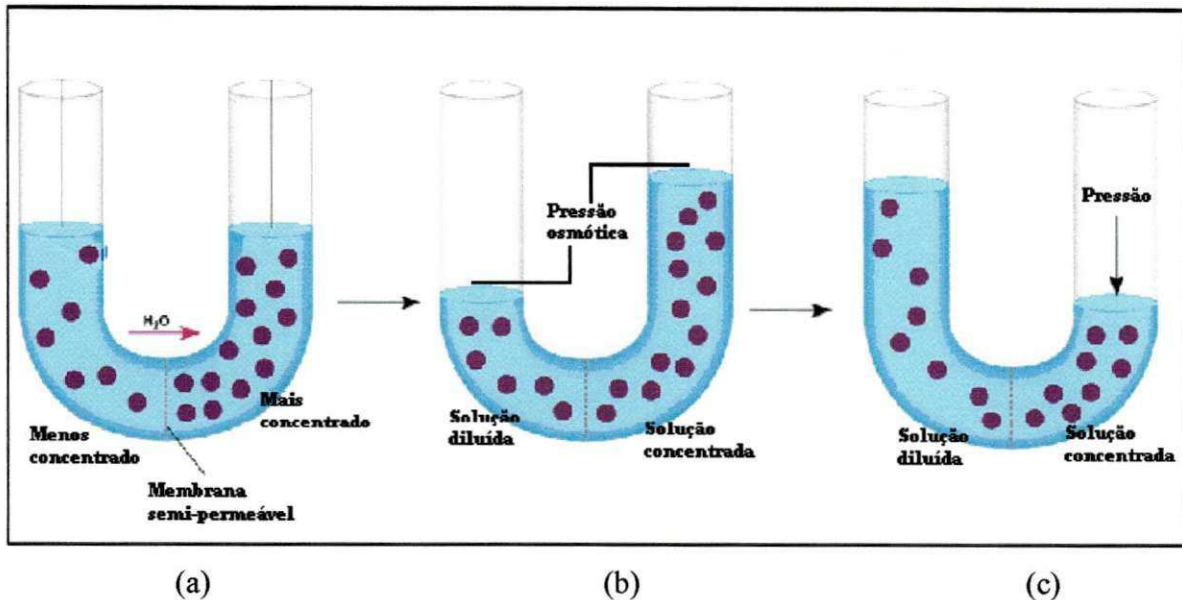


Figura 2.3 - Representação do processo de osmose e osmose inversa: (a) duas soluções, uma salina e outra sem sal, separadas por uma membrana semipermeável; (b) a água pura dilui a salgada até que seja atingido o equilíbrio osmótico; (c) a aplicação de uma pressão superior à diferença de pressão hidrostática inverte o processo. (Fonte: KERR et al., 2001)

Entre os processos de dessalinização disponíveis, a osmose inversa tem tido uma grande aplicabilidade. Além da dessalinização de águas, vem sendo empregada na recuperação de efluentes industriais, concentração de sucos, produtos farmacêuticos, processamento de alimentos e bebidas, soro de leite na fabricação de queijo, diálises, obtenção de água ultrapura, produção de aminoácidos para a engenharia bioquímica, etc, (BRANDT et al, 1992).

Este processo tem a capacidade de separar microsolutos com diâmetros menores que  $0,0001\mu\text{m}$ , através do mecanismo solução-difusão. Para partículas com diâmetros superiores, o mecanismo de separação será determinado pelo tamanho das partículas presentes na solução e pelo diâmetro dos poros existentes nas membranas. As membranas de osmose inversa requerem uma pressão superior comparadas com os outros tipos de membranas por apresentarem poros mais fechados (SILVEIRA, 1999).

A osmose inversa é um processo de separação com membranas, usado quando se deseja reter solutos de baixo peso molecular tais como sais inorgânicos ou pequenas moléculas orgânicas como glicose. Por este motivo as membranas de OI devem ser mais fechadas apresentando, portanto, uma maior resistência à permeação. Daí, pressões mais

---

elevadas do que as utilizadas em UF são necessárias nos processos de OI. Na verdade as membranas de OI apresentam características intermediárias entre as membranas porosas usadas em MF e UF e as membranas densas empregadas em pervaporação e permeação de gases. O nome Osmose Inversa se deve ao fato de que neste tipo de processo o fluxo permeado é no sentido contrário do fluxo osmótico normal (HARBERT et al, 1997).

### 2.9. APLICAÇÕES E VANTAGENS DA OSMOSE INVERSA

O desenvolvimento, relativamente, recente de novas gerações de membranas, resistentes à ampla faixa de pH, altas temperaturas, e à presença de produtos cáusticos, além de fluxos permeados mais elevados, ampliou o campo de aplicação de osmose inversa. Assim, em adição à sua aplicação tradicional na dessalinização de águas salobras e do mar, a OI tem sido utilizada no tratamento de águas, na produção de água ultrapura, no tratamento de águas duras, na indústria alimentícia, em aplicações médicas e/ou farmacêuticas, cosméticos e em muitas outras aplicações.

A OI pode também ser usada em combinação com a ultrafiltração, pervaporação, destilação e outros processos clássicos de separação, nos chamados processos híbridos de separação, mais eficientes do que cada uma dessas técnicas isoladamente (HABERT et al, 1997).

Em adição às membranas tradicionais de Osmose Inversa têm-se hoje as membranas de Nanofiltração (NF). Mais abertas, e assim, com baixa rejeição ao sal, mas com fluxo permeado elevado, e podendo ser operada em pressões mais baixas, a NF vem sendo utilizada num número crescente de aplicações (HABERT et al, 1997).

Com relação às vantagens do processo de osmose inversa, destacamos entre outras, as seguintes:

- baixo custo de investimento;
- 75% de rendimento de água purificada;
- 99% de redução de sais minerais, bactérias e partículas;
- baixo consumo energético;

- facilidade na construção, operação e manutenção, devido à natureza modular do processo;
- necessidades de pequenos espaços;
- processo contínuo.

## 2.10. SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO POR OSMOSE INVERSA

O sistema de dessalinização consiste de uma fonte hídrica, de um conjunto de motor bombas, dessalinizador e reservatórios (NOTÍCIAS CNPQ, 2005). Os sistemas de OI podem em relação às pressões de uso, serem considerados como sistemas de baixa e alta pressão.

Os sistemas de baixa pressão referem-se principalmente, aqueles sistemas com uma pressão de alimentação da água, menor que  $7 \text{ kgf/cm}^2$ , e tem uso basicamente residencial. Essas unidades fornecem entre 90 a 130 litros de água por dia, com rejeito de até 95%.

Os sistemas de alta pressão referem-se, principalmente, aqueles que operam com pressões na faixa de 7 a  $70 \text{ kgf/cm}^2$ , dependendo das membranas escolhidas e da água que está sendo tratada. São usualmente utilizados em aplicações comerciais como indústrias, onde grandes volumes de água são requeridos, bem como, níveis altos de pureza da água.

Muitos sistemas dessa natureza possuem membranas múltiplas arranjadas em paralelo para fornecimento da quantidade de água desejada. A água processada em um primeiro estágio do tratamento pode ser dirigida para módulos adicionais de membranas, aumentando os níveis de purificação da água, e o próprio rejeito também pode ser dirigido para sucessivos outros módulos para aumentar a eficiência do sistema (LOPES, 2004).

Sistemas de dessalinização possuem variáveis de medidas, as quais dão informações de suas condições de funcionamento, no momento em que o mesmo opera na dessalinização de águas salobras.

No entanto, para cada tipo de água deve ser feito um estudo prévio no sentido de diagnosticar um pré-tratamento adequado, de acordo com a qualidade da água a ser tratada e do destino que a mesma irá tomar após o tratamento final. O estudo prévio da água

---

também indica as possíveis soluções de limpeza das membranas, tendo em vista a detecção das impurezas presentes, como também a melhor maneira de se conseguir o bom desempenho do sistema, de acordo com a manutenção.

Neste caso, a origem da água é questionada, como também o tipo de consumo que vai ser feito, evitando assim que haja desperdícios e/ou muitos custos na execução dos trabalhos do sistema de dessalinização, acarretando em investimentos supérfluos para os fins desejados.

### **2.11. OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO**

A operação e manutenção são as chaves do sucesso do desempenho de um sistema de dessalinização por membranas. Recomenda-se a formação de um banco de dados, o qual deve ser regularmente analisado com o objetivo de detectar os principais problemas, antes de o sistema entrar em colapso (FRANÇA, 2005).

A implantação de centenas de dessalinizadores em uma área tão vasta quanto o Nordeste Brasileiro cria um problema não-trivial de manutenção. Por um lado, é essencial que esses equipamentos tenham uma boa manutenção para que a água obtida no processo seja de boa qualidade e para que a vida útil desses equipamentos seja maximizada, conseqüentemente reduzindo o custo da água dessalinizada. Por outro lado, a falta de pessoal qualificado junto aos dessalinizadores e a grande área geográfica coberta pelos mesmos dificultam e encarecem a tão necessária manutenção (FORMIGA, 2005).

Tem-se observado também que o custo de troca de membranas se dá em função da falta de manutenção preventiva nos sistemas de dessalinização. Quando o sistema não apresenta um pré-tratamento adequado, as membranas passam por um programa de limpeza química com mais freqüência. Quando as membranas não são limpas, as impurezas tendem a se depositar em sua superfície causando uma gradual diminuição do fluxo e da rejeição de sais (FRANÇA, 2005).



---

## 2.12. INCRUSTAÇÕES

Durante o processo de dessalinização podem surgir alguns problemas que afeta a produção de água permeada, como as incrustações. As incrustações são fenômenos, capazes de provocar uma queda no fluxo do permeado e/ou o aumento da passagem de sais com o tempo. Há incrustantes formados por materiais em suspensão “fouling”, de natureza orgânica (BRANT et al, 1993); e também formados por depósitos minerais “scaling”, insolúveis nas condições de pH e temperatura, que se precipitam na superfície da membrana (BENNET, 1996).

Um dos meios de controle do “fouling” é, portanto, o cuidado na escolha do tipo de membrana, no projeto do módulo, como também do processo de pré-tratamento para a água de alimentação (FRANK, 1998).

Outro fenômeno que pode ocorrer na formação de incrustações é a concentração de polarização, fenômeno no qual a concentração local de sais dissolvidos próximo à superfície da membrana é maior do que a concentração média da água que flui em volta da superfície considerada. Devido a este fato, a eficiência separativa da membrana diminui gradualmente à medida que a camada de solução de sais vai aumentando de espessura. Acompanhando o aumento de sal na interface, há um aumento da pressão osmótica da solução, o que diminui a pressão que impede a passagem da água através da membrana.

Assim sendo, as incrustações podem ser causadas por: Concentração de polarização, formação de uma camada de gel na superfície do filme da membrana, obstrução dos poros da membrana por materiais em suspensão, incrustação biológica e degradação da própria membrana (ABDEL-JAWAD et al., 2002).

A incrustação sempre estará presente na operação de membranas de OI. Entretanto, um convívio “pacífico” se torna possível, à medida que métodos de manutenção preditiva sejam mitigados, ou seja, exista uma melhora na capacidade de se prognosticar os problemas. Essa intervenção preventiva visa minimizar os efeitos através de correções da manutenção, operação ou mesmo erros de projeto. O diagnóstico preciso é de fundamental importância para manter o sistema operando satisfatoriamente (CAVALCANTE, 2003).

### 2.12.1. Indicadores de Incrustações

Os indicadores de partículas suspensas, usados na indústria da osmose inversa são a turbidez e o índice de densidade de sedimentos (IDS) (SUDAK, 1990).

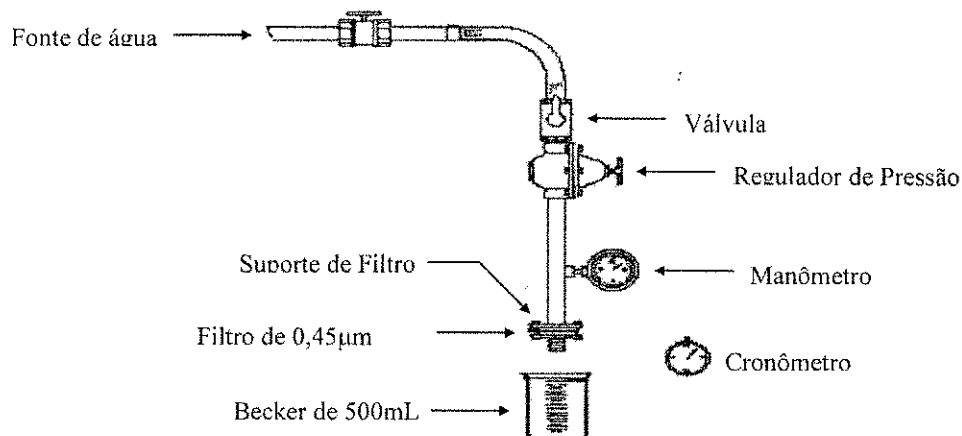
Uma consideração importante na operação de sistemas de OI é a tendência da água de alimentação de bloquear as membranas, sendo um dos parâmetros de projetos mais importantes. O desempenho dos sistemas, custo de operação, exigências de pré-tratamento e frequência de limpezas são afetados por estes bloqueios na membrana (TAYLOR & JACOBS, 1996).

A tendência de bloqueio das membranas pode ser avaliada em testes específicos de determinação de índices de incrustações e, dentre outros, o índice mais utilizado é o IDS. O equipamento básico, conforme mostra a figura 2.4 consiste de um sistema de filtração pressurizada equipado com filtros de 0,45µm de porosidade e diâmetro de 47mm. A amostra deve ser filtrada a uma pressão de 2,1 kgf/cm<sup>2</sup> (TAYLOR & JACOBS, 1996).

O IDS é calculado a partir de três intervalos de tempo: o primeiro intervalo ( $t_i$ ) é o tempo necessário para a coleta dos primeiros 500mL de permeado, o segundo intervalo ( $t_f$ ) é o tempo necessário para a coleta dos últimos 500mL de permeado. O terceiro intervalo de tempo ( $t_t$ ) varia de 5, 10 ou 15 minutos e é o intervalo de tempo entre o término da coleta dos primeiros 500mL de permeado e o início da coleta dos segundos 500mL de permeado. O tempo padrão para o  $t_t$  é de 15 minutos. O IDS é determinado através da Equação 2.1 (TAYLOR & JACOBS, 1996).

$$IDS = \frac{100 \left[ 1 - \left( \frac{t_f}{t_i} \right) \right]}{t_t} \quad ; \quad 2.1$$

O teste do IDS é um teste de fouling por filtração frontal. Esse teste não reflete com exatidão as condições de acúmulo de material em sistemas operados por filtração tangencial, ou em sistemas de filtração frontal com retrolavagem periódica da membrana (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001).



**Figura 2.4 – Equipamento básico para medição do IDS. (Fonte: AMJAD, 1992)**

Em geral, os sistemas de OI que operam com fontes de água de alimentação com valores de IDS menores que 1 funcionam por anos sem problemas, aqueles que operam com fontes que tem valores do IDS menores que 3 funcionam por meses sem necessidade de limpeza da membrana. Entretanto, os sistemas que operam em fontes de água com valores de IDS entre 3 e 5 são limpos regularmente e considerados sistemas problemáticos. Valores de IDS acima de 5 não são aceitáveis (AMJAD, 1992). Na verdade, os limites máximos de turbidez e IDS são: turbidez de 1,0 NTU e IDS de 4,0. A operação contínua de um sistema de osmose inversa com água de alimentação, cujos valores de turbidez ou IDS são próximos desses limites, pode resultar num significativo entupimento nas membranas (fouling) (SILVEIRA, 1999).

Os indicadores dos níveis de saturação dos sais solúveis, na corrente do concentrado são o Índice de Saturação de Langelier e razões de saturação. O ISL é um número usado para prever a estabilidade do carbonato de cálcio da água, isto é, se uma água irá se precipitar, dissolver ou ficar em equilíbrio com o carbonato de cálcio (EDSTROM, 2003). A avaliação do risco de formação de precipitados de carbonato de cálcio em águas salobras com STD até 10.000 mg/L é avaliado através do valor do ISL.

Valores de ISL negativos indicam que não há potencial de precipitação de carbonato de cálcio. Se o ISL for positivo indica que a precipitação do carbonato de cálcio

---

poderá ocorrer, para valores de índice cada vez mais positivos, o potencial de precipitação aumenta. Para valores de ISL iguais a zero, não haverá potencial de precipitação do carbonato de cálcio, mas pequenas variações de concentração e temperatura podem mudar o índice (EDSTROM, 2003).

É importante ressaltar que o potencial de formação de precipitado químico na superfície da membrana não é condicionado somente pela composição química da água bruta. O uso de cloreto férrico ou sais de alumínio na etapa de coagulação em processos de pré-tratamento pode comprometer seriamente o fluxo das membranas de OI ou de NF pela formação de precipitados químicos (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001).

### 2.13. LIMPEZA QUÍMICA DAS MEMBRANAS

Os ciclos de limpeza química ocorrem em intervalos de semanas a meses, dependendo da gravidade do problema de incrustação. Cada ciclo demora entre 45 minutos a 24 horas, dependendo da dificuldade de remoção do biofilme e/ou do material precipitado, e normalmente, restaura o fluxo das membranas para valores próximos do fluxo inicial. Um ciclo de limpeza química é desencadeado quando os parâmetros de operação (fluxo ou pressão) atingem valores pré-determinados (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001). Em sistemas de osmose inversa, os ciclos são iniciados quando for atingido um dos seguintes parâmetros (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001; FILM TEC, 1995):

- diminuição do fluxo normalizado em cerca de 10%;
- aumento da pressão em 15%;
- aumento da passagem de sais em 5%.

Antes de fazer a limpeza química é importante identificar, através de análises na água de alimentação e do concentrado, os tipos de incrustações com a finalidade de determinar a *solução de limpeza* apropriada para manutenção do sistema.

---

A seguir é apresentado um sumário do tipo de produto químico para preparar a solução de limpeza em função das substâncias incrustantes (EL-DESSOUKY & ETTOUNEY, 2002).

Óxidos de metais e carbonato de cálcio: Soluções de ácido sulfúrico, ou ácido clorídrico, ou ácido cítrico com um pH ajustado entre 3 e 4.

Sulfato de cálcio: Limpar com solução de sal dissódico do ácido etilenodiaminotetracético (Na<sub>2</sub>EDTA).

Impurezas biológicas e orgânicas: Soluções de bissulfito de sódio, ou ácido peracético, seguido de uma lavagem de detergente.

A aplicação de ciclos de limpeza química, em intervalos adequados, impede o comprometimento irreversível da membrana e o crescimento excessivo de biofilme. A efetividade do processo de limpeza depende da formulação da solução de limpeza, da frequência e do protocolo aplicação (LIRA, 2004).

O pH da solução de limpeza deve ser compatível com a faixa de pH da membrana. A temperatura da solução de limpeza é outro fator importante a ser considerado no processo. Soluções com temperaturas mais elevadas são geralmente mais eficientes para a limpeza das membranas.

Um protocolo típico para a limpeza de membranas de osmose inversa ou nanofiltração consiste das seguintes etapas (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001):

- lavagem inicial da membrana com permeado durante 10 a 20 minutos;
- recirculação da solução de limpeza na pressão máxima de filtração, entre uma a várias horas a temperaturas elevadas (30°C a 40°C) sendo o material particulado removido por filtração da solução de limpeza;
- deixar as membranas de embebidas com a solução de limpeza, por períodos que podem variar de uma hora a doze horas;
- recirculação final da solução de limpeza durante um período de 20 a 40 minutos;
- lavagem final com permeado por 10 a 20 minutos;
- reinício da operação normal do sistema.

A composição da solução de limpeza deve ser alterada, após vários ciclos, para evitar a seleção de organismos resistentes aos componentes da solução. É importante comparar a eficácia da limpeza de membranas por diferentes soluções para otimizar o rendimento de um sistema de osmose inversa (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001). A Figura 2.5 mostra um esquema para compreensão do processo de limpeza química de membranas em sistemas de osmose inversa.

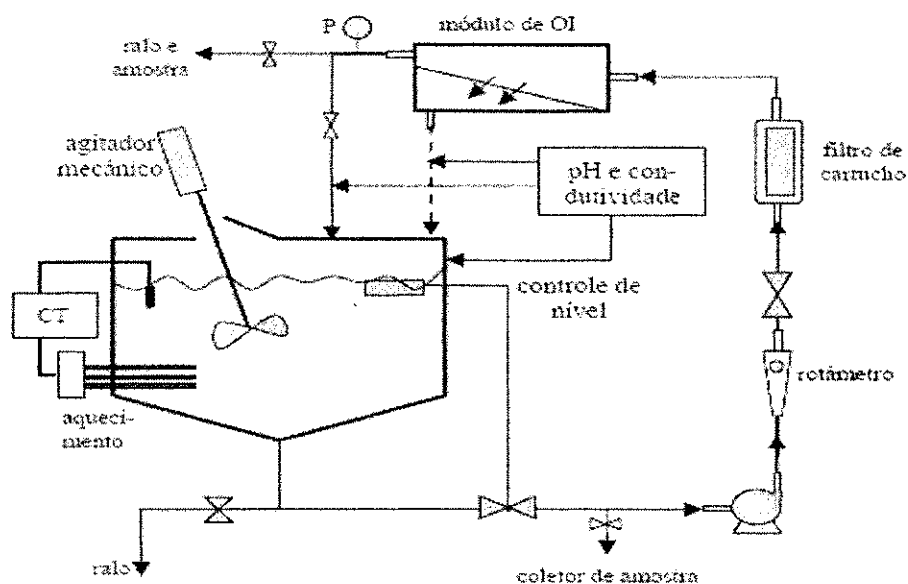


Figura 2.5- Esquema típico de um sistema de limpeza química. (FRANÇA, 2004)

## 2.14 PRÉ-TRATAMENTO E PÓS-TRATAMENTO

As operações com membranas requerem alguma medida de pré-tratamento da água de alimentação do processo, onde o mesmo é considerado a chave para o sucesso da operação de uma planta de OI (ISAIAS, 2001). O pré-tratamento tem o objetivo de reduzir o potencial de incrustação na água de alimentação do sistema, devido à remoção de partículas micropoluentes e microorganismos, bem como a prevenção da formação de incrustação inorgânica, melhorando assim a qualidade da água de alimentação num nível

---

que resultará numa maior segurança de operação para os sistemas de osmose inversa (DUDLEY & DALTON, 1997).

O pré-tratamento adequado é feito em função da água de alimentação, da sua composição físico-química e do projeto do processo, tendo por finalidade maximizar a eficiência e a vida útil das membranas, através da minimização do scaling e do fouling. Uma membrana de osmose inversa pode ser degradada por materiais a ela nocivos ou pela saturação de sua capacidade de rejeição de sais (FILHO, 2000).

Águas de subsolo estão geralmente biologicamente estabilizadas, ou seja, possuem baixa carga de microorganismos formadores de biofilme e baixa disponibilidade de compostos orgânicos utilizados por estes microorganismos. Estas águas podem ser bombeadas para o sistema de osmose inversa sem pré-tratamento, mas para garantir a operação segura do sistema pode-se fazer adição de anti-incrustantes, correção de pH e pré-filtração através de filtros de cartucho de 5  $\mu\text{m}$  (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001).

Dependendo da qualidade e do uso da água permeada esta poderá passar por um pós-tratamento. Poderá haver necessidade de correção de pH, desinfecção, remoção de sulfeto de hidrogênio por oxidação e aeração, fluoração da água para evitar cáries dentárias, colunas de troca iônica para produção de água ultrapura, remoção de gás carbônico por aeração (OLIVEIRA, 2002).

O processo com membranas remove essencialmente, todos os microorganismos, dentre eles os patogênicos, a maioria dos sais e outros solutos presentes na água de alimentação. Porém todos os gases dissolvidos, incluindo dióxido de carbono e hidrogênio sulfídrico passa através da membrana. Com a finalidade de remover esses gases do permeado, o processo de osmose inversa necessita do pós-tratamento adequado antes de ser utilizado o produto para o consumo ao qual se destina. (TAYLOR & JACOBS, 1996).

## 2.15. PRINCIPAIS EQUAÇÕES EMPÍRICAS E FATORES QUE REGEM O PROCESSO DE OSMOSE INVERSA

### 2.15.1. Pressão osmótica de uma solução iônica

A pressão osmótica depende da concentração do soluto, da temperatura da solução e das espécies de íons presentes. Quanto maior for a concentração da solução, maior será o valor da pressão osmótica da mesma (BRANDT et al., 1993). A pressão osmótica nas condições indicadas e conhecidas é dada pela equação seguinte, (Equação de Van't Hoff):

$$\pi = \sum v_i c_i RT \quad 2.2$$

Onde:

$\pi$  - pressão osmótica da solução iônica em questão (kgf/cm<sup>2</sup>)

$v_i$  - carga elétrica do íon  $i$ , ou número de íons formados na dissociação;

$c_i$  - concentração molar do soluto na solução (mol/L);

$R$  - constante universal dos gases perfeitos (kgf. L/cm<sup>2</sup>mol K);

$T$  - temperatura da solução, absoluta (K).

Esta equação é válida para soluções diluídas. Para soluções concentradas ela é multiplicada por um coeficiente osmótico que é estimado de dados de pressão de vapor ou do ponto de congelamento da solução avaliada, no caso, a água. A pressão osmótica para água salobra, no caso da osmose inversa, é função da concentração de sais e do tipo das moléculas orgânicas contidas na água de alimentação (AMJAD, 1992).

### 2.15.2. Fluxo do Permeado

O fluxo do permeado através de uma membrana de osmose inversa é inversamente proporcional à área da membrana e proporcional à variação de pressão osmótica e hidráulica (TAYLOR & JACOBS, 1996), é dado pela seguinte equação:

$$J_w = k_w \cdot (\Delta P - \Delta \pi) = Q_p / A \quad 2.3$$

Onde:

$J_w$  - taxa de fluxo de permeado (L/ cm<sup>2</sup>. min);

$K_w$  - coeficiente de transferência de massa do solvente (L/ kgf.min);



$\Delta P$  - gradiente de pressão aplicada (kgf/ cm<sup>2</sup>);

$\Delta \pi$  - gradiente de pressão osmótica (kgf/ cm<sup>2</sup>);

$Q_p$  - vazão do permeado (L/min);

$A$  - área de permeação da membrana (cm<sup>2</sup>).

Na osmose inversa os sais dissolvidos e moléculas orgânicas retidas na superfície da membrana causam o aumento da concentração próxima à superfície considerada, que, por conseguinte causa aumento no valor da diferença de pressão osmótica da solução, o que tende a diminuir o fluxo de permeado.

### 2.15.3. Fluxo do Concentrado

O transporte de sais através da membrana é proporcional à concentração ou à diferença de potencial químico, dependendo de concentração e independendo da pressão aplicada ao sistema (TAYLOR & JACOBS, 1996). Desta maneira, o fluxo do concentrado pode ser representado pela seguinte equação:

$$J_i = k_i \Delta C = Q_p C_p / A \quad 2.4$$

Onde, neste caso:

$J_i$  - fluxo mássico do soluto (g/cm<sup>2</sup>.min);

$K_i$  - coeficiente de transferência de massa do soluto (cm/min);

$\Delta C$  - gradiente concentração (mg/L);

$Q_p$  - vazão do permeado (L/min);

$C_p$  - concentração do permeado (mg/L).

$\Delta P$ ,  $\Delta \pi$  e  $\Delta C$  são dados por:

$$\Delta P = (P_a + P_c) / 2 - P_p \quad 2.5$$

$$\Delta \pi = (\pi_a + \pi_c) / 2 - \pi_p \quad 2.6$$

$$\Delta C = (C_a + C_c) / 2 - C_p \quad 2.7$$

De forma que:

$P_a$ ,  $P_c$ ,  $P_p$  são a pressão de alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente.

$\pi_a$ ,  $\pi_c$ ,  $\pi_p$  são a pressão osmótica da alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente.

$C_a$ ,  $C_c$ ,  $C_p$  são a concentração da alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente.

$\Delta\pi$  pode ser dado ainda por:

$$\Delta\pi = \left[ (TDS_a + TDS_c) / 2 - TDS_p \right] * 7,033 * 10^{-4} \quad 2.8$$

Na qual:

$\Delta\pi$  – gradiente de pressão osmótica (kgf/cm<sup>2</sup>);

$TDS_a$  – sólidos totais dissolvidos na corrente da alimentação;

$TDS_c$  – sólidos totais dissolvidos na corrente do concentrado;

$TDS_p$  – sólidos totais dissolvidos na corrente do permeado (MALLEVIALLE et al., 1986).

O TDS (Totais de Sólidos Dissolvidos), é dado em mg/L e  $\Delta\pi$  é dado em kgf.cm<sup>-2</sup>. O fator de conversão  $7,033 \times 10^{-4}$  converte a pressão para kgf/cm<sup>2</sup>.

#### 2.15.4. Taxa de Rejeição de Sais (RS)

A taxa de rejeição de sais (RS) demonstra a capacidade da membrana de rejeitar os sais dissolvidos durante a permeação da água (CHEN et al., 1997). Esta rejeição ocorre devido a água e os sais terem taxas de transferência de massa diferentes.

$$RS(\%) = \left[ (C_a - C_p) / C_a \right] * 100 \quad 2.9$$

Onde:

RS% - rejeição de sais;

$C_a$  - concentração de alimentação (mg/L);

$C_p$  - concentração do permeado (mg/L).

A taxa de rejeição de sais indica a efetividade da remoção de sais e outras espécies químicas pela membrana. Os valores de rejeição variam de 90 a 99,8%, dependendo do tipo de membrana utilizada e da água de alimentação (HYDRANAUTICS, 2002).

### 2.15.5. Fluxo de Passagens de Sais (PS)

Este fluxo é oposto à rejeição de sais e é porcentagem do sal na água de alimentação que atravessa a membrana, é calculado de acordo com a seguinte equação:

$$PS(\%) = \left( \frac{C_p}{C_a} \right) * 100 \quad 2.10$$

Onde:

PS – passagem de sais (%);

$C_a$  – concentração inicial de sais dissolvidos na corrente de alimentação (mg/L);

$C_p$  – concentração de soluto na corrente de permeado (mg/L).

Se a rejeição de sais tiver um valor muito alto, a passagem de sais pela membrana tem um valor pequeno sendo, portanto, valores inversamente proporcionais que indicam capacidade de remoção e quantidade de sais na água a ser permeada.

### 2.15.6. Recuperação

A recuperação do sistema  $r(\%)$  refere-se à razão da água convertida em água purificada ou permeada  $Q_p$ , e depende de vários fatores, como a formação de incrustações na superfície das membranas, pressão osmótica e a qualidade do permeado. Esta recuperação do sistema é dada pela seguinte expressão (BYRNE, 2002):

$$r(\%) = \left( \frac{Q_p}{Q_a} \right) * 100 \quad 2.11$$

Onde:

$r$  - nível de recuperação do sistema

$Q_p$  - vazão do permeado ( $m^3/h$ )

$Q_a$  - vazão da alimentação ( $m^3/h$ )

Sabe-se que:

$$C_a Q_a = C_p Q_p + C_c Q_c$$

Se o fluido é incompressível e a solução é diluída, a densidade  $C$  é constante, então:

$$r(\%) = \left[ \left( \frac{Q_p}{Q_p + Q_c} \right) \right] * 100 \quad 2.12$$

Onde:  $C_a$ ,  $C_p$  e  $C_c$  são as concentrações da alimentação, do permeado e do concentrado, respectivamente, e  $Q_c$  é o fluxo volumétrico do concentrado.

A recuperação máxima em qualquer instalação de osmose inversa, depende dos componentes presentes na água de alimentação, da pressão aplicada, da área de transferência de massa e do tipo de membrana utilizada no processo (SILVEIRA, 1999).

Com o aumento do nível de recuperação do sistema, mais água bruta é convertida em produto. Isto reduz o volume da água a ser rejeitada e, conseqüentemente, aumenta o valor da concentração de sais dissolvidos na corrente de rejeito, assim com a possibilidade de sua precipitação na superfície da membrana. Daí, mais um parâmetro para observação na limpeza química do sistema.

#### 2.15.7. Balanço de Massa

O balanço de massa para um sistema de dessalinização é apresentado ou indicado pela equação seguinte;

$$Q_a C_a = Q_p C_p + Q_c C_c \quad 2.13$$

Onde:

$Q_a$  – vazão de alimentação ( $m^3/h$ );

$C_a$  – concentração inicial de sais dissolvidos na corrente de alimentação (mg/L);

$Q_p$  – vazão do produto ( $m^3/h$ );

$C_p$  – concentração de sais dissolvidos na corrente de produto (mg/L);

$Q_c$  – vazão do concentrado ( $m^3/h$ );

$C_c$  – concentração de sais dissolvidos na corrente de concentrado (mg/L).

A concentração de sais dissolvidos na corrente do concentrado é matematicamente estimada, a partir da equação que indica o balanço de massa:

$$C_c = (Q_a C_a - Q_p C_p) / Q_c = (C_a - r C_p) / Q_c / Q_a \quad 2.14$$

Deste modo, temos a concentração de sais na corrente do concentrado, estimada pela equação seguinte:

$$C_c = (C_a - r C_p) / (1 - r) \quad 2.15$$

Onde:

$C_c$  – concentração do concentrado (mg/L);

Ca – concentração de alimentação (mg/L);

r - recuperação do sistema (%).

### 2.15.8. Consumo de Energia

A partir de 1995, o consumo de energia por m<sup>3</sup> de água filtrada foi reduzido consideravelmente. Tal redução ocorreu, em parte, pelo aumento da capacidade instalada por arranjo de membranas, que permitiu uma melhor otimização hidráulica da planta, e pelo aumento da eficiência energética do bombeamento, pela instalação de sistemas rotação variável em bombas de alta pressão (HOFERT, 1999).

O custo de energia elétrica para operação de membranas, é o elemento mais importante dos custos de operação e manutenção de sistemas de dessalinização de águas salobras, operadas com membranas convencionais.

A equação empírica que geralmente é usada para calcular a energia gasta durante o processo de dessalinização é dada por (TAYLOR & JACOBS, 1996):

$$E = H.(0.00315)/r.\eta_B.\eta_M \quad 2.16$$

Onde:

E – Energia consumida (kWh/ m<sup>3</sup>);

H – altura do nível da coluna de alimentação (m);

r – recuperação do sistema (%);

$\eta_B$  – eficiência da bomba (%);

$\eta_M$  – eficiência do motor (%);

(0.00315) – fator de conversão de energia para plantas de osmose inversa para kWh/ m<sup>3</sup> (TAYLOR & JACOBS, 1996).

Na prática, para os sistemas de dessalinização que se estudou, o consumo de energia é dado pela razão entre a potencia consumida pela bomba e a vazão do permeado (OLIVEIRA, 2002). A equação simplificada é a seguinte:

$$E_p = P/Q_p \quad 2.17$$

Onde, neste caso:

$E_p$  – consumo de energia prático ( $kWh/m^3$ );

$P$  – potência ativa consumida pelo sistema (W);

$Q_p$  – vazão do permeado ( $m^3/h$ ).

O consumo de energia está diretamente relacionado com o nível de recuperação do sistema de dessalinização, a eficiência da bomba e do motor, como também o número de membranas envolvidas e das soluções de alimentação do dessalinizador (OLIVEIRA, 2002).

## 2.16. CUSTOS DE OPERAÇÃO

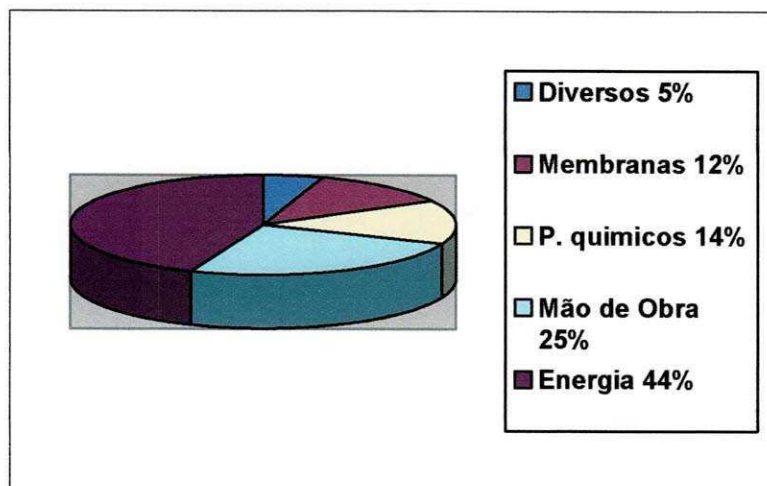
Um parâmetro bastante relevante no desempenho de sistemas de dessalinização via osmose inversa é o custo de operação com base em todos os seus componentes, devido a produção de água potável ser, de certa forma, um agravante na economia das comunidades principalmente no campo, em regiões do semi-árido nordestino, tendo em vista a escassez e o fornecimento precário.

O mundo terá que caminhar rapidamente para um rígido controle do consumo de água doce que é escassa em várias regiões e sendo assim, se torna um bem cada vez mais raro e, portanto, começa a assumir forte papel econômico (PORTUGAL, 2006).

O percentual de custos de diferentes componentes de operação e manutenção de unidades de dessalinização de águas salobras pode ser observado na figura 2.6 (FILTEAU & MOSS, 1997).

Vejamos alguns avanços que estão contribuindo para a diminuição dos custos de dessalinização de águas marinhas (REDONDO et al, 1999).

- redução dos custos de produção e melhoria da qualidade das membranas pela automação do processo de produção;
- mais área de membrana por módulo;
- aumento significativo da produtividade dos módulos;
- melhor rejeição de sais;
- aumento da resistência ao cloro;
- operação estável a pressões mais elevadas.



**Figura 2.6 - Porcentagem de custos de diferentes componentes de operação e manutenção de unidades de dessalinização de águas salobras. (Fonte: LIRA, 2004)**

O custo de reposição de membranas é um dos mais importantes componentes do custo operacional de um sistema de membranas, sua minimização depende de medidas que permitam prolongar ao máximo a vida útil das mesmas e depende da adoção de uma série de medidas durante a operação do sistema, como: monitoramento da qualidade da água de alimentação, monitoramento dos parâmetros de operação das membranas e planejamento adequado das medidas de intervenção (ciclos de limpeza química) (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001).

A osmose inversa tem se destacado como uma tecnologia bastante aceita devido seus baixos custos. Para se ter uma idéia, em 1991, uma instalação de OI em Santa Bárbara, com capacidade instalada de aproximadamente 22 mil m<sup>3</sup> por dia, produzia água a um custo de US\$ 2,1/ m<sup>3</sup>. Hoje, uma unidade em Singapura de 142 mil m<sup>3</sup> por dia produz água a um custo de US\$ 0,43 / m<sup>3</sup> (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2004).

---

### **3. EXPERIMENTAL**

Este capítulo trata da descrição dos materiais e equipamentos utilizados na parte experimental deste trabalho, bem como a apresentação dos sistemas de dessalinização assistidos, a metodologia empregada, forma de coleta de amostras de águas, monitoramento das limpezas químicas e das condições de funcionamento do sistema, descrevendo assim o desempenho dos mesmos. O acompanhamento dos sistemas de dessalinização foi feito no campo e, as análises físico-químicas como também alguns testes da pesquisa, foram realizadas no Laboratório de Referência em Dessalinização – LABDES.

#### **3.1. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS E PRODUTOS QUÍMICOS**

##### **3.1.1. Equipamentos**

- pHmetro digital portátil GEHAKA-PG 1400;
- Condutímetro portátil OAKTON;
- Aquecedor portátil.

##### **3.1.2. Produtos Químicos**

- Ácido Clorídrico da Quimex P.A 37%;
- Hidróxido de Sódio da Vetex P.A Micropérolas;
- Flocon 100

##### **3.1.3. Sistema de Dessalinização e Água para Estudo**

Os sistemas de dessalinização estudados neste trabalho são pertencentes ao município de Riacho de Santo Antonio-PB. A água utilizada também é proveniente dos poços tubulares desse município e faz parte do mesmo sistema.



---

#### **3.1.4. Sistema de Dessalinização**

Os sistemas monitorados para estudo de seu desempenho, são compostos de três elementos de membranas cada, ligados em série, em um vaso de alta pressão, para produzir água potável a partir de água salobra, operando nas condições iniciais do projeto, capaz de operar com essa água de concentração entre 1.000mg/l a 10.000mg/l.

Tanto o sistema localizado na Sede da cidade de Riacho de Santo Antonio como o sistema localizado no Sítio Tanque Raso do mesmo município citado, possuem apenas um vaso de alta pressão, de acordo como foi citado. As características desses sistemas em particular, são apresentadas nas tabelas 3.2 e 3.3.

#### **3.1.5 Procedimentos experimentais**

A etapa compreendida do projeto acompanha o desempenho dos sistemas já instalados, o qual servirá como base para avaliar os benefícios em função dos custos, de modo que sejam observadas vantagens em se tratar a água salobra dos poços da região do semi-árido a partir das informações geradas no processo.

Com vistas ao desempenho dos sistemas, estudou-se parâmetros como: procedimento de limpeza química das membranas, análise físico-químicas antes e após a limpeza química, variação de pressão de operação do sistema, vazão dos efluentes, etc. Além disso, observou-se as condições de funcionamento dos mesmos e sua manutenção, para cálculo de custo-benefício na obtenção de água potável no campo.

As etapas de realização desse trabalho se baseiam nas visitas técnicas aos sistemas de dessalinização instalados no campo, para aquisição de informações sobre a qualidade da água e manutenção, avaliando seus desempenhos buscando a meta almejada da pesquisa, inclusive com o monitoramento das limpezas químicas das membranas.

De acordo com o cronograma de execução dos trabalhos para essa pesquisa, foram feitas coletas de amostras de água bruta, do permeado e do concentrado e, em seguida realizadas as análises físico-químicas, que também foram feitas antes e após o

---

processo de limpeza química das membranas nos sistemas monitorados, observando-se os resultados nas mudanças ocorridas no processo e suas vantagens.

As análises físico-químicas após o pré-tratamento e o processo de dessalinização no campo são necessárias para estudar a taxa de rejeição de sais de cada componente presente na água bruta e a variação da pressão osmótica de cada corrente, já que constituem parâmetros a serem avaliados no tratamento da água salobra e sua determinação em água potável destinada a consumo racional.

Em seguida, foram monitorados nos sistemas estudados no campo, os dados das variáveis de medidas, pressão de cada permeador e vasões do concentrado e permeado, com o objetivo de estudar o efeito da variação de pressão em função da qualidade da água bruta e tempo de operação.

Foram realizadas limpezas químicas dos elementos de membranas dos sistemas estudados, apenas para monitorar o custo da limpeza em função da necessidade do sistema e assim acompanhar o desempenho total.

### **3.1.6 Dados obtidos dos Sistemas de Dessalinização por OI estudados**

De acordo com as visitas feitas aos sistemas, obtiveram-se as características dos mesmos e suas condições de funcionamento. As características dos sistemas visitados para prosseguimento do plano de trabalho e realização dos estudos necessários se encontram nas tabelas 3.2 e 3.3.

### **3.1.7 Sistema de Dessalinização de Riacho de Santo Antonio-PB, (Sede)**

O dessalinizador é composto de um vaso de alta pressão, com três elementos de membranas, três filtros de cartuchos, uma bomba de alta pressão com motor de 3,0 CV DANCOR, uma bomba de auxílio com motor de 0,5 CV, uma bomba dosadora, cinco manômetros, um quadro elétrico e sua distribuição hidráulica é composta de tubulações de PVC (1/2”) E CPVC (3/4”), o pré tratamento químico é feito com Flocon 100. A bomba de retrolavagem também é da marca DANCOR, monofásica, com 1/3 CV de potência.



Figura 3.1- Sistema de Dessalinização de Riacho de Santo Antônio-PB, (Sede)

Na tabela 3.2 estão as informações preliminares do sistema e seu estado de funcionamento.

Tabela 3.1 - Características do sistema de dessalinização de Riacho de Santo Antonio-PB-SEDE

<b>Número de Membranas</b>	<b>Capacidade de produção</b>	<b>Empresa fabricante</b>	<b>Qc L/min</b>	<b>Qp L/min</b>
3	0,5 m <sup>3</sup> /h	Perenne	10.5 LPM	10 LPM
<b>P1 (Kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>P2 (Kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>P3 (Kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>P4 (Kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>P5 (Kgf/cm<sup>2</sup>)</b>
1.8	1.8	13	12	Desligado
<b>Kp (mS)</b>	<b>Kr (mS)</b>	<b>K ab (mS)</b>	<b>pH p</b>	<b>pH r</b>
0.80	19.50	13.02	5.60	6.70
<b>pH bruta</b>	<b>Vazão do poço</b>	<b>Rede elétrica(V)</b>	<b>N. de pessoas beneficiadas</b>	<b>Capacidade dos tanques</b>
6.77	2,5 m <sup>3</sup> /h	Trifásica 220	1200 pessoas	5 m <sup>3</sup>

O pré-tratamento da água de alimentação do sistema também é feito com solução ácida do tipo HCl (Ácido Clorídrico). Todas as instalações necessárias existem no local do poço que foi perfurado desde o ano 2000 e abastece a comunidade que dista 150m do local.

### 3.1.8 Sistema de Dessalinização de Riacho de Santo Antonio-PB, (Tanque Raso)

Este sistema de dessalinização tem as características básicas do outro. A tabela 3.3 mostra as informações preliminares do sistema, verificadas na visita técnica realizada ao local.

**Tabela 3.2 - Características do sistema de dessalinização do Sítio Tanque Raso**

<b>Número de Membranas</b>	<b>Capacidade de produção</b>	<b>Empresa fabricante</b>	<b>Qc L/min</b>	<b>Qp L/min</b>
3	0,42 m <sup>3</sup> /h	Perenne	18	8
<b>P1 (Kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>P2 (Kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>P3 (Kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>P4 (Kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>P5 (Kgf/cm<sup>2</sup>)</b>
10	9	2.8	1.4	Desligado
<b>Kp (mS)</b>	<b>Kr (mS)</b>	<b>K água bruta (mS)</b>	<b>pH p</b>	<b>pH r</b>
0.74	12.9	10.08	7.4	8.4
<b>pH bruta</b>	<b>Vasão do poço</b>	<b>Rede elétrica(V)</b>	<b>N. de pessoas beneficiadas</b>	<b>Capacidade dos tanques</b>
8.3	3 m <sup>3</sup> /h	Monofásica 220	200 pessoas	5 m <sup>3</sup>

O sistema é constituído de três filtros de cartucho, três membranas de osmose inversa confinadas em série em um vaso de alta pressão, uma bomba de alta pressão com motor de 2 CV DANCOR monofásica, uma bomba de auxílio também com motor DANCOR ¼ CV. Os tanques de alimentação e de permeado são de fibra de vidro, não existindo tanque para concentrado, sendo este misturado com a água bruta e sendo dado como água de beber aos animais.

O pré-tratamento para a água de alimentação do sistema é feito através dos filtros de cartucho e com base do tipo Flocon. A fonte hídrica é subterrânea, proveniente de poço tubular (tubulação de PVC), com 60 m de profundidade, perfurado no ano de 1985, possuindo abrigo e caixa d'água.

:



**Figura 3.2- Sistema de Dessalinização de Riacho de Santo Antônio-PB, (Tanque Raso)**

### **3.2 PROCESSO EXPERIMENTAL**

Os sistemas de dessalinização estudados foram denominados de Sistema I aquele de Riacho de Santo Antonio-Sede da cidade e de Sistema II o do Sítio Tanque Raso, do mesmo município, nas quais foram realizadas as bateladas de maneiras diferentes, de acordo com as condições de funcionamento particulares dos mesmos.

Durante as bateladas foram analisadas a condutividade elétrica e o potencial hidrogeniônico das soluções de limpeza e da água permeada, como também a concentração e outros parâmetros do permeado e do rejeito. Dentro desses procedimentos, foram feitos testes de permeação e vazão das membranas em estudo, nos próprios sistemas e, dependendo da necessidade, separadamente, para obtenção de dados mais relevantes. Além disso, foi medido o ISL (Índice de Saturação de Langelier) e o STD (Sólidos Totais Dissolvidos) da água de alimentação, concentrado ou rejeito e permeado dos dois sistemas, para melhor compreensão do desempenho das membranas, do sistema em geral e do tipo de água trabalhada.

Uma das etapas foi a realização no laboratório, de análises físico químicas das amostras de água adquiridas nas visitas e bateladas feitas aos sistemas, para se conhecer a concentração de sais presentes na água de alimentação, concentrado e permeado e conseqüentemente nas membranas.

---

Neste trabalho foi introduzida a etapa de lavagem química dos elementos de membranas em todos os casos, apenas com o objetivo de estudar também o efeito de manutenção no desempenho, retirada de sais incrustados e, avaliação de custo benefício do fornecimento de água potável em comunidades do campo. Nesta etapa de realização dos trabalhos utilizou-se apenas o ácido clorídrico como solução de limpeza, tendo em vista as condições dos sistemas.

Uma das fases do processo foi observar as válvulas do sistema se estavam em condições de funcionar perfeitamente, como também as bombas e suas condições preliminares, estrutura e encanações.

### **3.2.1. Observações Importantes na Limpeza Química das Membranas**

Na lavagem química das membranas de osmose inversa do Sistema I, foi feito de acordo com o procedimento de lavagem, a circulação de solução de limpeza (HCl, pH 2,78), sendo descartado o volume de solução depois de passar pelas membranas.

Em seguida, foi medido o pH e condutividade elétrica da solução, anotando-se os primeiros pontos. Esses valores encontram-se na Tabela A1, do anexo I.

Depois desse procedimento, a solução de limpeza permaneceu por 15 minutos no interior do vaso com as membranas nas condições iniciais, sendo depois desse tempo, o volume de solução descartado e novamente anotado o valor final do pH e da condutividade elétrica. Estes valores também estão descritos na tabela A1 do anexo I.

Após o descarte da solução, o equipamento foi ligado com nova solução nas condições descritas e monitorado o comportamento da condutividade elétrica e do pH. Foram anotados na tabela a partir do ponto 35 minutos, esses valores de pH e Kr de 10 em 10 minutos até estabilização do valor, indicando a condição de limpeza almejada.

Houve também situações para o Sistema II, em que os elementos de membrana foram estudados em separado com limpeza química específica e feito testes de suas condições de operação, no sentido de se observar o desempenho de cada uma, de acordo com a manutenção dada e do tipo de água tratada. Os valores referentes a esta limpeza química, estão descritos nas Tabelas A2, A3 e A4 do anexo I.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste Capítulo são avaliados e discutidos os resultados obtidos na fase experimental desse trabalho. Para os Sistemas I e II foram estudados os seguintes pontos:

- Avaliação da limpeza Química
- Desempenho dos sistemas antes e após a limpeza química
- Variação da concentração de sais antes e após a limpeza química
- Comportamento do pH e condutividade elétrica
- Comportamento da variação das vazões e pressões
- Comportamento do ISL e STD

### 4.1. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA I

#### 4.1.1. Avaliação da limpeza química

O comportamento da variação do potencial hidrogeniônico e da condutividade elétrica das soluções de HCl usadas durante a limpeza química dos elementos de membrana do Sistema I, está representado nas Figuras 4.1 e 4.2.

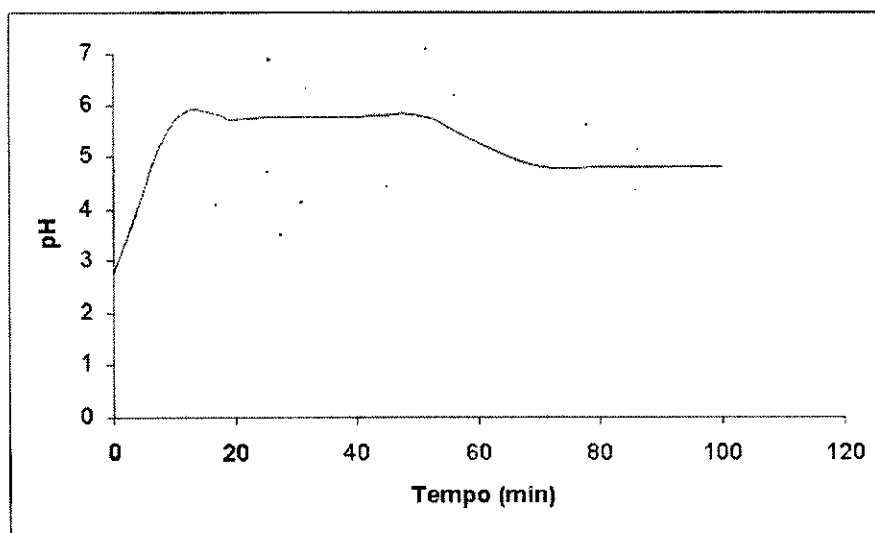
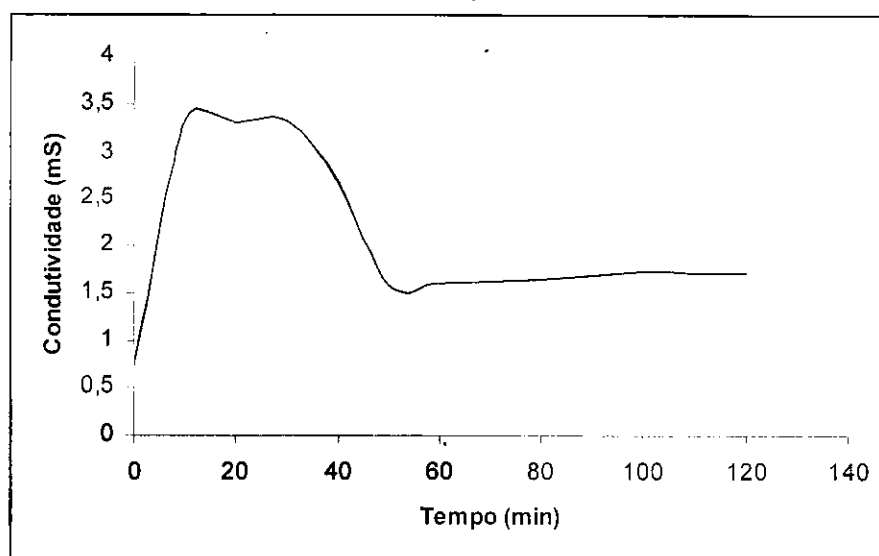


Figura 4.1 – Variação do pH da solução de HCl pH 2,78 à Temperatura de 35°C, usada na limpeza química dos elementos de membrana do Sistema I em função do tempo



**Figura 4.2** – Variação da condutividade elétrica da solução de HCl, à temperatura de 35°C e Condutividade 0,73, usada na limpeza química dos elementos de membrana do Sistema I em função do tempo

A variação do pH da solução para a limpeza química realizada apresentou resultados interessantes. Nos primeiros 20 minutos houve um aumento considerável e a partir desse instante a tendência foi estabilizar até os 50 minutos em um único valor, depois diminuir e novamente estabilizar. Esse fato pode ser explicado da seguinte forma:

No início, a solução ácida dissolve rapidamente os sais que se encontram na superfície das membranas elevando assim o pH da mesma, no intervalo onde o pH apresenta-se constante assume-se que a retirada dos sais vem sendo feita com eficiência. Considerando-se que a solução da limpeza química encontra-se sob um processo de recirculação, a concentração de HCl no tanque é predominante em relação à concentração que sai das membranas, logo o processo de dissociação vai diminuindo gradativamente até atingir outro estágio de estabilização.

A variação da condutividade da solução apresentada na Figura 4.2, também apresenta comportamentos semelhantes, demonstrando um grande aumento nos primeiros 15 minutos e depois desse instante decresceu, estabilizando-se em torno de 1,5 mS após 50 minutos. O perfil da variação da condutividade mostra um efeito similar com o comportamento do pH da solução de HCl durante a limpeza.



#### 4.1.2 Desempenho do sistema antes e após a limpeza química

Os melhores desempenhos de produção foram analisados neste sistema, tendo em vista funcionar dentro dos padrões de manutenção recomendados.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os dados do comportamento das vazões dos efluentes, pressões, pH e condutividade elétrica do sistema, de acordo com sua situação de funcionamento verificada, antes e após o procedimento de limpeza química.

**Tabela 4.1-Condições de funcionamento do sistema I de dessalinização antes da limpeza química das membranas**

19/09/2006	Kp (mS)	Kr (mS)	K água bruta (mS)	pH p	pH r	pH bruta
ALQ	0,74	19,41	13,0	5,10	6,67	6,77
P1 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P2 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P3 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P4 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P5 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Qc L/min	Qp L/min
1,8	1,8	13,0	12,0	Desligado	12,5	8,0

**Tabela 4.2-Condições de funcionamento do sistema I de dessalinização após a limpeza química das membranas**

19/09/2006	Kp (mS)	Kr (mS)	K água bruta (mS)	pH p	pH r	pH bruta
DLQ	0,84	19,56	13,0	5,62	6,79	6,77
P1 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P2 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P3 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P4 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P5 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Qc L/min	Qp L/min
1,8	1,8	13,0	12,0	Desligado	12,5	10,0

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam o comportamento das variações de medidas do Sistema I antes e após a limpeza química. Observou-se que, após a limpeza química, a vazão do permeado saiu de 8 L/min para 10 L/min. Isso significa que a produção voltou para seu valor real de projeto de um sistema de três elementos de membrana. Todavia era de se observar, uma mudança nas pressões, mas os manômetros do dessalinizador não oferecem condições de apresentar essa variação, devido não oferecer uma faixa de precisão

---

de leitura. É necessário, portanto, o acompanhamento das condições de funcionamento para possível realização de limpeza química, quando observadas mudanças no comportamento real do sistema.

Foi observado um aumento da condutividade do rejeito e do permeado, indicando maior retirada de sais após a limpeza química, demonstrando melhor funcionamento das membranas. O aumento da condutividade do permeado é devido a presença de íons de HCl oriundos da limpeza química das membranas, que ficam no meio aquoso da textura da membrana.

O pH do permeado antes e após a limpeza química, permaneceu praticamente constante.

#### **4.1.3 Variação da concentração de sais antes e após a limpeza química**

Depois de ser analisado o processo de limpeza química das membranas, foram realizadas análises físico-químicas das amostras de água do Sistema I, antes e após, o procedimento de limpeza. Foi possível observar nessas análises, que o desempenho do sistema melhorou, indicando o efeito da manutenção, tendo em vista o comportamento da retirada de sais e outros contaminantes no processo.

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram as concentrações de sais da água de alimentação, concentrado e permeado antes da limpeza de membranas realizada e sua variação depois desse procedimento.

As análises físico-químicas da água referente contendo os valores de concentrações de sais estão dispostas no anexo II.

O balanço de massa das concentrações de sais referentes às vazões de alimentação, concentrado e permeado, tanto para o Sistema I como para o Sistema II, foi calculado através das equações 2.13, 2.14 e 2.15, descritas no capítulo 2.

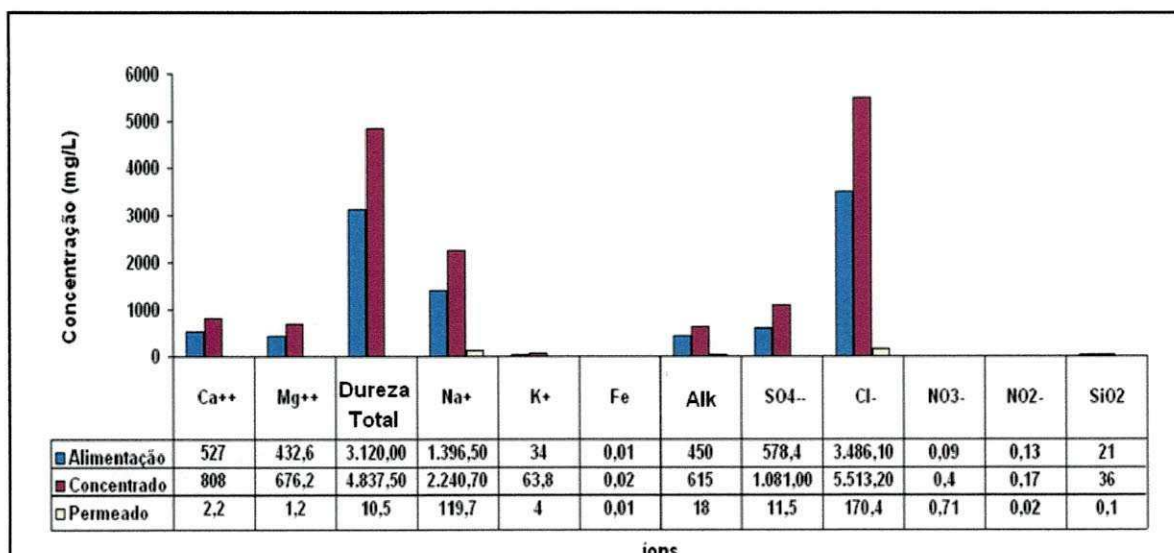


Figura 4.3 – Perfil da concentração de sais presentes na água do Sistema I, antes da limpeza química

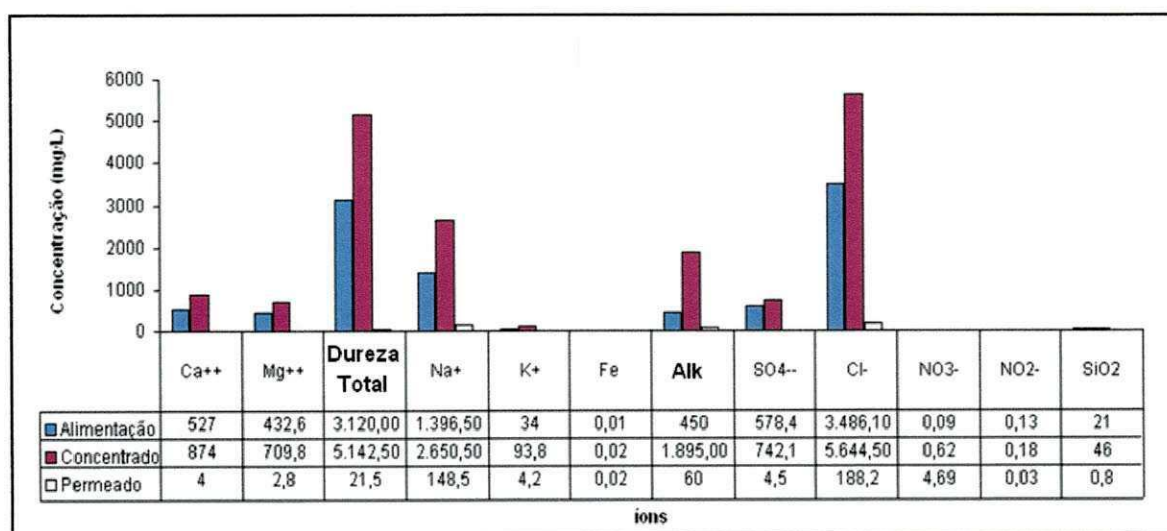


Figura 4.4 – Perfil da concentração de sais presentes na água do Sistema I, após a limpeza química

Pode-se determinar observando as Figuras 4.3 e 4.4 que seus dados confrontam-se com a avaliação do procedimento de limpeza química realizado. Todos os íons de sais presentes na água de alimentação tiveram suas concentrações aumentadas no concentrado após a limpeza química das membranas. O permeado após limpeza também demonstra isso, com a diminuição da concentração dos íons.

#### 4.1.4 Comportamento do pH e condutividade elétrica

Nas Figuras 4.5 e 4.6 são demonstradas as condições de funcionamento do Sistema I, de acordo com o comportamento da condutividade elétrica e do pH da água, em datas diferentes, para observação de seu desempenho e correção de algum parâmetro de manutenção do mesmo, dependendo da necessidade. De acordo com observações desses parâmetros, foi realizada uma nova limpeza química de membranas, no mês de março de 2007 já que se completavam seis meses de sua realização. O processo de limpeza das membranas ocorreu semelhante à última limpeza realizada, portanto, analisamos os índices, ao longo do desempenho do sistema.

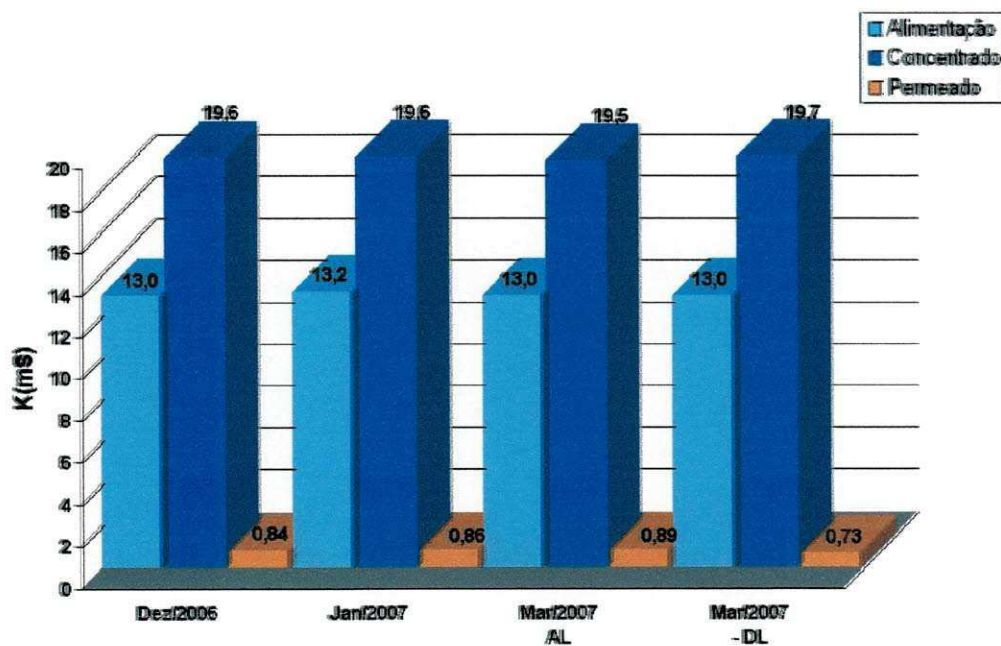


Figura 4.5 – Comportamento da condutividade da água do Sistema I, com o tempo

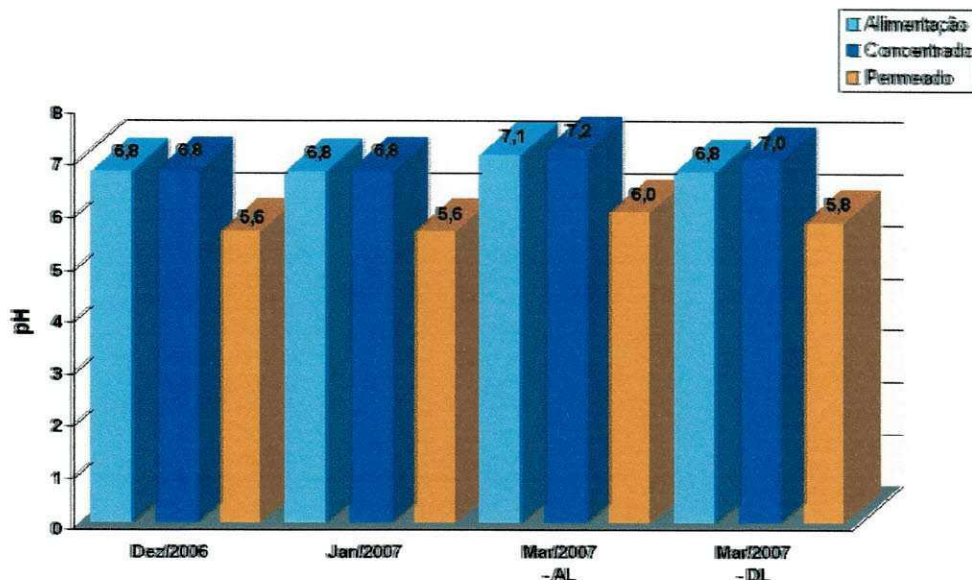


Figura 4.6 – Comportamento do pH da água do Sistema I, com o tempo

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam o comportamento típico da variação da condutividade elétrica e do pH de um sistema de dessalinização via OI. As condutividades elétricas do concentrado aumentam e do permeado diminui, em função desses valores pode se observar que ocorreu uma extração média de sais de 90%. O cálculo de rejeição de sais é feito através da equação 2.9 apresentada no capítulo 2.

Observou-se que a qualidade da água melhorou após a limpeza química, em função da condutividade elétrica apresentada na Figura 4.5. Os laudos das análises físico-químicas referentes a esses dados de condutividade elétrica e pH da água estão dispostos e tem a referencia no sumário da dissertação.

#### 4.1.5 Comportamento da variação das vazões e pressões

As Figuras 4.7 e 4.8 mostram as variações das pressões de operação do sistema como também as vazões do permeado e do concentrado, obtidas com o monitoramento feito ao longo do tempo. O comportamento desses parâmetros mostrou-se semelhantes e, de acordo com a literatura, é possível analisar as mudanças ocorridas.

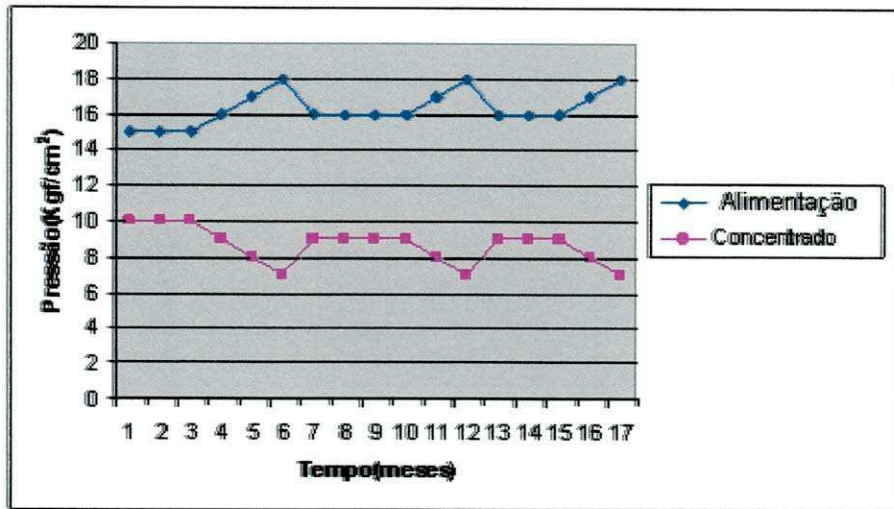


Figura 4.7 – Variação da pressão de operação do sistema I, com o tempo

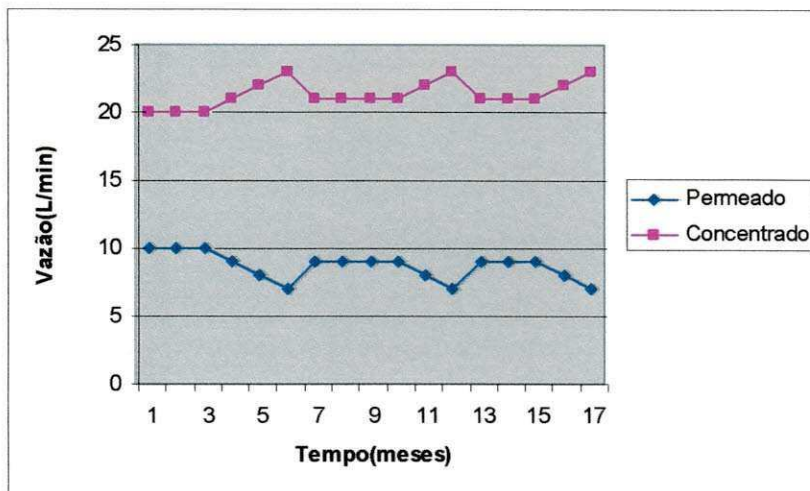


Figura 4.8 - Variação da vazão dos efluentes do sistema I, com o tempo

Esses parâmetros são exclusivamente técnicos e denotam a necessidade de intervenção para realização de limpeza química, quando ocorrido aumento na pressão de alimentação e diminuição da pressão do concentrado. De acordo com o monitoramento das pressões e vazões, observou-se que a pressão no 6º mês de operação após a limpeza química aumenta cerca de 20% em relação à pressão do 1º mês. Por outro lado, neste mesmo tempo, a produção diminui de 30%. Sabe-se que quando ocorre um decréscimo de

10% na produção e de 15% no aumento da pressão, há necessidade de limpeza química das membranas (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001; FILM TEC, 1995). Pode se observar para os parâmetros estudados que após a limpeza química há uma tendência de seus valores retornarem para os valores originais. Os cálculos da produção de água permeada são realizados através das equações 2.11 e 2.12, apresentadas no capítulo 2.

Percebe-se com essa observação que decorrem em torno de seis meses o período de se realizar nova limpeza. As tabelas com o monitoramento das pressões de operação do sistema e vazões de concentrado e permeado, estão no anexo I.

#### 4.1.6. Comportamento do ISL e STD

Sabe-se que o Índice de Saturação de Langelier (ISL) e os Sólidos Totais Dissolvidos (STD) são parâmetros que informam o potencial de incrustações de sais e/ou compostos de natureza não inorgânica (EDSTROM, 2003).

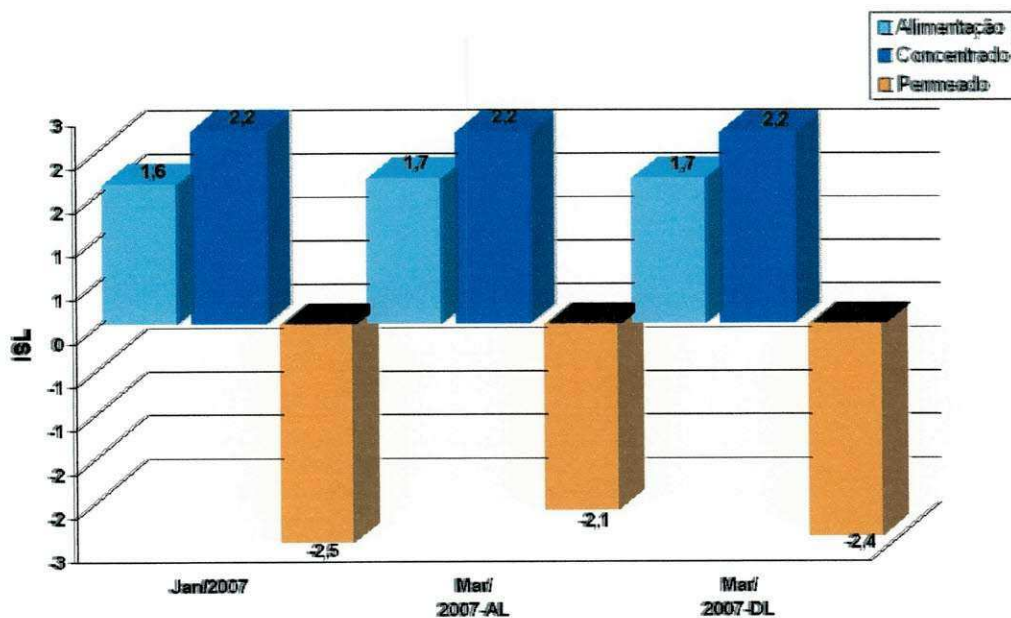
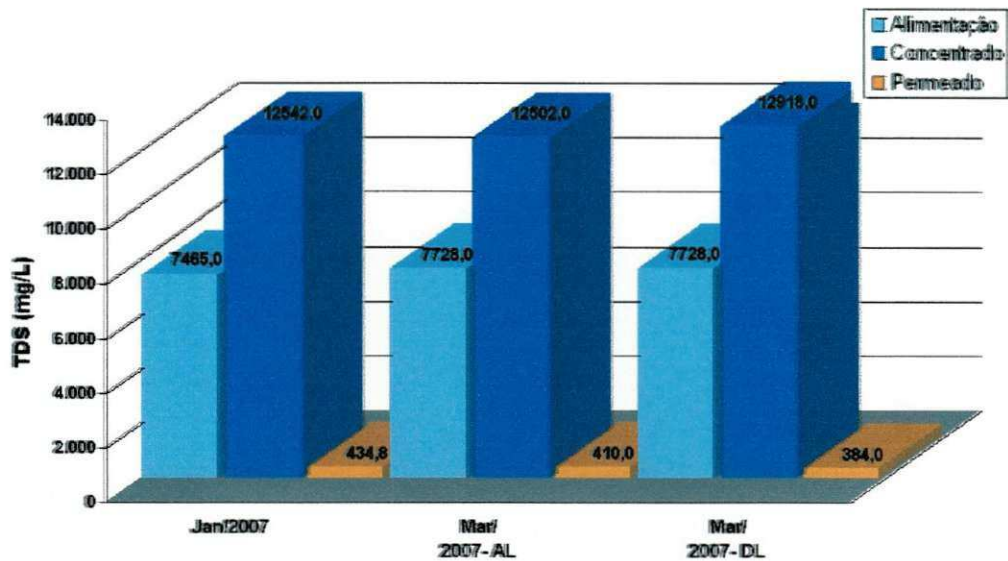


Figura 4.9 – Comportamento do Índice de Saturação de Langelier da água do Sistema I, com o tempo



**Figura 4.10** – Comportamento do Total de Sólidos Dissolvidos da água do Sistema I, com o tempo

Convém salientar que a água de alimentação do Sistema I é muito salobra e que o ISL é da ordem de 1,6 com tendência de incrustação de carbonato de cálcio na superfície da membrana. Considerando-se que o ISL do concentrado é superior ao da alimentação, é de se esperar que o processo de incrustação na membrana ocorra em pouco espaço de tempo. Nota-se que após a limpeza química realizada em março de 2007, tanto a água de alimentação quanto do concentrado, o ISL praticamente manteve-se e o ISL do permeado voltou ao valor obtido no mês de janeiro. Em harmonia com esses valores pode se observar o comportamento do STD antes e após a limpeza química e em meses anteriores.

Os laudos das análises físico-químicas das águas, contendo os valores de ISL e de STD estudados, se encontram dispostos no anexo II.



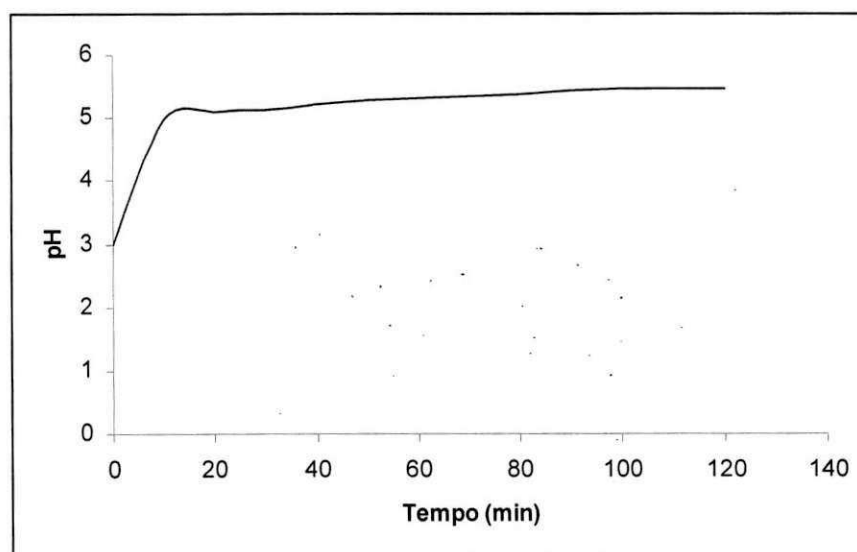
## 4.2. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA II

O modelo do sistema de dessalinização denominado como Sistema II, já foi descrito no capítulo anterior. As condições descritas na Tabela 3.3 do Capítulo 3 se referem ao funcionamento do sistema depois de recuperado.

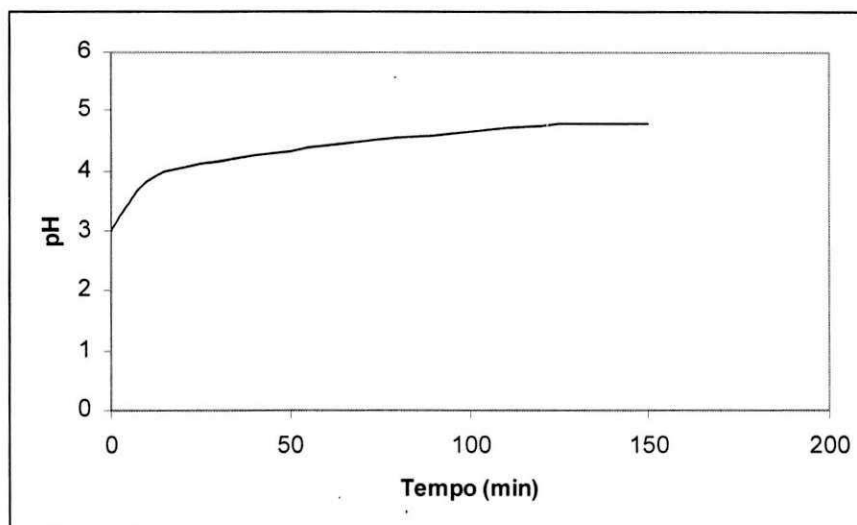
Como este sistema se encontrava operando em condições inadequadas, devido à falta de manutenção, e a qualidade da água permeada não estar dentro dos parâmetros permissíveis de potabilidade, foram estudadas em separado, cada uma das membranas em uso para observar os problemas existentes.

### 4.2.1. Avaliação da limpeza química

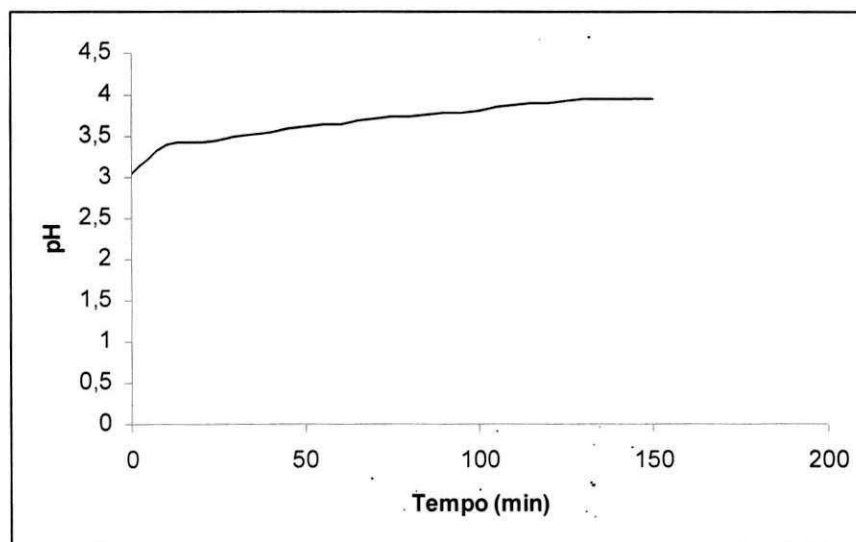
As Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 representam o comportamento do pH das soluções de HCl usadas na limpeza química de cada elemento de membrana, em separado, do sistema II.



**Figura 4.11** – Variação do pH da solução de HCl pH 3,0 à Temperatura de 37°C, usada na limpeza química da membrana I, para o sistema II em função do tempo.



**Figura 4.12 –** Variação do pH da solução de HCl pH 3,0 à Temperatura de 33°C, usada na limpeza química da membrana II, para o sistema II em função do tempo



**Figura 4.13 –** Variação do pH da solução de HCl pH 3,0 à Temperatura de 32°C, usada na limpeza química da membrana III, para o sistema II em função do tempo.

O processo de limpeza química de cada membrana, apresentou comportamentos semelhantes e, dentro das expectativas, esperados. No primeiro caso, para os primeiros 15 minutos o pH da solução aumentou consideravelmente. Isso decorre da dissociação dos sais presentes e a eficiência de limpeza apresentada tem contribuição da temperatura da solução que permaneceu em condições indicadas.

Nas figuras 4.12 e 4.13, respectivamente as membranas II e III, a variação do pH também foi crescente de maneira “brusca”, mas apenas nos primeiros 5 a 10 minutos e depois permaneceu aumentando em escalas menores, significando presença de poucos sais na membrana, possivelmente decorrente do arranjo das mesmas quando em operação num único vaso de pressão.

As pequenas variações de pH se fizeram devido à limpeza ser realizada em cada membrana em particular, mostrando a quantidade de sais menores do que se fossem as três juntas.

#### 4.2.2. Desempenho das membranas após o processo de limpeza

A Tabela 4.3 apresenta dados de funcionamento das membranas depois de permanecerem de “molho” por três dias em solução ácida (HCl, pH 3) e em seguida passarem pelo processo de limpeza química.

Para que o Sistema II em estudo, funcione em perfeitas condições e daí podermos avaliar o custo benefício da manutenção em prol da comunidade beneficiada com água de boa qualidade e já que o mesmo funcionava precariamente, foi realizado um estudo das membranas em separado. As Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam os resultados obtidos em testes feitos no laboratório com as membranas em separado, em condições semelhantes ao Sistema II (as três em série) e quando recolocadas em funcionamento no próprio sistema, no campo, respectivamente.

**Tabela 4.3- Condições de operação das membranas do sistema II**

Membranas	Kp (mS)	Kr (mS)	K água bruta (mS)	P (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Vazão L/min	Tempo (Min)
Memb I	0,06	4,17	3,60	8	3	30
Memb II	1,14	4,20	3,60	8	3	30
Memb III	0,05	4,33	3,70	8	3	30

**Tabela 4.4 - Condições-teste de operação das membranas do Sistema II, (em série), no LABDES**

Membranas	Kp (mS)	Kr (mS)	K água bruta (mS)	P (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Vazão L/min	Tempo (Min)
I, II, III	0,80	9,64	8,20	8,0	9,0	30

**Tabela 4.5 - Condições de operação das membranas do Sistema II, “in loco”**

Membranas	Kp (mS)	Kr (mS)	K água bruta (mS)	P (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Vazão L/min	Tempo (Min)
I, II, III	0,74	12,10	10,08	8,0	8,0	30

No primeiro momento, Tabela 4.3, observou-se bom rendimento nas membranas I, e III, com condutividade de permeado dentro dos padrões aceitáveis de potabilidade e vazão de permeado considerável, tendo em vista uma taxa de permeação em torno dos 90%. Apenas a membrana II, não demonstrou resultados satisfatórios, em relação às demais. Mas mesmo considerando seu desempenho inferior, a condutividade do permeado mostra que a água se encontra dentro da faixa de potabilidade.

A Tabela 4.4, para solução de Cloreto de Sódio com condutividade elétrica semelhante à água do Sistema II, os testes foram positivos, com resultados semelhantes aos testes feitos com as membranas em separado. Já a Tabela 4.5 mostra o desempenho do sistema no campo, onde as condições são adversas em termos de concentrações de sais. Mesmo assim o sistema se mostrou dentro dos padrões de operação.

As recuperações, taxa de permeação e valores de condutividade obtidas nessas situações, superam os valores provenientes do sistema em condições anteriores. Esses fatos decorrem devido ao procedimento de manutenção inadequado e não realização de limpeza química de acordo com a necessidade do sistema, já que se fazia dois anos que a mesma não era realizada no sistema, acarretando efeitos destrutivos às membranas e posteriormente às demais instalações do dessalinizador.

### 4.2.3 Variação da concentração de sais antes e após a limpeza química

As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam a concentração de sais presentes na água de alimentação do sistema II, e suas respectivas variações no permeado e concentrado, durante os meses de janeiro a março de 2007, respectivamente. Esses resultados são dados das análises físico-químicas da água de alimentação, do concentrado e do permeado.

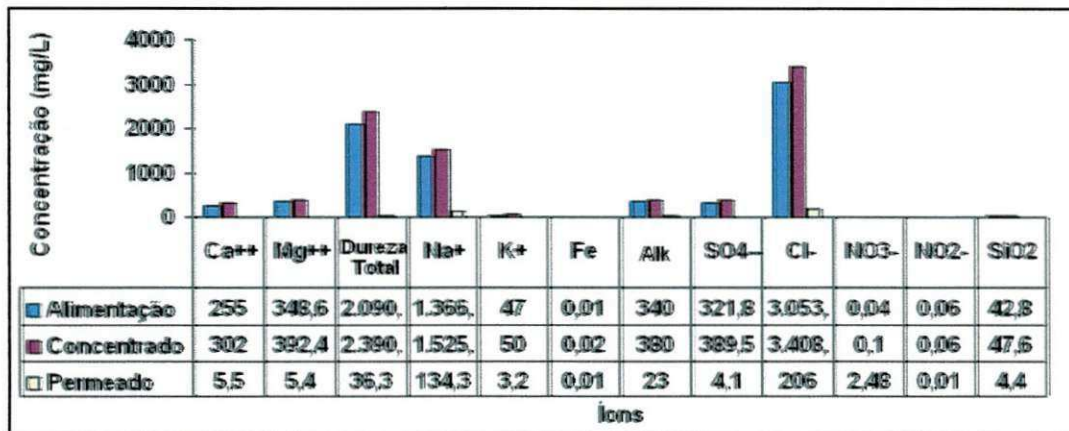


Figura 4.14 – Perfil da concentração de sais presentes na água do sistema II, em funcionamento no campo, Janeiro/2007, logo após a limpeza química

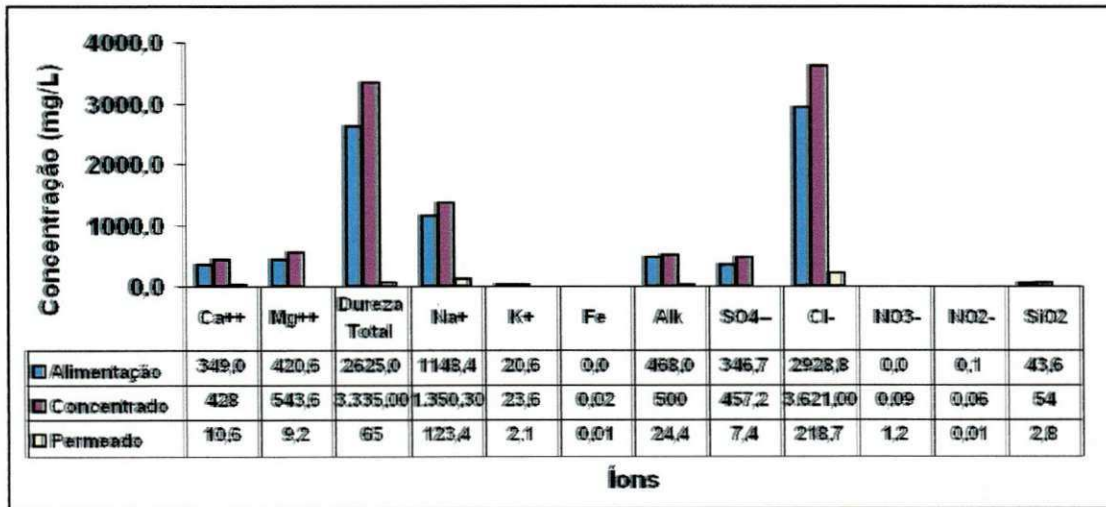


Figura 4.15 – Perfil da concentração de sais presentes na água do sistema II, em funcionamento no campo, Março/2007

Fazendo uma comparação do perfil das concentrações de sais apresentados nas Figuras 4.14 e 4.15 pode se observar para todos os íons que seus valores são inferiores aos apresentados na Figura 4.15, após três meses de funcionamento. Os valores mais notáveis são dos parâmetros da Dureza Total, dos íons Sódio e Cloretos. Nesse estágio de funcionamento, a limpeza química é o primeiro parâmetro de manutenção que deve ser recorrido para manter o desempenho das membranas na faixa real de suas produções.

Os laudos das análises físico-químicas das águas do sistema em estudo, com os valores das variações dos sais presentes nos efluentes, se encontram no anexo II.

#### 4.2.4. Comportamento do pH e da Condutividade elétrica

As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam respectivamente, os valores da condutividade e do pH da água do Sistema II, verificadas em três meses consecutivos, visando estudar o seu desempenho, depois de o mesmo ter as membranas recuperadas como também com novos elementos de filtros.

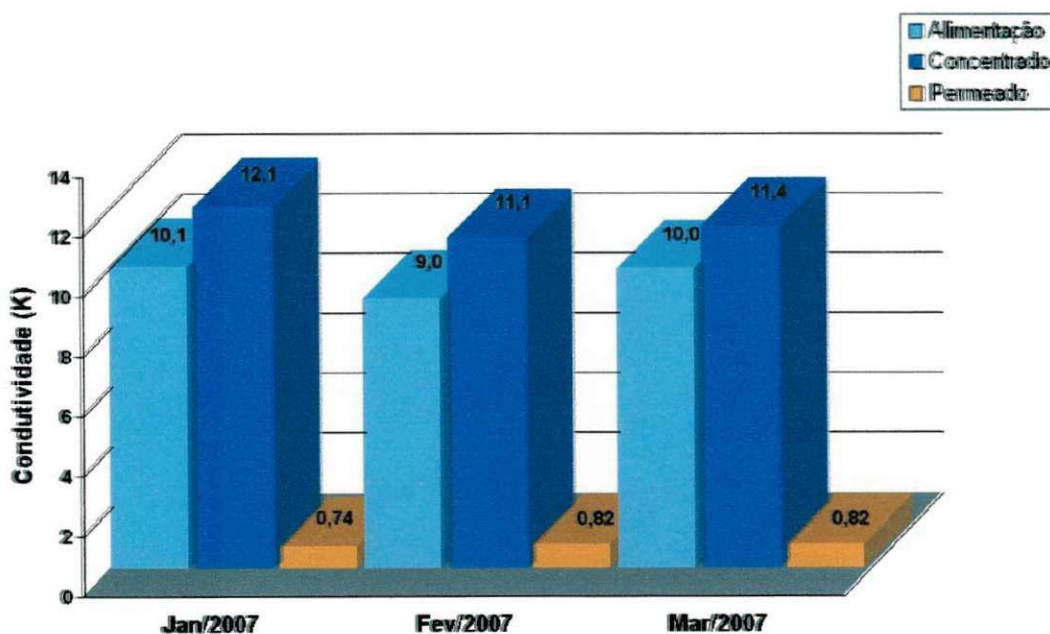


Figura 4.16 - Comportamento da condutividade da água do Sistema II

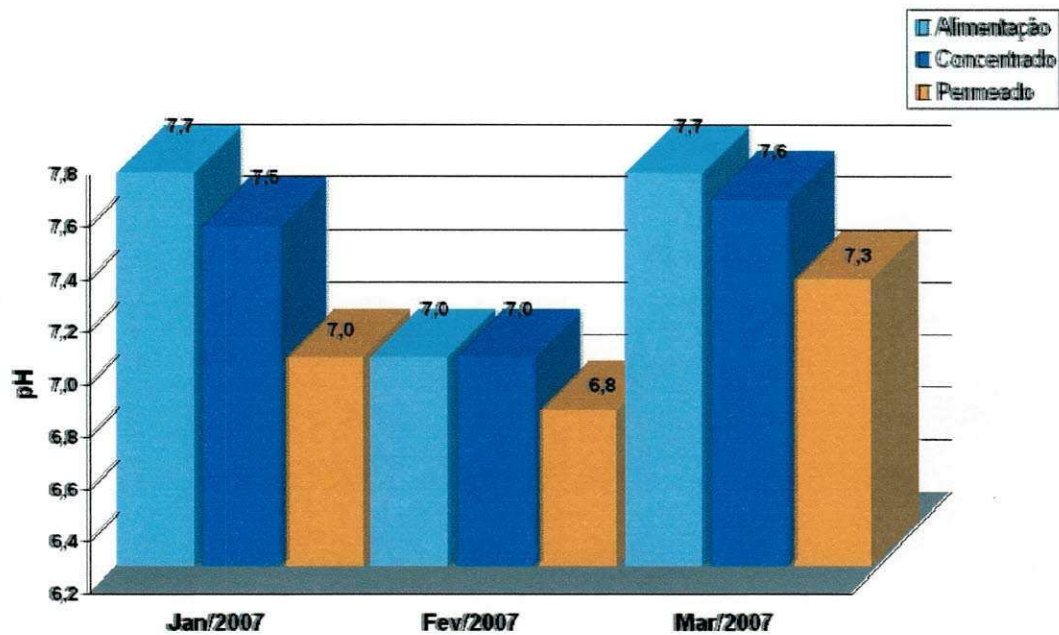


Figura 4.17 – Comportamento do pH da água do Sistema II,

As Figuras 4.16 e 4.17 mostram o comportamento da condutividade elétrica e do pH do sistema II, respectivamente.

Com os altos índices de sais presentes na superfície das membranas durante os seus três meses de uso há uma tendência natural de desenvolvimento de incrustações na superfície das membranas, que diminuirão a produção do permeado. Quanto à variação do pH ao longo deste período, não foi de ordem significativa. O valor do pH está relacionado com vários componentes presentes na água e considerando que esses valores foram obtidos “in loco”, a temperatura pode ter influenciado em suas medições.

Os laudos das análises físico-químicas das águas do sistema em estudo, contendo os valores dos parâmetros estudados, estão no anexo II.

#### 4.2.5. Comportamento da variação das vazões e pressões

As Figuras 4.18 e 4.19 mostram as variações das pressões de operação do sistema como também as vazões do permeado e do concentrado, obtidas com o monitoramento feito ao longo do tempo. O comportamento desses parâmetros mostrou-se semelhantes e, de acordo com a literatura, é possível analisar as mudanças ocorridas.

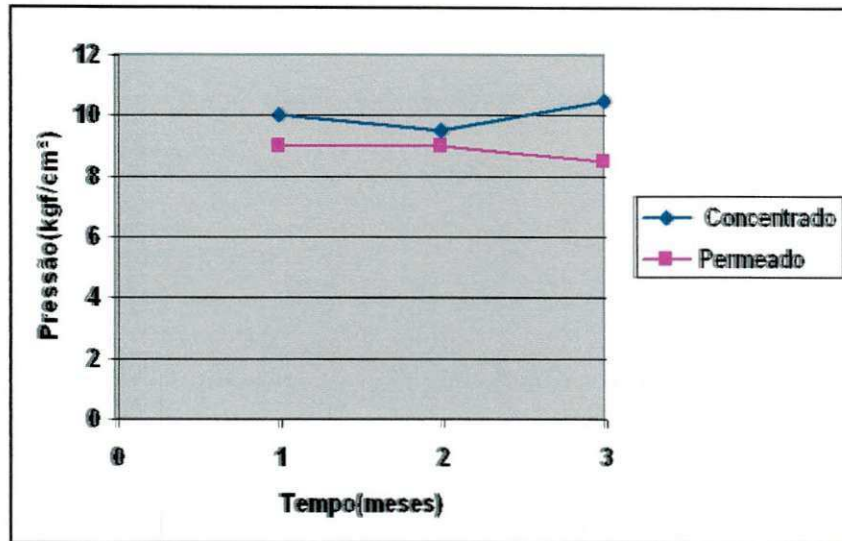


Figura 4.18 – Variação da pressão de operação do Sistema II, com o tempo

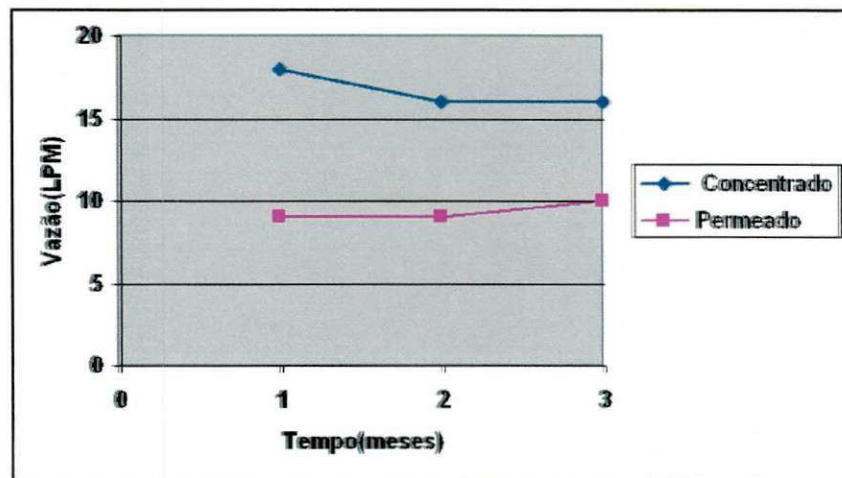


Figura 4.19 – Variação da vazão dos efluentes do Sistema II, com o tempo

A variação da pressão em um módulo de elementos de membranas é diretamente proporcional à produção de água permeada, conforme mostra a equação 2.3, apresentada no capítulo 2. As Figuras 4.18 e 4.19 em resumo, mostram que a variação das pressões e das vazões do concentrado e do permeado estão dentro de suas faixas de operação. É de se esperar que em função do tempo, com o acúmulo de sais nas membranas, a vazão do permeado tenderá a diminuir lentamente e a do concentrado aumentar. Todavia, esse fato não foi observado na Figura 4.19. É muito comum que a membrana venha oferecer sua



capacidade de produção, mas com uma qualidade em termos de potabilidade abaixo dos valores obtidos nos três primeiros meses de funcionamento.

#### 4.2.6. Comportamento do ISL e STD

As Figuras 4.20 e 4.21 apresentam o resultado dos valores de Índice de Saturação de Langelier (ISL) e dos Sólidos Totais Dissolvidos (STD) obtidos nas análises de água do Sistema II, de acordo com seu funcionamento.

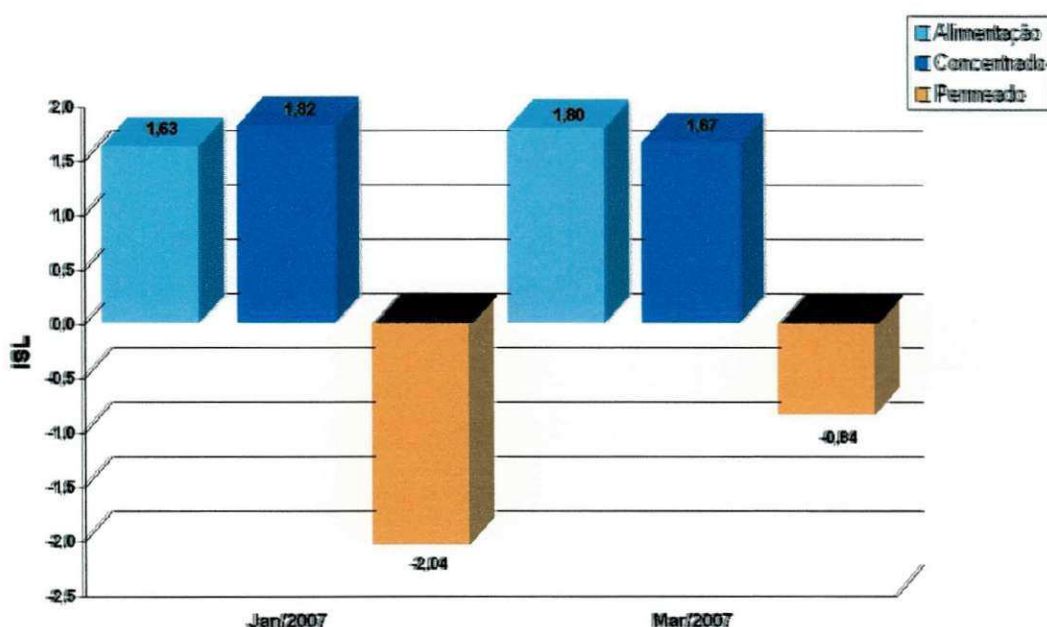


Figura 4.20 – Comportamento do Índice de Saturação de Langelier da água do sistema II, em funcionamento no campo

No primeiro mês de funcionamento do sistema II, o valor de ISL medido no campo, denota resultados esperados para permeado e concentrado. No entanto, se observa na Figura 4.20 que esses valores tendem a aumentar, havendo aproximação a valores positivos de ISL para o permeado. Isso implica na diminuição da potabilidade da água e, com isso, pode-se tomar como uma fonte indicadora para uma breve limpeza química nas membranas.

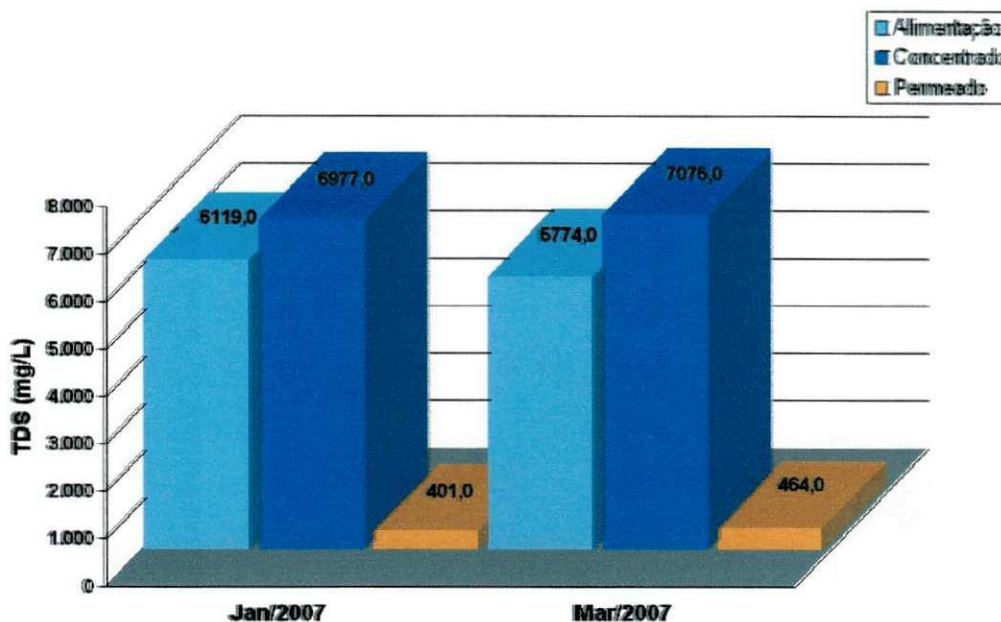


Figura 4.21 – Comportamento do Total de Sólidos Dissolvidos da água do Sistema II, ao longo do tempo

O STD (Sólidos Totais Dissolvidos) da água de alimentação do sistema II se encontra em torno de 6.000 mg/L, o que descarta a necessidade de um pré-tratamento à base de ácido clorídrico. No entanto, nota-se na Figura 4.21, que com o passar dos meses, a água permeada apresenta um crescimento visível neste valor. É possível que haja a necessidade de se estudar o pré-tratamento dado a essa água, ou mesmo se fazer limpeza química das membranas a cada três meses, tendo em vista o valor de TDS se aproximar de 500 mg/L, com tendência a chegar em 1.000 mg/L que é o valor máximo recomendado pela literatura.

As tabelas com o monitoramento das pressões e vazões encontram-se dispostas no anexo I e as análises físico-químicas com os valores de ISL e STD, estão no anexo II.

### 4.3. ESTIMATIVA DE CUSTO

Neste tópico é proposta uma estimativa ou análise de custo-benefício, para a manutenção do desempenho de sistemas de dessalinização via osmose inversa instalados no campo, operando para uma água de concentração de sais dissolvidos entre 7.000 mg/L a 10.000 mg/L, conforme as águas dos sistemas I e II estudados, com os seus respectivos laudos de análises físico-químicas em anexo.

Esta análise de custo é feita a partir de uma série de fatores como:

- \* Energia elétrica;
- \* Operação (custos com operador);
- \* Troca de membranas;
- \* Produtos químicos (Flocon 100 + HCl);
- \* Troca de filtros;
- \* Número de horas que funciona por dia, etc.

O custo estimativo da manutenção de sistemas de dessalinização foi calculado por mês, baseado na vida útil das membranas, que trabalham com manutenção adequada. Levou-se em conta nos cálculos da energia consumida na produção do m<sup>3</sup> de água, a tarifa rural fornecida, onde 1 kWh custa aproximadamente R\$ 0,17 de acordo com a Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, Março de 2007). Os demais produtos tiveram os preços pesquisados nas empresas do ramo, como: Floresta, Química Moura e Vega Dessalinizadores.

Considerando a produção média de 0,6 m<sup>3</sup>/h para uma concentração de 6.000 a 8.000 mg/L de sais dissolvidos, o custo da água dessalinizada pode ser calculado da seguinte forma:

- **Custo com a Energia = CE**

$$\text{Consumo} = 2,6 \text{ kWh/h}$$

$$\text{Operação} = 6 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \times 5 \frac{\text{dia}}{\text{sem}} \times 4 \frac{\text{sem}}{\text{mes}} = 120 \text{ h/mês}$$

$$\text{Tarifa rural} = \text{R\$ } 0,17 / \text{ kWh}$$

$$\text{Custo Mensal com Energia} = \text{consumo} \times \text{operação} \times \text{tarifa}$$

$$\text{Custo Mensal com Energia} = \frac{2,6 \text{ kWh}}{\text{h}} \times 120 \text{ h} \times \frac{\text{R\$ } 0,17}{\text{kWh}}$$

$$\text{Custo Mensal com Energia} = \text{R\$ } 53,04$$

- **Custo com Produtos Químicos = CPQ**

$$\text{Flocon 100 de densidade} = 1,2 \text{ kg/L}$$

$$\text{Consumo} = 0,5 \text{ L / mês}$$

$$\text{Custo} = \text{R\$ } 70,00 / \text{ kg} \therefore \text{R\$ } 84,00 / \text{ L}$$

$$\text{Custo Mensal com Flocon100} = \text{Consumo} \times \text{Custo}$$

$$\text{Custo Mensal com Flocon100} = 0,5 \text{ L} \times \text{R\$ } 84,00$$

$$\text{Custo Mensal com Flocon100} = \text{R\$ } 42,00$$

$$\text{HCl - P.A com 37\% de 1 L} = 1.180 \text{ g}$$

$$\text{Consumo} = 0,12 \text{ L / mês}$$

$$\text{Custo} = \text{R\$ } 20,00 / \text{ L} \therefore \text{R\$ } 2,40 / \text{ L}$$

$$\text{Custo Mensal com HCl} = \text{Consumo} \times \text{Custo}$$

$$\text{Custo Mensal com HCl} = 0,12 \text{ L} \times \frac{\text{R\$ } 2,40}{\text{L}}$$

$$\text{Custo Mensal com HCl} = \text{R\$ } 0,29$$

- **Custo com operador = CO**

$$\text{Custo Mensal com Operador} = \text{R\$ } 380 / \text{ mês}$$

$$\text{Homem - hora} = \frac{\text{R\$ } 380}{\text{mês}} \times \frac{1}{220 \text{ h}} = \text{R\$ } 1,73 / \text{ h}$$

---

- **Custo com Troca de Filtros = CTF**

Custo do Filtro = R\$10,00

Período de reposição = 3 meses

Número de Filtros = 3 filtros

$$\text{Custo Mensal com reposição de Filtros} = \frac{\text{Custo} \times \text{número}}{\text{período}}$$

$$\text{Custo Mensal com reposição de Filtros} = \frac{R\$10,00 \times 3}{3}$$

$$\text{Custo Mensal com reposição de Filtros} = R\$10,00$$

- **Custo dos produtos de limpeza química (CPLQ) - HCL e NaOH - P.A**

Consumo de HCL por limpeza química = 2,0 mL

Custo = R\$ 20,00 / L  $\therefore$  R\$0,04 / limpeza química

Consumo de NaOH por limpeza química = 8,0 g

Custo = R\$ 29,90 / kg  $\therefore$  R\$0,24 / limpeza química

Custo total / limpeza química (HCL + NaOH) = R\$ 0,28

- **Custo com reposição de membranas = CRM**

Custo da membrana = R\$1.100,00

Período de reposição = 5 anos = 60 meses

Número de membranas = 3

$$\text{Custo Mensal com reposição de membranas} = \frac{\text{Custo} \times \text{número}}{\text{período}}$$

$$\text{Custo Mensal com reposição de membranas} = \frac{R\$1.100,00 \times 3}{60}$$

$$\text{Custo Mensal com reposição de membranas} = R\$55,00$$

---

• **Custo Total/mensal**

$$\text{Custo Total Mensal} = CE + CPQ + CO + CTF + CPLQ + CRM$$

$$\text{Custo Total Mensal} = R\$53,04 + R\$42,29 + R\$380,00 + R\$10,00 + R\$0,28 + R\$55,00$$

$$\text{Custo Total Mensal} = R\$ 540,61$$

$$\text{Custo mensal por } m^3 = \frac{\text{custo total mensal}}{\text{produção mensal}} = \frac{R\$ 540,61}{0,6 \frac{m^3}{h} \times 120 h} \cong R\$ 7,51 / m^3$$

Nota técnica: 1 dia foi considerado de 6 horas de operação e o dessalinizador opera 20 dias/mês.

A título de ilustração a Tabela 4.6 mostra alguns dados dos preços de água mineral vendida em garrafas de 20 litros e em carro pipa (JÚNIOR, 2006).

**Tabela 4.6 – Custos médios de água potável para o semi-árido nordestino**

FONTE	VALOR PARA 20 LITROS (R\$)	VALOR PARA R\$/ m <sup>3</sup>
Água Mineral	3,00	150,00
Carro Pipa	1,00	50,00

O balanço da estimativa de custo mostra que a água dessalinizada pode beneficiar uma comunidade a um custo relativamente baixo em relação do uso de águas oriundas de outras fontes hídricas que não possuem um tratamento devidamente adequado, conforme as recomendações da Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde.

Os dados obtidos do balanço da estimativa de custo de produção de água dessalinizada mensal mostram que uma comunidade de 240 famílias (5 pessoa/família), consumindo 20 litros/família/dia, pode depositar um valor médio de R\$ 3,00/mês por família para manter uma gestão de distribuição de água com sustentabilidade. Esse valor corresponde em média de 2,7 L/pessoa/dia.

---

Comparando esses custos com o do carro: pipa por mês, para a mesma quantidade de famílias beneficiadas, o custo fica em torno de R\$ 20,00/mês por família, ou seja, mais de 6 vezes do valor apresentado pelo sistema de dessalinização.

As informações obtidas com esse estudo de certa forma mostram a importância do programa de manutenção que deve ser obedecido para beneficiar a vida útil dos elementos de membranas e conseqüentemente dos outros componentes do dessalinizador.

---

## 5. CONCLUSÕES

Existem ainda, no mundo, regiões habitadas com problemas de abastecimento de água potável devido à falta de sistemas de dessalinização. Nestes locais geralmente existem disponibilidades de água subterrânea ou superficial, porém imprópria para o consumo. Quando há sistemas de dessalinização instalados, muitos deles se encontram parados devido falta de manutenção adequada e pessoal qualificado para monitorar sua operação.

Esta dissertação abordou o estudo de sistemas de dessalinização, para um menor custo e menor complexidade, com o acompanhamento do desempenho da manutenção, em função da necessidade de se obter água de boa qualidade no campo.

O resultado do trabalho desenvolvido nos permite concluir que:

1. O desempenho de um sistema de dessalinização depende diretamente de um serviço de manutenção onde inclui como uma das ferramentas mais importante, a limpeza química. Observou-se que durante a limpeza química, a variação do pH da solução é um dos indicadores que mostra quando a membrana foi recuperada.
2. O estudo da variação da concentração dos cátions e ânions presentes na água antes e após a limpeza química mostra o efeito da mesma e conseqüentemente o quão favorece ao desempenho da membrana.
3. A variação das pressões durante o processo está diretamente relacionada com a produção do concentrado e permeado. Todavia não foi possível observar com mais detalhes, devido à qualidade de instrumentação usada nos dessalinizadores de campo. A qual torna-se uma fonte de erro de alto risco para o monitoramento de dessalinizadores no campo.



- 
4. O comportamento do Índice de Saturação de Langelier (ISL) antes e após a limpeza química, mostra com clareza seu efeito, demonstrando que a água do permeado produzida, é de melhor qualidade. Ao longo do tempo, os valores de ISL e STD se aproximam de valores que indicam incrustações nas membranas.
  5. A análise do custo/benefício de custo de produção de água dessalinizada mensal mostram que uma comunidade de 240 famílias (5 pessoa/família), consumindo 20 litros/família/dia, pode depositar um valor médio de R\$ 3,00/mês por família para manter uma gestão de distribuição de água com sustentabilidade. Vale ressaltar que esse valor refere-se apenas à gestão da manutenção do sistema, não levando em conta, instalação de equipamento, depreciação, projeto e análises físico-químicas.
  6. Observou-se que o custo da água do carro pipa por mês, para a mesma quantidade de famílias beneficiadas e volume de água, é aproximadamente 6 vezes maior do que da água dessalinizada.

---

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para a continuação desta pesquisa, no sentido de garantir um fornecimento de água de boa qualidade para determinada comunidade, como também gerar subsídios para a gestão dos sistemas, sugere-se:

- desenvolver um projeto de um sistema de dessalinização fazendo uso dos simuladores de membranas, com o objetivo de comparar com os sistemas que se encontram instalados no campo, em termos de produção, valores das variáveis de medidas, número e tipo de membranas, pré-tratamento, etc;
- comparar os prejuízos decorrentes de falta de manutenção adequada aos sistemas de dessalinização, averiguando os custos e os benefícios que podem ser implementados em uma comunidade do campo, abastecida por água salobra beneficiada com a dessalinização.
- estudar meios de aproveitar o rejeito ou concentrado proveniente dos dessalinizadores instalados no campo, no sentido de gerar rendas para a manutenção do sistema, como também suprir as necessidade do operador.
- fazer um estudo de desempenho de membranas, comparando os diversos tipos, principalmente com membranas de fibra oca, para observar as vantagens de seu uso em detrimento das membranas geralmente utilizadas na OI.

---

## 5. REFERÊNCIAS

ABAS, 2003 – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, “**Água Subterrânea – Minimização das conseqüências da seca no Nordeste**”. Junho, 2003. 36p.

ABDEL-JAWAD, M., AL-SHAMMARI, S. & AL-SULAIMI, J., **Non-conventional treatment of treated municipal wastewater for reverse osmosis**. Desalination 142 (2002) 11-18.

ALMEIDA, E. P., **Comparação de dois Sistemas de Dessalinização via Osmose Inversa e os Efeitos da Limpeza Química dos Elementos de Membranas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFCG, Campina Grande-PB, 2002.

AMJAD, Z. **Reverse Osmose: Membrane Technology, Water Chemistry & Industrial Applications**, Van Nostrand-Reinhold, New York, 1992.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Módulo de Consulta de Tarifas**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 15 de março de 2007.

AQUANET. **Dessalinização usando Osmose Reversa**. Disponível em: <<http://www.sattamini.com.br/tech/osmosefront.htm>>. Acesso em: 16 de maio de 2006.

BARBOSA, E. M. de S, TIBA, C. & FRAIDENRAICH, N. **Projeto água limpa com energia limpa**. Grupo FAE/UFPE, Recife, 1998. 47p.

BENNETT, P. B., **Scale and deposit control for reverse osmosis systems, Membrane technology conference proceedings**, American water works association, New Orleans, LA, 1996, p. 681-693.

---

BRANDT, D. C., LEITNER, G. F & LEITNER, W. E., **Reverse osmosis membrane states of the art**, In Zahid Amjad (ed.), Reverse Osmosis – Membrane Technology, Water Chemistry and Industrial Applications, Van Nostrand-Reinhold, New York, 1992/1993.

BYRNE, W., **Reverse Osmosis – A practical guide for industrial users**. 2ª edição. Editora Tall Oaks Publishing 2002.

CALLADO, S.M.G., **Identificação e Análise dos Fatores Condicionantes do Desempenho dos Dessalinizadores no Estado do Ceará**. Dissertação (Mestrado em Economia Agrícola), UFC, Fortaleza, 2003.

CARVALHO, R. S., et al. **Água, um bem que precisa ser cuidado!**. 1ª ed. Água: Fonte de Vida. Unicap, 2005.

CAVALCANTE, F.P., **Técnicas de Diagnóstico de Falhas para Dessalinizadores de Pequeno Porte Instalados no Interior do Ceará e Propostas de Melhorias**. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental), UFC, Fortaleza, 2003.

CHEN, S. S., TAYLOR, J. S., MORRIS, C. D & HOFMAN, J. A. M. H., **Flat sheet testing for pesticid removal by varying RO/NF membrane**, Desalination, v, p 843-848, 1997.

DUDLEY, L. Y. & DARTON, E. G., **Pretreatment procedures to control biogrowth and scale formation in membrane systems**, Desalination 110 (1997) 11-20.

EL-DESSOUKY, H. T. and ETTOUNEY, H. M., **Fundamental of Salt Water Desalination-Elsevier**, 2002, Cap.8, pp.449.

EDSTROM. [http://www.edstrom.com/Resoirces.cfm?doc\\_id=161](http://www.edstrom.com/Resoirces.cfm?doc_id=161), 2003.

---

FILHO, A. B. de L. **Estudo e desenvolvimento de um sistema de dessalinização via osmose inversa para pequenas comunidades, fazendo uso de painéis fotovoltaicos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, Campina Grande-PB, 2000.

FILTEAU, G. & MOSS, P., **Ultra-low pressure RO membranes: an analysis of performance and cost.** *Desalination* 113: 147-152 1997.

FILMTEC, **Tech Manual**, Dow Chemical Company, 1995.

FORMIGA, M. M., **Comunicação de Dados para um Sistema de Telemetria de Baixo Custo.** Dissertação (Mestrado em Informática), UFCG, Campina Grande-PB, 2005.

FRANÇA, K. B., **Aumento da Vida Útil de Sistemas de Dessalinização no Campo: Análise e Manutenção Remota.** Projeto do CT-HIDRO 01/2001-CNPq.

FRANÇA, K. B. **Projeto: Programa Água Doce.** Universidade Federal de Campina Grande, Ministério do Meio Ambiente e Secretaria de Recursos Hídricos, 2004.

FRANÇA, K. B., **Avaliação de Projetos de Sistemas de Dessalinização Via Osmose Inversa.** Programa Água Doce SRH/MMA, LABDES, Campina Grande-PB, 2005.

FRANK, N. K., **The Nalco Handbook**, MC Graw-Hill, 2ª ed, 1998.

HABERT, A. C., BORGES C. P., e NÓBREGA R. **Processos de Separação com Membranas**, Escola Piloto de Engenharia Química, COPPE/UFRJ - Programa de Engenharia Química, março de 1997.

HOFERT, R., **Variable speed turbo couplings used as pump drive in desalination plants.** *Desalination* 125: 181-189, 1999.

HYDRANAUTICS. **RO. System Design Software**, 2002.

---

IDAE – Instituto para la Diversification y Ahorro de la Energía. **Manuales de Energías Renovables, v.6. Energia solar fotovoltaica.** Edição especial Cinco dias. Gráfica Internacional, S. A. Espanha, 1995.

ISAIAS, N. P. **Experience in reverse osmosis pretreatment.** Desalination, vol. 139, pp. 57-64, 2001.

JÚNIOR, C. L., **Sistema de Dessalinização por osmose reversa acionado por energia eólica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFPE, Recife-PE, 2006.

JUNIOR, O. A., **Consciência sobre a Água.** Trabalhos.htm (3-21) 16/05/2006. Disponível em: < <http://www.uniagua.org.br/website>. Acesso em: Outubro de 2006.

KERR, T. J. and McHALE, B. B., **Application in general microbiology: A laboratory manual.** 6 ed., Hunter Textbooks Inc., Winston-Salem, 2001.

LIRA, R. H. PEREIRA., **Avaliação do pré-tratamento de um sistema de dessalinização piloto via osmose inversa.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFCG, Campina Grande-PB, 2004.

LOPES, J. T., **Dimensionamento e Analise Térmica de um Dessalinizador Solar Híbrido.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), UEC, Campinas-SP, 2004.

MALLEVIALLE, J., ODENDAAL, P. E. & WIESNER, M. R., **Water Treatment Membrane Processes.** American Water Works Association Research Foundation; Lyonnaise des Eaux; Water Research Comission of South Africa. McGraw-Hill. Washington, DC, USA, 1996.

---

MEMBRANAS FILTRANTES. **Curso-Membranas Filtrantes (Ultrafiltração e Osmose Reversa)**. 1 e 2 de Junho de 2006, São Paulo-SP. Disponível em: <http://www.tratamentodeagua.com.br>. Acesso em: Agosto de 2006.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2004., **Review of the Desalination and Water Purification Technology Roadmap**. Disponível em: <http://www.nap.edu/books/0309091578/html/>>. Acesso em Novembro de 2006.

NOTÍCIAS CNPQ. **Tecnologia transforma água salobra em água doce**. Disponível em: <http://www.cnpq.br/noticias/2005/020805htm>. Acesso em: 21 dezembro 2005.

OLIVEIRA, A. R., **Desempenho de um sistema de dessalinização via osmose inversa, em escala piloto, alimentado por painéis fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFCG, Campina Grande-PB, 2002.

PERRY, R. H. & CHILTON, C. H., **Manual do Engenheiro Químico**, 5ª ed., séc. 17; p 36-45, 5 ed, Ed. Guanabara, Rio de Janeiro-RJ, 1986.

PINHEIRO, J. C. V. & SILVA, L. A. C., **Apropriação da água subterrânea, segundo sua qualidade para o uso doméstico no Ceará: uma aplicação de medida de desigualdade**. Congresso Brasileiro do Meio Ambiente. Fortaleza – Ceará: 2000.

PORTUGAL, G., **A água doce não é inesgotável**. Disponível em: <http://www.gpca.com.br/gil/art18.htm>>. Acesso em: Outubro de 2006.

RAMALHO, R., **Dessalinização da água, Ciência Hoje/RJ**. Disponível em <http://www.uniagua.com.br/website>. Acesso em Marco de 2006.

REDONDO, J. A. & CASANAS, A., **Mature and novel desalination experiences with the FILMTEC SW30HR-380 and SW30HR-320 elements**. Desalination 125: 1-8, 1999.

---

ROSA (2000) **Reverse Osmosis System Analysis**, Version 4.30 For Windows.

SATTAMINI LUIZ E LUCIO., **Sistemas de osmose inversa**, AQUANET-Engenharia de aplicações em dessalinização-Manual técnico, 1999.

SCHNEIDER, R. P., & TSUTIYA, M. T., **Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso**, ABES, 1ª ed, São Paulo, 2001.

SETTI, A. A., et al. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. 3ª ed. Brasília: ANEEL / ANA, 2001.

SILVEIRA, M. C., **Avaliação de sistema híbrido para dessalinização de águas salinas pelo processo de osmose inversa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, Campina Grande-PB, 1999.

SOUSA, S. E. H., **Normalização de sistemas de dessalinização via osmose inversa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFCG, Campina Grande-PB, 2003.

SUASSUNA, J., et al. **Potencialidades Hídricas do Nordeste Brasileiro**. 1. ed. Água: Fonte de Vida. Unicap, 2005.

SUDAK, R. G., **Reverse osmosis** In Porter, M.C. (ed.), Handbook of industrial Membrane Technology, Noyel Publications, New Jersey, 1990.

TAYLOR, J. P. & JACOBS, E. P., **Reverse Osmosis and nanofiltration**, In Joel Mallevalle et al (eds.), Water Treatment Membrane Process, MC Graw-Hill, New York, 1996.

TSIOURTIS, N. X., **Desalination and the environment**, *Desalination*, 141: 223-236, 2001.



Anexos

---

## ANEXOS

---

*João de Bacerca de Melo*

INFORMACIÓN BIBLIOTÉCA

---

**ANEXO I**

O Anexo I refere-se às tabelas dos dados experimentais, como: monitoramento do desempenho dos sistemas, das limpezas químicas e outras informações adicionais referentes aos sistemas e ao trabalho de dissertação.

**Tabela A1** – Dados referentes à limpeza Química das Membranas do Sistema I, com Solução de Ácido Clorídrico (HCl), pH 2,78, Condutividade elétrica 0,73mS à Temperatura de 35°C, Setembro /2006

Durante a limpeza	Kr (mS)	pH r	Durante a limpeza	Kr (mS)	pH r
0	11,5	6.76	135	1.70	4.81
15	11.97	6.59	145	1.71	4.81
35	3.35	5.71	150		
45	3.31	5.72	160		
55	3.32	5.76	170		
65	2.67	5.76	180 (3h)		
75	1.58	5.81	190		
85	1.60	5.26	200		
95	1.63	4.83	210		
105	1.65	4.81	220		
115	1.69	4.81	230		
125	1.72	4.81	240 (4h)		

**Tabela A2** – Dados referentes à limpeza Química da Membrana I do Sistema II, com Solução de Ácido Clorídrico (pH 3,0), à Temperatura de 37°C.

Tempo	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
pH r	3,0	4,98	5,09	5,14	5,23	5,29	5,32	5,36	5,39	5,44	5,44

**Tabela A3** – Dados referentes à limpeza Química da Membrana II do Sistema II, com Solução de Ácido Clorídrico (pH 3,0), à Temperatura de 33°C.

Tempo	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pH r	3,0	3,8	4,0	4,2	4,24	4,3	4,4	4,5	4,55	4,6	4,65	4,71	4,75	4,75

**Tabela A4** – Dados referentes à limpeza Química da Membrana III do Sistema II, com Solução de Ácido Clorídrico (pH 3,0), à Temperatura de 32°C.

Tempo	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
pH r	3,0	3,4	3,4	3,5	3,54	3,6	3,6	3,7	3,75	3,8	3,82	3,90	3,90	3,90

**Tabela A5** – Dados referentes ao monitoramento do desempenho do Sistema I.

Tempo	Kp (mS)	Kr (mS)	K água bruta (mS)	pH p	pH r	pH bruta
04/12/2006	0.84	19.56	13.02	5.62	6.79	6.77
P1 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P2 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P3 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P4 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P5 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Qc L/min	Qp L/min
1.8	1.8	13.0	12.0		10.5	10.0

**Tabela A6** – Dados referentes monitoramento do desempenho do Sistema I.

Tempo	Kp (mS)	Kr (mS)	K água bruta (mS)	pH p	pH r	pH bruta
24/01/2007	0.86	19.62	13.20	5.62	6.79	6.77
P1 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P2 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P3 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P4 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P5 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Qc L/min	Qp L/min
1.9	1.9	13.0	12.0		14	9.5

**Tabela A7** - Dados referentes monitoramento do desempenho do Sistema I

21/03/2007	Kp (mS)	Kr (mS)	K água bruta (mS)	pH p	pH r	pH bruta
ALQ	0.89	19.45	13.00	6.0	7.2	7.1
P1 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P2 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P3 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P4 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P5 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Qc L/min	Qp L/min
1.8	1.8	13.0	12.0		12.0	8.0

**Tabela A 8 - Dados referentes monitoramento do desempenho do Sistema I**

21/03/2007	Kp (mS)	Kr (mS)	K água bruta (mS)	pH p	pH r	pH bruta
DLQ	0.73	19.65	13.02	5.8	7.0	6.77
P1 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P2 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P3 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P4 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P5 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Qc L/min	Qp L/min
1.7	1.7	13.0	12.0		13.0	10

**Tabela A 9 – Dados referentes monitoramento do desempenho do Sistema II.**

Tempo	Kp (mS)	Kr (mS)	K água bruta (mS)	pH p	pH r	pH bruta
24/01/2007	0.74	12.10	10.08	7.0	7.5	7.7
P1 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P2 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P3 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P4 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P5 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Qc L/min	Qp L/min
2.8	1.4	10.0	9.0		18.0	9.0

**Tabela A 10 - Dados referentes monitoramento do desempenho do Sistema II.**

Tempo	Kp (mS)	Kr (mS)	K água bruta (mS)	pH p	pH r	pH bruta
22/02/2007	0.80	11.05	9.5	6.8	7.0	7.0
P1 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P2 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P3 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P4 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P5 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Qc L/min	Qp L/min
2.0	1.4	9.5	9.0		16.0	9.0

**Tabela A 11 – Dados referentes monitoramento do desempenho do Sistema II.**

Tempo	Kp (mS)	Kr (mS)	K água bruta (mS)	pH p	pH r	pH bruta
21/03/2007	0.82	11.43	10.0	7.3	7.6	7.7
P1 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P2 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P3 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P4 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	P5 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Qc L/min	Qp L/min
1.7	1.4	10.5	8.5		16.0	10.0

**Tabela A 12** - Apresentação dos valores das tarifas médias de fornecimento aplicadas no território nacional, por classe de consumo e por região, e sua evolução ano a ano.

<b>Classe de Consumo</b>	<b>Norte</b>	<b>Nordeste</b>	<b>Sudeste</b>	<b>Sul</b>	<b>Centro - Oeste</b>	<b>Brasil</b>
<b>Residencial</b>	292,90	274,92	306,89	282,07	301,54	296,43
<b>Industrial</b>	219,96	206,01	221,73	200,85	214,07	213,50
<b>Comercial</b>	292,05	288,89	275,79	254,25	279,09	275,23
<b>Rural</b>	216,03	168,84	209,89	145,59	214,51	175,08
<b>Poder Público</b>	312,16	316,56	288,28	279,07	285,54	295,63
<b>Iluminação Pública</b>	165,98	171,59	172,17	146,88	164,59	166,70
<b>Serviço Público</b>	188,37	178,36	197,06	181,60	182,35	188,86
<b>Consumo Próprio</b>	288,13	300,99	301,02	246,04	292,04	292,75
<b>Tarifa Média Total</b>	265,10	248,26	266,19	224,72	262,05	254,50

## ANEXO II

O Anexo II refere-se às tabelas de dados experimentais das análises físico-químicas das águas dos sistemas estudados e das limpezas químicas realizadas nos elementos de membranas.

**Tabela B 1:** Dados referentes às análises físico-químicas da água do sistema I, antes da limpeza química das membranas, Setembro/2006.

PARÂMETROS	Alimentação	Concentrado	Permeado	VMP (*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25 °C	10.840,0	15.450,0	766,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,4	7,3	5,8	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	0,50	0,16	0,16	1,0 a 5,0
Dureza em Cálcio, mg/L $\text{Ca}^{++}$	527,0	808,0	2,2	---
Dureza em Magnésio, mg/L $\text{Mg}^{++}$	432,6	676,2	1,2	---
Dureza Total, mg/L $\text{CaCO}_3$	3.120,0	4.837,5	10,5	500,0
Sódio, mg/L $\text{Na}^+$	1.396,5	2.240,7	119,7	200,0
Potássio, mg/L $\text{K}^+$	34,0	63,8	4,0	---
Ferro Total, mg/L	0,01	0,02	0,01	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L $\text{CaCO}_3$	0,0	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	50,0	24,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	400,0	591,0	18,0	---
Alcalinidade Total, mg/L $\text{CaCO}_3$	450,0	615,0	18,0	---
Sulfato, mg/L $\text{SO}_4^-$	578,4	1.081,0	11,5	250,0
Cloreto, mg/L $\text{Cl}^-$	3.486,1	5.513,2	170,4	250,0
Nitrato, mg/L $\text{NO}_3^-$	0,09	0,40	0,71	10,0
Nitrito, mg/L $\text{NO}_2^-$	0,13	0,17	0,02	1,0
Sílica, mg/L $\text{SiO}_2$	21,0	36,0	0,1	---
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	1,10	1,35	-4,11	$\leq 0$
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	7.879,0	12.182,0	392,0	1.000,0

(\*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 518/04 MS).

**Tabela B 2:** Dados referentes às análises físico-químicas da água do sistema I, após limpeza química das membranas, Setembro de 2006.

PARÂMETROS	Concentrado	Permeado	VMP (*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25 °C	15.850,0	899,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,7	6,2	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	16,10	0,11	1,0 a 5,0
Dureza em Cálcio, mg/L $\text{Ca}^{++}$	874,0	4,0	---
Dureza em Magnésio, mg/L $\text{Mg}^{++}$	709,8	2,8	---
Dureza Total, mg/L $\text{CaCO}_3$	5.142,5	21,5	500,0
Sódio, mg/L $\text{Na}^+$	2.650,5	148,5	200,0
Potássio, mg/L $\text{K}^+$	93,8	4,2	---
Ferro Total, mg/L	0,02	0,02	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L $\text{CaCO}_3$	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	250,0	44,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	1.645,0	16,0	---
Alcalinidade Total, mg/L $\text{CaCO}_3$	1.895,0	60,0	---
Sulfato, mg/L $\text{SO}_4^{--}$	742,1	4,5	250,0
Cloreto, mg/L $\text{Cl}^-$	5.644,5	188,2	250,0
Nitrato, mg/L $\text{NO}_3^-$	0,62	4,69	10,0
Nitrito, mg/L $\text{NO}_2^-$	0,18	0,03	1,0
Sílica, mg/L $\text{SiO}_2$	46,0	0,8	---
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	2,21	-3,01	$\leq 0$
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 80°C, mg/L	13.086,0	470,0	1.000,0

**Tabela B 3:** Dados referentes às análises físico-químicas da água do sistema I, quatro meses após limpeza química das membranas, Dezembro /2006.

PARÂMETROS	Alimentação	Concentrado	Permeado	VMP (*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25 °C	10.690,0	15.200,0	833,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	8,0	8,1	7,5	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	0,41	0,21	0,12	1,0 a 5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L)	5,0	5,0	0,0	15,0
Dureza em Cálcio, mg/L $\text{Ca}^{++}$	548,0	925,0	1,6	---
Dureza em Magnésio, mg/L $\text{Mg}^{++}$	459,0	757,8	1,6	---
Dureza Total, mg/L $\text{CaCO}_3$	3.282,5	5.470,0	10,5	500,0
Sódio, mg/L $\text{Na}^+$	1.570,5	2.645,0	160,7	200,0
Potássio, mg/L $\text{K}^+$	36,8	70,2	4,5	---
Ferro Total, mg/L	0,02	0,03	0,01	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L $\text{CaCO}_3$	0,0	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	156,0	320,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	234,0	345,0	26,0	---
Alcalinidade Total, mg/L $\text{CaCO}_3$	390,0	665,0	26,0	---
Sulfato, mg/L $\text{SO}_4^{--}$	475,1	840,1	6,1	250,0
Cloreto, mg/L $\text{Cl}^-$	3.976,0	6.656,3	227,2	250,0
Nitrato, mg/L $\text{NO}_3^-$	0,71	0,93	1,06	10,0
Nitrito, mg/L $\text{NO}_2^-$	0,19	0,25	0,05	1,0
Silica, mg/L $\text{SiO}_2$	20,0	33,6	0,4	---
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	1,61	2,22	-2,5	$\leq 0$
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	7.465,3	12.542,0	434,8	1.000,0

(\*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 518/04 MS).



**Tabela B 4:** Dados referentes às análises físico-químicas da água do sistema II, após recuperação e limpeza química das membranas. Janeiro /2007.

PARÂMETROS	Alimentação	Concentrado	Permeado	VMP (*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25 °C	8.480,0	9.270,0	743,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	8,3	8,4	7,4	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	0,21	0,33	0,15	1,0 a 5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	0,0	0,0	0,0	15,0
Dureza em Cálcio, mg/L $\text{Ca}^{++}$	255,0	302,0	5,5	---
Dureza em Magnésio, mg/L $\text{Mg}^{++}$	348,6	392,4	5,4	---
Dureza Total, mg/L $\text{CaCO}_3$	2.090,0	2.390,0	36,3	500,0
Sódio, mg/L $\text{Na}^+$	1.366,8	1.525,5	134,3	200,0
Potássio, mg/L $\text{K}^+$	47,0	50,0	3,2	---
Ferro Total, mg/L	0,01	0,02	0,01	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L $\text{CaCO}_3$	0,0	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	168,0	124,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	172,0	256,0	23,0	---
Alcalinidade Total, mg/L $\text{CaCO}_3$	340,0	380,0	23,0	---
Sulfato, mg/L $\text{SO}_4^{--}$	321,8	389,5	4,1	250,0
Cloreto, mg/L $\text{Cl}^-$	3.053,0	3.408,0	206,0	250,0
Nitrato, mg/L $\text{NO}_3^-$	0,04	0,1	2,48	10,0
Nitrito, mg/L $\text{NO}_2^-$	0,06	0,06	0,01	1,0
Sílica, mg/L $\text{SiO}_2$	42,8	47,6	4,4	---
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	1,63	1,82	-2,04	$\leq 0$
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	6.119,0	6.977,0	401,0	1.000,0

(\*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 518/04 MS).

**Tabela B 5** – Dados referentes às análises físico-químicas da água do Sistema I.

PARÂMETROS	Alimentação	Concentrado	Permeado	VMP (*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25 °C	10.620,0	15.110,0	832,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,9	8,0	7,4	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	0,15	0,14	0,04	1,0 a 5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	2,0	5,0	0,0	15,0
Dureza em Cálcio, mg/L $\text{Ca}^{++}$	678,0	1.066,0	4,0	---
Dureza em Magnésio, mg/L $\text{Mg}^{++}$	526,2	905,4	0,9	---
Dureza Total, mg/L $\text{CaCO}_3$	3.887,5	6.437,5	13,8	500,0
Sódio, mg/L $\text{Na}^+$	1.396,5	2.240,7	142,0	200,0
Potássio, mg/L $\text{K}^+$	38,1	63,8	4,1	---
Ferro Total, mg/L	0,02	0,03	0,01	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L $\text{CaCO}_3$	0,0	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	168,0	404,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	260,0	322,0	28,0	---
Alcalinidade Total, mg/L $\text{CaCO}_3$	428,0	726,0	28,0	---
Sulfato, mg/L $\text{SO}_4^-$	582,0	947,1	5,0	250,0
Cloreto, mg/L $\text{Cl}^-$	4.047,0	6.567,5	213,0	250,0
Nitrato, mg/L $\text{NO}_3^-$	0,71	2,70	0,09	10,0
Nitrito, mg/L $\text{NO}_2^-$	0,2	0,86	0,04	1,0
Sílica, mg/L $\text{SiO}_2$	21,0	32,6	0,6	---
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	1,67	2,20	-2,13	$\leq 0$
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	7.728,0	12.502,0	410,0	1.000,0

(\*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 518/04 MS).

**Tabela B 6** – Dados referentes às análises físico-químicas da água do Sistema I, Janciro/2007.

PARÂMETROS	Alimentação	Concentrado	Permeado	VMP (*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25 °C	10.690,0	15.200,0	833,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	8,0	8,1	7,5	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	0,41	0,21	0,12	1,0 a 5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	5,0	5,0	0,0	15,0
Dureza em Cálcio, mg/L $\text{Ca}^{++}$	548,0	925,0	1,6	---
Dureza em Magnésio, mg/L $\text{Mg}^{++}$	459,0	757,8	1,6	---
Dureza Total, mg/L $\text{CaCO}_3$	3.282,5	5.470,0	10,5	500,0
Sódio, mg/L $\text{Na}^+$	1.570,5	2.645,0	160,7	200,0
Potássio, mg/L $\text{K}^+$	36,8	70,2	4,5	---
Ferro Total, mg/L	0,02	0,03	0,01	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L $\text{CaCO}_3$	0,0	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	156,0	320,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	234,0	345,0	26,0	---
Alcalinidade Total, mg/L $\text{CaCO}_3$	390,0	665,0	26,0	---
Sulfato, mg/L $\text{SO}_4^-$	475,1	840,1	6,1	250,0
Cloreto, mg/L $\text{Cl}^-$	3.976,0	6.656,3	227,2	250,0
Nitrato, mg/L $\text{NO}_3^-$	0,71	0,93	1,06	10,0
Nitrito, mg/L $\text{NO}_2^-$	0,19	0,25	0,05	1,0
Silica, mg/L $\text{SiO}_2$	20,0	33,6	0,4	---
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	1,61	2,22	-2,5	$\leq 0$
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	7.465,3	12.542,0	434,8	1.000,0

(\*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 518/04 MS).

**Tabela B 7** – Dados referentes às análises físico-químicas da água do Sistema I, Março/2007.

PARÂMETROS	Concentrado	Permeado	VMP (*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25 °C	15.620,0	774,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	8,0	7,7	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	0,11	0,05	1,0 a 5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L)	5,0	0,0	15,0
Dureza em Cálcio, mg/L $\text{Ca}^{++}$	1.100,0	1,6	---
Dureza em Magnésio, mg/L $\text{Mg}^{++}$	885,0	1,7	---
Dureza Total, mg/L $\text{CaCO}_3$	6.437,5	11,0	500,0
Sódio, mg/L $\text{Na}^+$	2.277,6	134,3	200,0
Potássio, mg/L $\text{K}^+$	63,8	6,4	---
Ferro Total, mg/L	0,03	0,01	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L $\text{CaCO}_3$	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	356,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	376,0	14,8	---
Alcalinidade Total, mg/L $\text{CaCO}_3$	732,0	14,8	---
Sulfato, mg/L $\text{SO}_4^-$	947,1	5,4	250,0
Cloreto, mg/L $\text{Cl}^-$	6.922,5	213,0	250,0
Nitrato, mg/L $\text{NO}_3^-$	0,89	0,04	10,0
Nitrito, mg/L $\text{NO}_2^-$	0,24	0,03	1,0
Silica, mg/L $\text{SiO}_2$	31,8	0,5	---
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	2,20	-2,43	$\leq 0$
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	12.918,0	384,0	1.000,0

**Tabela B 8** – Dados referentes às análises físico-químicas da água do Sistema II, Março/2007.

PARÂMETROS	Alimentação	Concentrado	Permeado	VMP (*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25 °C	8.710,0	10.420,0	892,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	8,2	8,0	8,3	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	0,13	0,19	0,30	1,0 a 5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	3,0	5,0	0,0	15,0
Dureza em Cálcio, mg/L $\text{Ca}^{++}$	349,0	428,0	10,6	---
Dureza em Magnésio, mg/L $\text{Mg}^{++}$	420,6	543,6	9,2	---
Dureza Total, mg/L $\text{CaCO}_3$	2.625,0	3.335,0	65,0	500,0
Sódio, mg/L $\text{Na}^+$	1.148,4	1.350,3	123,4	200,0
Potássio, mg/L $\text{K}^+$	20,6	23,6	2,1	---
Ferro Total, mg/L	0,01	0,02	0,01	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L $\text{CaCO}_3$	0,0	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	200,0	228,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L $\text{CaCO}_3$	268,0	272,0	24,4	---
Alcalinidade Total, mg/L $\text{CaCO}_3$	468,0	500,0	24,4	---
Sulfato, mg/L $\text{SO}_4^-$	346,7	457,2	7,4	250,0
Cloreto, mg/L $\text{Cl}^-$	2.928,8	3.621,0	218,7	250,0
Nitrato, mg/L $\text{NO}_3^-$	0,04	0,09	1,20	10,0
Nitrito, mg/L $\text{NO}_2^-$	0,05	0,06	0,01	1,0
Sílica, mg/L $\text{SiO}_2$	43,6	54,0	2,8	---
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	1,80	1,67	-0,84	$\leq 0$
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	5.774,0	7.075,0	464,0	1.000,0

(\*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 518/04 MS).