

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

**“SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE
INVERSA: LIMPEZA QUÍMICA DE MEMBRANAS E SEUS
EFEITOS”**

WANEIDE GOMES LOPES

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

2007

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

**SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE INVERSA:
LIMPEZA QUÍMICA DE MEMBRANAS E SEUS EFEITOS**

WANEIDE GOMES LOPES

**CAMPINA GRANDE - PB
Fevereiro de 2007**

**“SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE INVERSA:
LIMPEZA QUÍMICA DE MEMBRANAS E SEUS EFEITOS”**

WANEIDE GOMES LOPES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de mestre.

Área de Concentração: **Operações e Processos**

Orientador: **Prof. Kepler Borges França (Ph.D)**

CAMPINA GRANDE - PB

Fevereiro de 2007



L864s Lopes, Waneide Gomes
 Sistemas de dessalinizacão via osmose inversa: limpeza química de membranas e seus efeitos / Waneide Gomes Lopes.- Campina Grande, 2007.
 96 f. : il.

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

 1. Dessalinizacão 2. Osmose Inversa 3. Limpeza Química 4. Dissertação I. Franca, Kepler Borges, Dr. II. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB) III. Título

CDU 628.165(043)

"SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE INVERSA: LIMPEZA
QUÍMICA DE MEMBRANAS E SEUS EFEITOS"

WANEIDE GOMES LOPES

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 05, 02, 2007


BANCA EXAMINADORA



Prof. Kepler Borges França (Ph.D)
Orientador



Prof. Dr. Hervé Michel Laborde
Examinador Interno



Prof. Dr. Tomás Jeferson Alves de Melo
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Cícero Vieira Lopes e M^a de Lourdes Gomes Lopes;

Aos meus irmãos, Wanderley e Wanessa;

E ao meu noivo, Luisinho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, Eterno guia dos meus passos, por ter me concedido a oportunidade de concluir este mestrado, bem como coragem e paciência para lidar com os obstáculos.

Aos meus pais e irmãos, alicerce da minha vida, por todo carinho, incentivo e apoio em todas as situações sem medir esforços.

Ao meu noivo, que é um presente que Deus me deu, pelo amor, amizade, companheirismo, paciência, compreensão e palavras de apoio durante nossa caminhada.

Ao meu orientador, professor Kepler Borges França, pela orientação, apoio e ensinamentos durante a realização deste trabalho.

A todos do Laboratório de Referência em Dessalinização, pela assistência e amizade.

Aos amigos da Prefeitura Municipal de Campina Grande, Mônica, Herbert, Cláudio e Estênio, e aos operadores dos dessalinizadores de Amorim e Carretão, Marconi e Arlindo, que gentilmente colaboraram com essa pesquisa.

Aos amigos da pós-graduação, com carinho especial a Ambrósio.

Aos professores do mestrado em Engenharia Química pelo conhecimento transmitido durante a realização das disciplinas.

A coordenação da Pós-Graduação em Engenharia Química, nas pessoas do Coordenador Prof. Luiz Gonzaga S. Vasconcelos e da secretária Maricé F. da Silva, pela atenção e informações prestadas durante o mestrado.

Ao professor Egídio Luiz Furlanetto pela orientação no estágio docência.

A Gabriel F. da Silva, Marcionilo de Melo Lopes e Haroldo Silveira Dórea, pela força, incentivo e importante apoio na minha caminhada durante a graduação e rumo ao mestrado.

A CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Enfim, a todos aqueles que de alguma maneira colaboraram na realização deste trabalho, o meu "muito obrigada".

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo monitorar o desempenho de sistemas de dessalinização via osmose inversa instalados no Sítio Amorim (Sistema 1) e no Sítio Carretão (Sistema 2), ambos situados em Campina Grande - PB. Inicialmente, foi realizado um diagnóstico técnico para averiguar as situações dos sistemas em termos de operação e qualidade da água produzida.

Foram realizadas coletas de amostras de águas do poço, permeado e concentrado para fins de análises físico-químicas, as quais serviram como base de dados visando comparar o desempenho das limpezas químicas e o uso em simulador de projetos de sistemas com membranas para fins de dessalinização.

A partir da concentração da água de alimentação de $3.030,0 \text{ mg.L}^{-1}$ de STD o Sistema 1 ficou produzindo $0,9 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ de água dessalinizada com $191,0 \text{ mg.L}^{-1}$ de STD, enquanto que o Sistema 2 com alimentação de $10.063,3 \text{ mg.L}^{-1}$ de STD apresentou uma produção de $0,55 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ com $364,0 \text{ mg.L}^{-1}$ de STD.

ABSTRACT

The present work has the objective to monitor the performance of the following desalinization reverse osmosis systems: Sítio Amorim and Sítio Carretão, both of them located in Campina Grande city at the Paraíba state. In order to observe the situations in terms of water quality and operation for the systems a technical diagnostic was necessary to do.

Samples of the well water, permeate and the concentrated were collected to be analysed the physical-chemical compounds, which were used to study de performance of the cleaning of membranes and in the simulator design for desalinization membrane systems.

Considering the feed water for system 1 of 3030.0 mg.L^{-1} of STD the permeate production was of $0.9 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ at 191.0 mg.L^{-1} of STD, while the system 2 the feed water shown $10063.3 \text{ mg.L}^{-1}$ of STD its production was $0.55 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ at 364.0 mg.L^{-1} of STD.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	i
ÍNDICE DE TABELAS.....	iii
SIMBOLOGIA.....	v
1. <i>INTRODUÇÃO</i>	1
2. <i>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</i>	5
2.1. <i>PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO</i>	5
2.2. <i>PROCESSOS DE SEPARAÇÃO COM MEMBRANAS</i>	7
2.2.1. <i>Tipos de processos de separação com membranas</i>	9
Microfiltração.....	11
Ultrafiltração	12
Nanofiltração	12
Osmose Inversa.....	12
Eletrodíálise	13
2.2.2. <i>Principais aplicações de processos de separação com membranas</i>	13
2.3. <i>DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE INVERSA</i>	15
2.4. <i>OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO</i>	17
2.5. <i>PRÉ-TRATAMENTO DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO</i>	18
2.5.1. <i>Indicadores de Incrustações</i>	21
2.6. <i>PÓS-TRATAMENTO</i>	24
2.7. <i>LIMPEZA QUÍMICA DAS MEMBRANAS</i>	25
2.8. <i>PRINCIPAIS PARÂMETROS DO PROCESSO DE OSMOSE INVERSA</i>	28
2.8.1. <i>Pressão Osmótica</i>	28
2.8.2. <i>Fluxo do Permeado e do Concentrado</i>	29
2.8.3. <i>Taxa de Rejeição de Sais</i>	32
2.8.4. <i>Taxa de Passagem de Sais</i>	32
2.8.5. <i>Recuperação do Sistema</i>	33
2.8.6. <i>Concentração de Sais Dissolvidos</i>	34
2.9. <i>BALANÇO DE MASSA PARA OS SISTEMAS DE OSMOSE INVERSA</i>	35
2.9.1. <i>Sistema de Dessalinização do Sítio Amorim</i>	35

2.9.2.	Sistema de Dessalinização do Sítio Carretão.....	36
2.10.	PROJETO DE SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO	37
2.11.	SIMULAÇÃO DE PROCESSOS DE OSMOSE INVERSA.....	38
3.	<i>MATERIAIS E MÉTODOS</i>	39
3.1.	METODOLOGIA ADOTADA PARA O PROCESSO DE MONITORAMENTO DOS SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO	39
3.2.	FONTE HÍDRICA.....	40
3.3.	SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE INVERSA.....	41
3.4.	DIAGNÓSTICO TÉCNICO DOS SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO	43
3.5.	PRODUTOS QUÍMICOS	45
3.6.	EQUIPAMENTOS.....	45
3.7.	ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS	46
3.8.	PROCESSO DE LIMPEZA DOS ELEMENTOS DE MEMBRANAS	46
4.	<i>RESULTADOS E DISCUSSÃO</i>	48
4.1.	VARIAÇÃO DO POTENCIAL HIDROGENIÔNICO DA SOLUÇÃO USADA DURANTE A LIMPEZA QUÍMICA DE MEMBRANAS	48
4.2.	VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DURANTE A LIMPEZA QUÍMICA DE MEMBRANAS.....	51
4.3.	CONCENTRAÇÃO DE SAIS PRESENTES NA ÁGUA ANTES E APÓS A LIMPEZA QUÍMICA	53
4.4.	COMPORTAMENTO DO POTENCIAL HIDROGENIÔNICO COM O TEMPO, ANTES E APÓS A LIMPEZA QUÍMICA	55
4.5.	COMPORTAMENTO DA CONDUTIVIDADE COM O TEMPO, ANTES E APÓS A LIMPEZA QUÍMICA	56
4.6.	TAXA DE REJEIÇÃO DE SAIS	58
4.7.	COMPARAÇÃO DOS DADOS SIMULADOS COM OS SISTEMAS EM CAMPO.....	60
5.	<i>CONCLUSÕES</i>	63
6.	<i>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</i>	65
7.	<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	66
	ANEXO I.....	72
	ANEXO II.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sistema de dessalinização.....	5
Figura 2.2 - Esquema básico de funcionamento de uma membrana.....	8
Figura 2.3 – Esquema básico de funcionamento de uma membrana de osmose inversa.	9
Figura 2.4 - Modelo de filtração de fluxo cruzado.	9
Figura 2.5 – Principais características das técnicas de separação com membranas que utilizam diferença de pressão como força motriz.	10
Figura 2.6 – Processo de osmose e osmose inversa.	17
Figura 2.7 – Equipamento básico para medida do IDS.....	22
Figura 2.8 – Esquema típico de um sistema de limpeza química.	28
Figura 2.9 – Sistema 1 constituído por dois permeadores em série.	35
Figura 2.10 - Sistema 2 constituído por um permeador.	36
Figura 3.1 – Diagrama de blocos do processo de monitoramento dos sistemas de dessalinização.	40
Figura 3.2 – Foto do dessalinizador do Sítio Amorim.	41
Figura 3.3 - Foto do dessalinizador do Sítio Carretão.....	42
Figura 4.1 – Variação do pH da solução de HCl usada durante a primeira limpeza química dos elementos de membrana do Sistema 1.....	49
Figura 4.2 – Variação do pH da solução de HCl usada durante a segunda limpeza química dos elementos de membrana do Sistema 1.....	49
Figura 4.3 - Variação do pH da solução de HCl usada durante a limpeza química dos elementos de membrana do Sistema 2.	50
Figura 4.4 - Variação da condutividade elétrica da solução de HCl usada durante a primeira limpeza química dos elementos de membrana do Sistema 1.	51
Figura 4.5 - Variação da condutividade elétrica da solução de HCl usada durante a segunda limpeza química dos elementos de membrana do Sistema 1.....	51
Figura 4.6 - Variação da condutividade elétrica da solução de HCl usada durante a limpeza química dos elementos de membrana do Sistema 2.....	52

Figura 4.7 – Perfil da concentração de sais presentes na água antes e após a primeira limpeza química realizada no Sistema 1.....	53
Figura 4.8 - Perfil da concentração de sais presentes na água antes e após a segunda limpeza química realizada no Sistema 1.....	54
Figura 4.9 - Perfil da concentração de sais presentes na água antes e após a limpeza química realizada no Sistema 2.....	54
Figura 4.10 – Variação do pH do permeado e concentrado, sob efeito da pressão de 16,0 kgf.cm ⁻² antes e após a limpeza do Sistema 1.....	55
Figura 4.11 - Variação do pH do permeado e concentrado, sob efeito da pressão de 13,8 kgf.cm ⁻² antes e após a limpeza do Sistema 2.....	56
Figura 4.12 - Variação da condutividade elétrica do permeado e concentrado, sob efeito da pressão de 16,0 kgf.cm ⁻² antes e após a limpeza do Sistema 1.....	57
Figura 4.13 – Variação da condutividade elétrica do permeado e concentrado, sob efeito da pressão de 13,8 kgf.cm ⁻² antes e após a limpeza do Sistema 2.....	57
Figura 4.14 – Perfil da taxa de rejeição de sais antes e depois da primeira limpeza química do Sistema 1.....	58
Figura 4.15 - Perfil da taxa de rejeição de sais antes e depois da segunda limpeza química do Sistema 1.....	59
Figura 4.16 - Perfil da taxa de rejeição de sais antes e depois da limpeza química do Sistema 2.....	59
Figura 4.17 – Resultados experimentais e simulados das análises físico-químicas do concentrado e permeado do Sistema 1.....	61
Figura 4.18 - Resultados experimentais e simulados das análises físico-químicas do concentrado e permeado do Sistema 2.....	61

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Faixa de operação dos processos de dessalinização em relação à concentração.	6
Tabela 2.2 – Energia consumida pelos processos de destilação e osmose inversa para dessalinização da água do mar.	7
Tabela 2.3 - Principais processos comerciais de separação por membranas.	11
Tabela 2.4 - Exemplos de Aplicação de Processos com Membranas.	13
Tabela 2.5 – Compostos que oferecem risco para a formação de precipitados na superfície de OI e NF.	19
Tabela 3.1 – Especificações das membranas de osmose inversa usadas nos Sistemas 1 e 2.	42
Tabela 3.2 - Diagnóstico técnico dos Sistemas de dessalinização do Sítio Amorim (Sistema 1) e do Sítio Carretão (Sistema 2).	43
Tabela A1 – Laudo das análises físico-químicas da água do sistema de dessalinização de Amorim, amostras coletadas em junho de 2006.	73
Tabela A2 – Laudo das análises físico-químicas da água do sistema de dessalinização de Amorim antes da limpeza química, amostras coletadas em agosto de 2006.	74
Tabela A3 – Laudo das análises físico-químicas da água do sistema de dessalinização de Amorim após a limpeza química, amostras coletadas em agosto de 2006.	75
Tabela A4 – Laudo das análises físico-químicas da água do sistema de dessalinização de Amorim antes da limpeza química, amostras coletadas em novembro de 2006.	76
Tabela A5 – Laudo das análises físico-químicas da água do sistema de dessalinização de Amorim após a limpeza química, amostras coletadas em novembro de 2006.	77
Tabela A6 - Variação do pH e da condutividade elétrica da solução usada durante a primeira limpeza química dos elementos de membrana realizada no Sistema 1.	78

Tabela A7 - Variação do pH e da condutividade elétrica da solução usada durante a segunda limpeza química dos elementos de membrana realizada no Sistema 1.....	78
Tabela A8 - Monitoramento da condutividade elétrica, pH e vazão do permeado e concentrado antes e após a limpeza química no Sistema 1, para uma pressão de 16,0 kgf.cm ⁻²	79
Tabela A9 – Monitoramento das pressões e vazões do Sistema 1.....	80
Tabela B1 – Laudo das análises físico-químicas da água do sistema de dessalinização de Carretão, amostras coletadas em setembro de 2005.....	86
Tabela B2 – Laudo das análises físico-químicas da água do sistema de dessalinização de Carretão, amostras coletadas em fevereiro de 2006.....	87
Tabela B3– Laudo das análises físico-químicas da água do sistema de dessalinização de Carretão antes da limpeza química, amostras coletadas em janeiro de 2007.....	88
Tabela B4 – Laudo das análises físico-químicas da água do sistema de dessalinização de Carretão após a limpeza química, amostras coletadas em janeiro de 2007.....	89
Tabela B5 - Variação do pH e da condutividade elétrica da solução usada durante a limpeza química dos elementos de membrana realizada no Sistema 2.....	90
Tabela B6 - Monitoramento da condutividade elétrica, pH e vazão do permeado e concentrado antes e após a limpeza química no Sistema 2, para uma pressão de 13,8 kgf.cm ⁻²	90
Tabela B7 – Monitoramento das pressões e vazões do Sistema 2.....	91

SIMBOLOGIA

A	Área de Permeação da Membrana (m^2)
C_a	Concentração da Solução de Alimentação ($mg.L^{-1}$)
C_c	Concentração do Concentrado ($mg.L^{-1}$)
C_i	Concentração Molar ($mol.L^{-1}$)
C_p	Concentração do Permeado ($mg.L^{-1}$)
C_{pa}	Concentração do Permeado Antes da Limpeza Química ($mg.L^{-1}$)
C_{pd}	Concentração do Permeado Depois da Limpeza Química ($mg.L^{-1}$)
ED	Eletrodialise
IDS	Índice de Densidade de Sedimentos
ISL	Índice de Saturação de Langelier
ITA	Instituto Tecnológico da Aeronáutica
J_i	Fluxo Mássico do Solute ($mg.m^{-2}.h^{-1}$)
J_w	Fluxo do Permeado ($L.m^{-2}.h^{-1}$)
K	Condutividade Elétrica ($\mu S.cm^{-1}$)
K_c	Condutividade Elétrica do Concentrado ($\mu S.cm^{-1}$)
K_i	Coefficiente de Transferência de Massa do Solute ($L.m^{-2}.h^{-1}$)
K_p	Condutividade Elétrica do Permeado ($\mu S.cm^{-1}$)
K_w	Coefficiente de Transferência de Massa do Solvente ($L.kgf^{-1}.h^{-1}$)
LABDES	Laboratório de Referência em Dessalinização
MED	Destilação Múltiplo Efeito
MF	Microfiltração
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MSF	Destilação Flash com Múltiplo Estágio
NF	Nanofiltração
OI	Osmose Inversa
P_a	Pressão de Alimentação do Sistema ($kgf.cm^{-2}$)
P_c	Pressão do Concentrado do Sistema ($kgf.cm^{-2}$)
P_p	Pressão do Permeado do Sistema ($kgf.cm^{-2}$)
P_1	Pressão de Entrada dos Filtros ($kgf.cm^{-2}$)
P_2	Pressão de Saída dos Filtros ($kgf.cm^{-2}$)
P_3	Pressão de Entrada das Membranas ($Kgf.cm^{-2}$)

P_4	Pressão de Saída das Membranas (Kgf.cm^{-2})
P_5	Pressão da Água do Permeado (kgf.cm^{-2})
pH	Potencial Hidrogeniônico
pH_c	Potencial Hidrogeniônico do Concentrado
pH_p	Potencial Hidrogeniônico do Permeado
pH_s	Potencial Hidrogeniônico no qual a Água Fica Saturada com CaCO_3
PM	Peso Molecular
Q_a	Vazão de Alimentação (L.h^{-1})
Q_c	Vazão do Concentrado (L.h^{-1})
Q_p	Vazão do Permeado (L.h^{-1})
Q_1	Vazão do Concentrado ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$)
Q_2	Vazão do Permeado ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$)
r	Recuperação do Sistema (%)
R	Constante Universal dos Gases ($\text{kgf.L.cm}^{-2}.\text{mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
SRH	Secretaria de Recursos Hídricos
STD	Sólidos Totais Dissolvidos (mg.L^{-1})
t_i	Tempo Inicial (min)
t_f	Tempo Final (min)
T	Temperatura Absoluta da Solução (K)
TDS_a	Total de Sais Dissolvidos na Corrente de Alimentação (mg.L^{-1})
TDS_c	Total de Sais Dissolvidos na Corrente do Concentrado (mg.L^{-1})
TDS_p	Total de Sais Dissolvidos na Corrente do Permeado (mg.L^{-1})
TPS	Taxa de Passagem de Sais (%)
TRS	Taxa de Rejeição de Sais (%)
UF	Ultrafiltração
v	Velocidade de Escoamento do Fluido (m.s^{-1})
VC	Destilação por Compressão de Vapor
VMP	Valor máximo Permissível
ΔC	Gradiente de Concentração (mg.L^{-1})
ΔP	Gradiente de Pressão Hidráulica (kgf.cm^{-2})
ΔV	Gradiente de Potencial Elétrico (V)
$\Delta \pi$	Gradiente de Pressão Osmótica (kgf.cm^{-2})
π	Pressão Osmótica da Solução (kgf.cm^{-2})

π_a	Pressão Osmótica de Alimentação (kgf.cm^{-2})
π_c	Pressão Osmótica do Concentrado (kgf.cm^{-2})
π_p	Pressão Osmótica do Permeado (kgf.cm^{-2})
v_i	Carga Elétrica do Íon

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

A água, um recurso limitado, vital para a existência de vida na terra e uma necessidade para o desenvolvimento econômico e social e para sustentabilidade ambiental, está se tornando um produto escasso. Isto é causado pelo crescimento da população, mudança de estilo de vida, poluição de água causada por intervenção humana, uso ineficiente da água e mudanças climáticas como secas e inundações (TSIOURTIS, 2001).

É muito provável que, no início do terceiro milênio, a água passe a ser tão preciosa, para as populações do Planeta, como são o ouro e o petróleo. No Nordeste brasileiro, essa prevenção não é difícil de se fazer, tendo em vista o tratamento inadequado exercido pelas populações, nos poucos volumes hídricos existentes, tratamento este não condizente com a importância que a água tem ou que deveria ter na vida das pessoas. No Nordeste brasileiro, as secas sucessivas, aliadas à falta total de planejamento dos órgãos públicos com relação à gestão da água, fazem com que tenhamos plena convicção do colapso iminente desse setor. A concretização desse cenário é uma mera questão de tempo. Vai faltar água para beber (SUASSUNA, 2005).

A água é o produto de maior quantidade do nosso planeta, sendo considerada como um dos produtos mais nobres (PRICE, 1991). De toda água existente na Terra ($1.380.000 \text{ km}^3$), 97,3% é água salgada e apenas 2,7% é água doce. Da água doce disponível na Terra (37.000 km^3), 77,20% se encontra em forma de gelo nas calotas polares (28.564 km^3), 22,40% se trata de água subterrânea (8.288 km^3), 0,35% se encontra nos lagos e pântanos (128 km^3), 0,04 % se encontra na atmosfera (16 km^3) e apenas 0,01% da água doce está nos rios (4 km^3) (DAEE, 2007).

O acesso à água potável é, desde o início dos tempos, um elemento de fundamental importância para a sobrevivência e o desenvolvimento da espécie humana. Sua função de agente de desenvolvimento econômico e social das

nações, sob o binômio qualidade/quantidade, é fundamental. A sua falta, decerto, afeta o desenvolvimento econômico dos países, basta verificar a questão das grandes estiagens que ocorrem no Nordeste brasileiro (SILVEIRA, 1999).

Fala-se muito em água do subsolo para se resolver os problemas hídricos da região semi-árida nordestina. É, sem dúvida, uma alternativa importante, mas que não é a solução de todo o problema. Estima-se que 35% dos 60.000 poços escavados no embasamento cristalino nordestino estejam secos ou obstruídos. Com essa estatística, é de se esperar que todo e qualquer programa de perfuração de poços que venha a ser realizado na região trate primeiro da recuperação dos poços que fazem parte desse percentual (SUASSUNA, 2005).

Outra questão relacionada com a água de subsolo diz respeito a sua qualidade química. É sabido que as águas do embasamento cristalino normalmente apresentam teores elevados de sais. O tratamento dessas águas pode ser realizado em dessalinizadores, que são equipamentos extremamente eficientes. O processo de retirada dos sais da água é feito por intermédio de membranas (osmose reversa), o que dá ao equipamento índices espantosos de eficiência: uma água extremamente salinizada, ao ser tratada, passa a conter apenas traços de sais na sua composição. Tornando-se, praticamente, água destilada. Um aspecto importante a ser mencionado em relação ao uso de dessalinizadores, é o destino que deverá ser dado ao rejeito do material resultante do processo de dessalinização. Esse material, extremamente rico em sais, atualmente é depositado em lagoas de decantação ou mesmo colocado ao ar livre sem maiores preocupações, constituindo-se em um grave problema ambiental a ser solucionado pelos pesquisadores. É provável que os caminhos a serem seguidos pela pesquisa, digam respeito ao aproveitamento desses sais para fins pecuários, visto ser a região semi-árida muito carente no aspecto de mineralização dos animais; na carcinicultura e piscicultura, principalmente no cultivo irrigado de plantas halófitas (que se desenvolvem em ambientes salinos), a exemplo da *Atriplex*, que necessitam de águas com teores salinos elevados para se desenvolverem (SUASSUNA, 2005).

O desejo do homem de transformar a água salgada em doce remonta à antiguidade. Aristóteles, preocupando-se com o problema, há 2.300 anos, costumava dizer a seus alunos que "a água salgada, quando passa a vapor se

torna doce e o vapor não produz água salgada depois que se condensa". Em 1928 foi instalada em Curaçao uma estação dessalinizadora pelo processo de destilação, com uma produção diária de 50 m³ de água potável. Em 1971 as instalações de Curaçao foram ampliadas para produzir 20.000 m³.dia⁻¹. Nos Estados Unidos da América as primeiras iniciativas para o aproveitamento da água do mar datam de 1952, quando o Congresso aprovou a Lei Pública número 448, cuja finalidade seria criar meios que permitissem reduzir os custos da dessalinização da água do mar. O Congresso designou a Secretaria do Interior para fazer cumprir a lei, daí resultando a criação do Departamento de Águas Salgadas. O Chile foi um dos países pioneiros na utilização da destilação solar, construindo o seu primeiro destilador em 1961. Em 1964 entrou em funcionamento o alambique solar de Syni, ilha grega do Mar Egeu, considerado o maior da época, destinado a abastecer de água potável à sua população de 30.000 habitantes. A Grã-Bretanha, já em 1965, produzia 74% de água doce que se dessalinizava no mundo, num total aproximado de 190.000 m³.dia⁻¹ (ALMEIDA, 2003).

No Brasil, as primeiras experiências com destilação solar foram realizadas em 1970, sob o auspício do Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA). Em 1987 a Petrobras iniciou o seu programa de dessalinização de água do mar para atender às suas plataformas marítimas, usando o processo de osmose inversa. Tendo esse processo sido usado pioneiramente, aqui no Brasil, em terras baianas, para dessalinizar água salobra nos povoados de Olho D'Água das Moças, no município de Feira de Santana, e Malhador no município de Ipiara (ALMEIDA, 2003).

Tendo em vista a grande carência de água potável no Nordeste brasileiro, o Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES), situado na Universidade Federal de Campina Grande, com apoio da Secretaria dos Recursos Hídricos do Ministério de Meio Ambiente, vem desenvolvendo pesquisas e projetos sobre processos de dessalinização de águas salinas e salobras para atender às comunidades carentes de água potável.

O LABDES visa projetar e implementar sistemas de dessalinização via osmose inversa (OI). Para isso se faz necessário o conhecimento prévio da

qualidade da água a ser dessalinizada, sendo de fundamental importância à determinação de seus parâmetros físico-químicos (LIRA, 2004).

No Brasil, segundo levantamento do CTHidro, há cerca de 550 aparelhos dessalinizadores no Nordeste. Desses, devido a problemas diversos, normalmente relacionados à falta de manutenção, apenas 30% funcionam (AMBIENTEBRASIL, 2006).

O presente trabalho, que foi desenvolvido no LABDES, tem como objetivo estudar e monitorar tecnicamente o desempenho de sistemas de dessalinização via osmose inversa, instalados no Sítio Amorim e no Sítio Carretão, ambos situados em Campina Grande - PB, para avaliar a qualidade da água usada para o consumo humano.

Os sistemas de dessalinização das comunidades do Sítio Amorim e Sítio Carretão beneficiam com água potável a 100 e 30 famílias, respectivamente. Tem-se observado que os sistemas de dessalinização dessas comunidades são as únicas fontes de água potável para o consumo humano. É de nosso conhecimento, que quando ocorre uma paralisação por motivos técnicos, mesmo por curtos períodos, as comunidades são afetadas diretamente por falta de água e os resultados de aflição chegam de imediato às autoridades.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO

Os processos de dessalinização de água são métodos usados para remover os sais da água salgada, tornando-a potável e apropriada para o consumo humano e de animais e para o uso em irrigações (AHMAD and SCHMID, 2001).

Os sistemas de dessalinização para águas salobras mais comuns encontrados no campo são compostos por poço tubular, bomba do poço, tanque de alimentação (água bruta), abrigo de alvenaria, dessalinizador, tanque do permeado (potável) e tanque do concentrado (rejeito), conforme mostra a Figura 2.1 (FRANÇA, 2006).

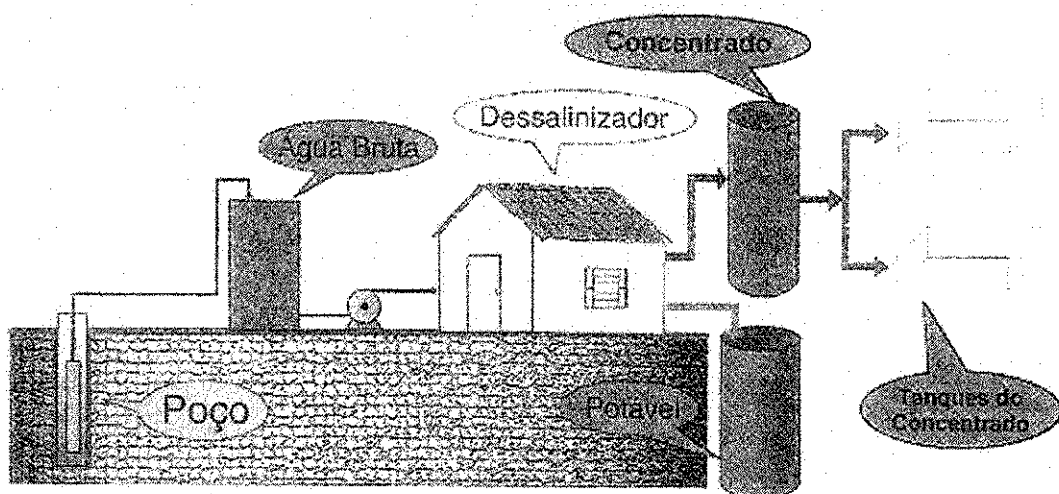


Figura 2.1 – Sistema de dessalinização.

Fonte: FRANÇA, 2006.

Um dessalinizador essencialmente efetua a separação da água salina em dois fluxos: um com baixa concentração de sais dissolvidos, conhecido como

permeado e, o outro contendo o restante dos sais dissolvidos, conhecido como concentrado ou rejeito.

A dessalinização de água pode ser realizada por diferentes técnicas que podem ser classificadas em duas categorias: processos térmicos e processos de membranas (AHMAD and SCHMID, 2001).

Os processos térmicos podem ser subdivididos nos seguintes processos: destilação flash com múltiplo estágio (MSF), destilação múltiplo efeito (MED), destilação por compressão de vapor (VC), congelamento e destilação solar.

Enquanto os processos de membrana são subdivididos em: microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF), osmose inversa (OI) e eletrodialise (ED) (YOUNOS and TULOU, 2005).

De uma maneira geral cada processo opera melhor dentro de uma determinada faixa de salinidade (OLIVEIRA, 2002), como mostra a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Faixa de operação dos processos de dessalinização em relação à concentração.

Processos	Concentrações
Destilação	10.000 a 50.000 mg.L ⁻¹
Congelamento	5.000 a 50.000 mg.L ⁻¹
Osmose Inversa	1.000 a 15.000 mg.L ⁻¹
Eletrodialise	1.000 a 5.000 mg.L ⁻¹

Fonte: OLIVEIRA, 2002

As energias usadas nos processos de dessalinização são principalmente, energia mecânica (eletricidade) e energia térmica (calor) (CARDONA and PIACENTINO, 2004). A energia representa aproximadamente 25 – 40 % do custo total do sistema de dessalinização de água (OLIVEIRA, 2002).

A quantidade de energia requerida em plantas de dessalinização difere conforme a técnica usada na dessalinização da água. Os processos de destilação apresentam um consumo de energia superior ao de OI, como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Energia consumida pelos processos de destilação e osmose inversa para dessalinização da água do mar.

Processo	Energia total consumida (kWh.m ⁻³)	Temperatura máxima de operação (°C)
Osmose inversa (OI)	4,76	45
Destilação múltiplo efeito (MED)	6,87	75
Destilação por compressão de vapor (VC)	9,25	100
Destilação flash com múltiplo estágio (MSF)	9,52	95

Fonte: AMJAD, 1993

Existem maneiras de se aumentar a oferta de água potável e diminuir assim o consumo de energia por m³ de água produzida (FILHO, 2000):

- ✓ Misturando parte da solução de alimentação com o permeado produzido até um teor de sais aceitável da solução resultante;
- ✓ Fazendo recirculação do concentrado, para diminuir o consumo de energia;
- ✓ Otimizando o arranjo dos módulos de osmose inversa e o tipo de membrana utilizada;
- ✓ Evitando incrustações nas membranas, através de limpeza química e física.

2.2. PROCESSOS DE SEPARAÇÃO COM MEMBRANAS

Uma membrana pode ser definida como um filme fino sólido que separa duas soluções e que atua como barreira seletiva para transporte de componentes destas soluções, quando aplicada algum tipo de força externa, essa força pode ser: pressão, sucção ou potencial elétrico (Figura 2.2). Após a passagem pela membrana o líquido é denominado permeado. Nos processos de separação com

membranas não ocorre transformação química ou biológica de componentes durante a filtração (SOUSA, 2003).

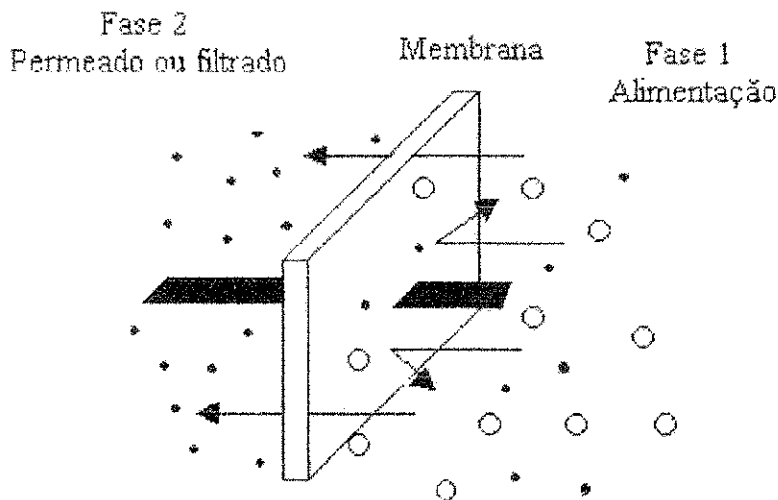


Figura 2.2 - Esquema básico de funcionamento de uma membrana.

Fonte: SOUSA, 2003

Membranas filtrantes constituem, atualmente, a principal inovação tecnológica nos processos de tratamento de água, sendo a primeira grande inovação, desde o desenvolvimento das tecnologias convencionais de tratamento de água no início do século passado (SCHNEIDER and TSUTIYA, 2001).

Nas tecnologias de filtração com membranas a vazão afluente é separada em dois fluxos distintos, denominados permeado e concentrado (Figura 2.3). Permeado é a parcela que passa através da membrana, enquanto o concentrado é a parcela que fica enriquecida com solutos ou sólidos suspensos retidos pela membrana (SANTOS *et al*, 2004). Nestes processos o solvente (água) é forçado a atravessar uma membrana semipermeável pela aplicação de uma força motriz (que pode ser, por exemplo, uma diferença de pressão). As tecnologias de membranas filtrantes são aplicadas tanto no pós-tratamento de esgoto sanitário como no tratamento de água para abastecimento (SCHNEIDER and TSUTIYA, 2001).

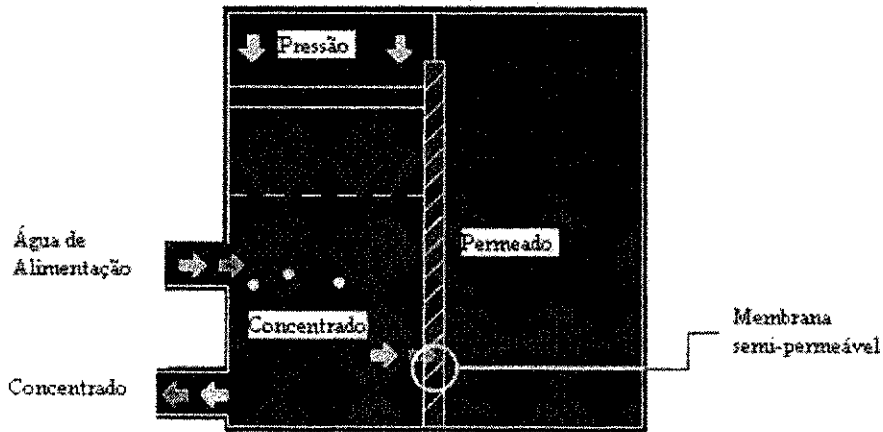


Figura 2.3 – Esquema básico de funcionamento de uma membrana de osmose inversa.

Fonte: SYSTEMS, 2006

2.2.1. Tipos de processos de separação com membranas

Os sistemas de separação por membranas ocorrem através de um método denominado de fluxo cruzado e compreende a utilização de uma corrente de alimentação pressurizada fluindo paralelamente a superfície da membrana. Esta corrente de alimentação é dividida em duas correntes de saída; a solução que passou através da superfície da membrana (permeado) e a corrente concentrada remanescente (concentrado) (HABERT *et al*, 1997), como podemos observar na Figura 2.4.

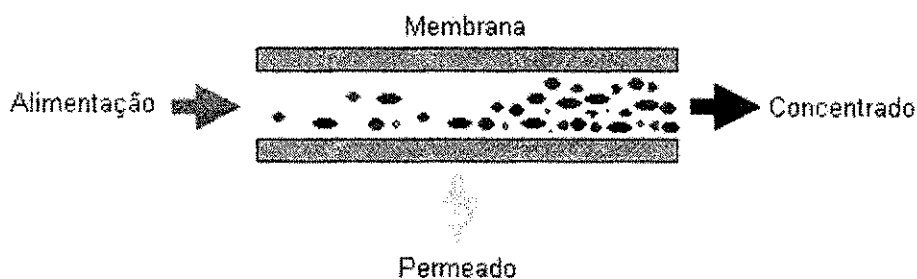


Figura 2.4 - Modelo de filtração de fluxo cruzado.

Os processos de separação por membranas com transporte de uma dada espécie, ocorrem devido à existência de uma força motriz. Nos processos de

separação com membranas como microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI), a força motriz é o gradiente de pressão (FRANÇA, 2004). Esses processos podem ser entendidos como uma extensão dos processos de filtração clássica que utilizam meios filtrantes (membranas) cada vez mais fechados, ou seja, com poros cada vez menores.

Na Figura 2.5 são apresentadas as principais características dos processos de separação com membranas que utilizam a diferença de pressão como força motriz.

Em resumo, podemos dizer que a MF, a UF, a NF e a OI são processos de separação por membranas, os quais diferem entre si na dimensão física do material retido pela membrana.

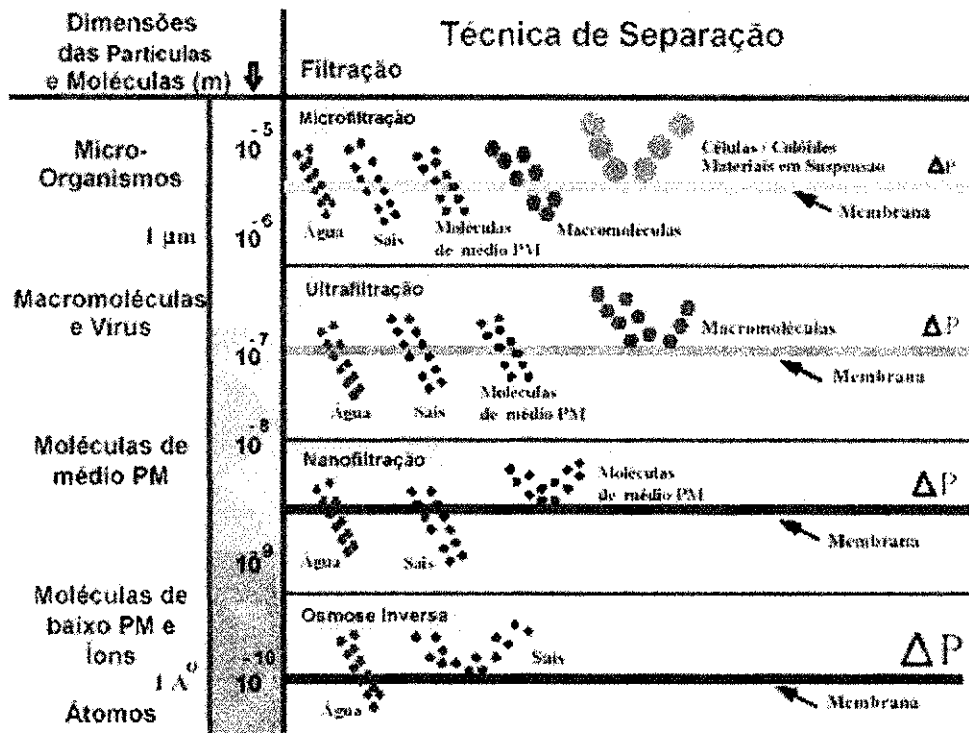


Figura 2.5 – Principais características das técnicas de separação com membranas que utilizam diferença de pressão como força motriz.

Fonte: HABERT *et al*, 1997

Existe outro processo de separação por membrana que utiliza como força motriz o potencial elétrico: é a eletrodialise (ED).

Assim, em função das características da membrana utilizada e do tipo de força motriz aplicada é possível identificar os diferentes processos de separação

com membranas. A Tabela 2.3 relaciona os principais processos comerciais de separação por membranas, a força motriz e o material retido, em cada caso (MOTTA).

Tabela 2.3 - Principais processos comerciais de separação por membranas.

PROCESSOS	FORÇA MOTRIZ	MATERIAL RETIDO	MATERIAL QUE PERMEIA
MICROFILTRAÇÃO (MF)	ΔP (0,5 - 2 atm)	Material em suspensão, bactérias. PM > 500.000	Água e sólidos dissolvidos.
ULTRAFILTRAÇÃO (UF)	ΔP (1 - 7 atm)	Colóides, macromoléculas. PM > 5.000	Água, sais solúveis de baixo peso molecular.
NANOFILTRAÇÃO (NF)	ΔP (5 - 25 atm)	Moléculas de peso molecular médio. 500 < PM < 2.000	Água, sais e moléculas de baixo peso molecular.
OSMOSE INVERSA (OI)	ΔP (15 -80 atm)	Todo material solúvel ou em suspensão.	Água
ELETRODIÁLISE (ED)	ΔV	Macromoléculas e compostos não iônicos.	Íons

Fonte: MOTTA

Microfiltração

A MF é o processo de separação com membranas mais próximo da filtração clássica. Utiliza membranas porosas com poros na faixa entre 0,05 e 5,0 μm , são processos indicados para retenção de materiais em suspensão e emulsão. Como as membranas de microfiltração são relativamente abertas, as pressões aplicadas não ultrapassam 2,0 kgf.cm^{-2} (1,9 atm). Uma das aplicações da microfiltração é no pré-tratamento utilizado no processo de OI (SILVEIRA, 1999).

Ultrafiltração

A UF é um processo de separação por membranas utilizada quando se deseja purificar e fracionar soluções contendo macromoléculas. As membranas de UF apresentam poros na faixa de 3,0 a 50,0 nm. Soluções contendo solutos de peso molecular 10^3 a 10^6 Daltons¹ podem ser tratadas por este processo. Como os poros das membranas de UF são menores, então a diferença de pressão varia na faixa de 2,0 a 10,0 kgf.cm⁻² (1,9 a 9,7 atm). A UF tem uma relação muito grande com a osmose inversa, pois ambas necessitam de agitação na interface fluido/membrana, limitando a polarização do concentrado. A UF é largamente utilizada na indústria de alimentos, bebidas e laticínios, assim como em aplicações na biotecnologia e na área médica (HABERT *et al*, 1997).

Nanofiltração

A NF compreende um processo de membranas, no qual as partículas rejeitadas situam-se na faixa de 20 a 1000 Daltons. Este processo atua no setor entre a UF e a OI. Todas as moléculas orgânicas com elevado peso molecular são rejeitadas. Os sais dissolvidos constituídos por ânions monovalentes têm taxas de rejeição de 30 a 85%, muito inferiores aos das membranas de OI, tanto que a NF não é considerada uma tecnologia de dessalinização (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001). A NF é empregada para: redução de dureza, remoção de cor, purificação de enzimas entre outros (FRANÇA, 2004).

Osmose Inversa

O processo de OI é um modo avançado de filtração e seu propósito é remover partículas muito minuciosas de moléculas, íons, e sólidos dissolvidos (SINCERO and SINCERO, 2003).

A OI é um processo de separação com membranas em que um solvente é separado de um soluto de baixo peso molecular, tais como sais inorgânicos ou pequenas moléculas orgânicas como glicose, por uma membrana permeável ao solvente e impermeável ao soluto. O solvente é a água, onde suas moléculas

¹ Dalton, medida de peso molecular e corresponde ao peso de um átomo de hidrogênio.

passam livremente através da superfície da membrana, criando uma corrente de água purificada. A parcela restante da água de alimentação que não atravessa a membrana, conhecida como concentrado ou rejeito leva consigo os compostos rejeitados pela mesma. As rejeições típicas de sais dissolvidos atingem a marca de 95 a 99% (DOW LATIN QUÍMICA, 1996).

A diferença entre OI e UF está no tamanho do soluto retido. Por este motivo as membranas de OI devem ser mais fechadas apresentando, portanto, uma maior resistência à permeação. Por este motivo pressão mais elevadas do que as utilizadas em UF são necessárias nos processos de OI.

Eletrodiálise

A ED é uma tecnologia de separação por membrana que leva em conta a troca de íons eletricamente conduzida da qual é capaz de separar, concentrar e purificar íons selecionados de misturas aquosas (BUROS, 1990).

2.2.2. Principais aplicações de processos de separação com membranas

Os processos de separação por membranas têm sido utilizados nos mais diferentes setores de atividade, como na indústria química, na área médica, passando pela biotecnologia, indústria alimentícia e farmacêutica e também tratamentos de águas industriais e municipais. Na Tabela 2.4 são apresentados exemplos de aplicação de processos com membranas em algumas das áreas acima mencionadas (HABERT *et al*, 1997).

Tabela 2.4 - Exemplos de Aplicação de Processos com Membranas.

ÁREA	APLICAÇÕES
QUÍMICA	<ul style="list-style-type: none"> • Quebra do azeótropo benzeno/hexano • Recuperação de H₂ - Síntese da Amônia • Fracionamento CO₂/CH₄ • Fracionamento do ar: obtenção de gás inerte e de corrente

	rica e oxigênio
BIOTECNOLOGIA E FARMACÊUTICA	<ul style="list-style-type: none"> • Separação de substâncias termolábeis • Desidratação de etanol • Purificação de enzimas • Fracionamento de proteínas • Esterilização de meios de fermentação • Bio-reatores a membranas
ALIMENTÍCIA E BEBIDAS	<ul style="list-style-type: none"> • Concentração de leite • Concentração do soro de queijo • Concentração de sucos de fruta • Clarificação de vinhos e cervejas • Desalcoolização de vinhos e cervejas
TRATAMENTO DE ÁGUAS	<ul style="list-style-type: none"> • Dessalinização de águas • Eliminação de traços de orgânicos • Tratamento de esgotos municipais • Desmineralização de águas p/ caldeiras • Água ultrapura p/ indústria eletrônica
TRATAMENTO DE DESPEJOS INDUSTRIAIS	<ul style="list-style-type: none"> • Separação água/óleo • Recuperação de índigo - Têxtil • Recuperação de PVA - Têxtil • Recuperação de íons metálicos - Couro • Recuperação de proteínas - Laticínio • Tratamento de águas - Papel e Celulose
MEDICINA	<ul style="list-style-type: none"> • Rim artificial - Hemodiálise • Pulmão artificial - Oxigenadores • Ar enriquecido em oxigênio • Esterilização de soluções injetáveis • Dosagem controlada de remédios

Fonte: HABERT *et al*, 1997.

2.3. DESSALINIZAÇÃO VIA 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 custos, não só pela maior escala de produção permitida como também pelo crescente conhecimento tecnológico adquirido (SOUSA, 2003).

A osmose é um fenômeno natural de caráter físico-químico, identificado há mais de 200 anos. Nela, quando duas soluções, com diferentes concentrações, são separadas em um mesmo recipiente por uma membrana semi-permeável, ocorre espontaneamente a passagem da solução de menor concentração no sentido da solução menos diluída, até que se estabeleça um equilíbrio. O fluxo ocorre porque a solução menos diluída encontra-se em um estado de maior energia. Neste ponto de equilíbrio, a coluna de solução menos concentrada estará, relativamente, abaixo da coluna do lado da solução mais diluída. A esta diferença de altura entre as colunas das soluções dá-se o nome de pressão osmótica. Por outro lado, a osmose inversa é um processo induzido obtido por intermédio da aplicação mecânica de uma pressão, superior à pressão osmótica do lado da solução mais concentrada, fazendo com que ocorra um fluxo no sentido da solução de menor concentração salina (KERR and MCHALE, 2001).

A osmose inversa é uma operação unitária que através de membranas semipermeáveis e com auxílio de um gradiente de pressão, pode rejeitar sais inorgânicos de baixo peso molecular, como também pequenas moléculas orgânicas (OZAKI and LI, 2002). As moléculas de água, por outro lado, passam livremente através da superfície da membrana, criando uma corrente de água purificada. A parcela restante da água de alimentação que não atravessa a membrana, conhecida como concentrado, ou rejeito, leva consigo os compostos rejeitados pela mesma (OLIVEIRA, 2002).

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.

Quando uma solução de um determinado soluto é separada do solvente puro ou de uma solução de menor concentração, através de uma membrana semi permeável (membrana permeável ao solvente e impermeável ao soluto), haverá um fluxo de solvente no sentido solvente puro → solução ou solução diluída → solução concentrada (ver Figura 2.6a). Isso ocorre porque a presença do soluto ocasiona uma queda no potencial químico do solvente na solução, provocando um gradiente de potencial químico entre os dois lados da membrana.

O fluxo de solvente continua neste mesmo sentido até que o equilíbrio seja estabelecido. Em se tratando de solvente puro, este equilíbrio jamais pode ser atingido por igualdade de concentração uma vez que a membrana é considerada impermeável ao soluto. Em qualquer caso, no entanto, à medida que o solvente passa para a solução aumenta a pressão na membrana, no lado da solução. Como o potencial químico também é função da pressão (aumenta com o aumento da pressão), pode-se chegar a uma situação onde a queda do potencial químico do solvente, devido à presença do soluto é equivalente ao aumento de potencial químico devido ao aumento de pressão do sistema. Nesta situação não haverá mais força motriz para o transporte preferencial do solvente no sentido solvente puro → solução ou solução diluída → solução concentrada. Diz-se, então, que o equilíbrio osmótico foi atingido e, a diferença de pressão entre os dois lados da membrana, necessária para tanto, é definida como sendo a diferença de pressão osmótica, $\Delta\pi$, (ver Figura 2.6b), entre as duas soluções. Caso haja solvente puro em um dos lados da membrana a diferença de pressão representará a pressão osmótica da solução.

Ao se aplicar pelo lado da solução mais concentrada uma diferença de pressão entre as duas soluções, $\Delta P > \Delta\pi$, o potencial químico do solvente na solução concentrada será maior do que o potencial químico do solvente puro ou do solvente na solução mais diluída. A conseqüência é uma inversão no sentido do fluxo osmótico, ou seja, o solvente escoar do lado da solução concentrada para o lado do solvente puro (ver Figura 2.6c) (MOTTA).

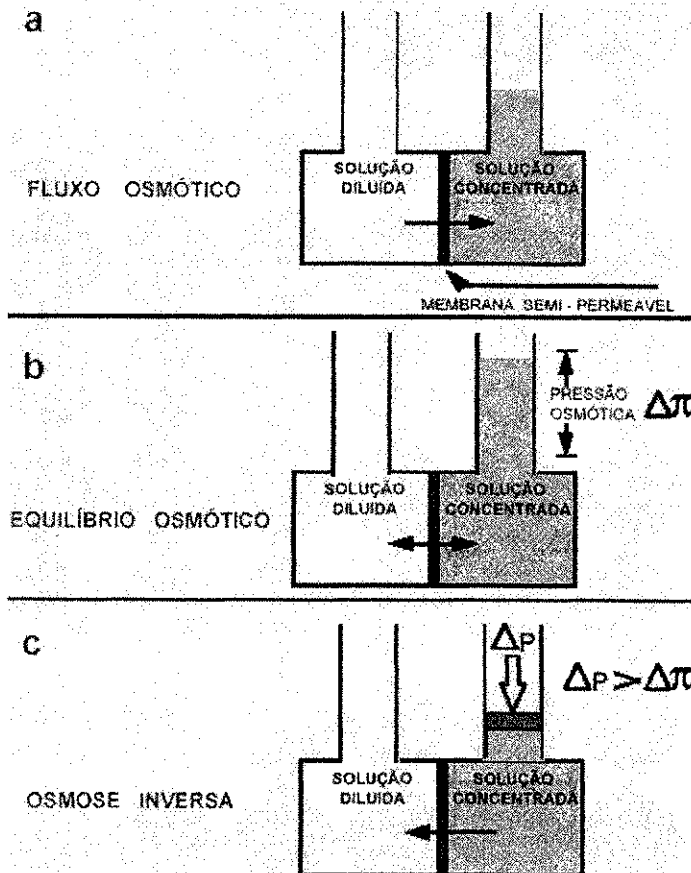


Figura 2.6 – Processo de osmose e osmose inversa.

Fonte: MOTTA

Dentro das vantagens da utilização da OI podemos citar: seletividade, separação de termolábeis, baixo custo de produção de água, baixo consumo de energia comparado a processos de destilação.

A desvantagem da OI é a sensibilidade das membranas a incrustações através de sólidos suspensos, CaCO_3 , CaSO_4 e BaSO_4 e a sua degradação através de compostos oxidantes como o cloro ou óxido de cloro (BRUGGEN and VANDECASTEELE, 2002).

2.4. OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

A operação e manutenção são as chaves do sucesso do desempenho de um sistema de 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.

Têm-se observado 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 sistema de pré-tratamento adequado, as membranas passam sob um programa de limpeza química com mais frequência. E quando não são limpas, as impurezas tendem a se depositar na superfície das membranas causando uma gradual diminuição do fluxo e da rejeição de sais e muitas das vezes uma degradação do material da membrana, tornando assim um processo de recuperação irreversível.

A técnica mais plausível é identificar a causa da incrustação e determinar um pré-tratamento adequado para evitar sucessivas limpezas químicas. 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. As membranas devem ser limpas, sempre que qualquer parâmetro operacional se alterar de 10 a 15% em relação às condições originais do projeto (FRANÇA, 2005).

2.5. PRÉ-TRATAMENTO DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO

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 é a primeira etapa para o controle de incrustações nas membranas (TAYLOR and JACOBS, 1996). O pré-tratamento adequado será feito em função da água de alimentação, da sua composição físico-química e do projeto do processo. Tem por finalidade maximizar a eficiência e a vida útil das membranas, através da minimização de *scaling*, ou seja, do depósito de substâncias inorgânicas ou óxidos que se precipitam na superfície da membrana e reduzem a produção do permeado, além de, ocasionalmente, interferirem na qualidade da água produzida; e o *fouling*, ou seja, materiais acumulados na superfície da

membrana, tais como partículas em suspensão, ferro ou outros metais pesados, material orgânico, bactérias e outras espécies biológicas. Uma membrana de OI 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 biofilmes e baixa disponibilidade de compostos orgânicos utilizados por estes microorganismos. Estas águas podem ser bombeadas para o sistema de OI 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 µm (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

Os fabricantes de membranas, projetistas e montadores de sistemas de dessalinização e/ou engenheiros consultores devem consultar sobre o pré-tratamento requerido para uma água específica de alimentação, tipo de membrana e configuração (FRANÇA, 2004). A Tabela 2.5 apresenta os compostos que contribuem na formação de incrustações na superfície de membranas.

Tabela 2.5 – Compostos que oferecem risco para a formação de precipitados na superfície de OI e NF.

Composto	Tipo de precipitado	Comentário	Controle
Cálcio	Carbonatos, fluoretos, sulfatos e hidróxidos.	Principal fator limitante do rendimento de sistema de OI, junto com sílica.	Remoção por pré-tratamento ou controle através de inibidores de cristalização.
Magnésio	Silicatos, carbonatos e hidróxidos.		
Estrôncio	Carbonatos, sulfatos.		
Bário	Carbonatos, sulfatos.		
Alumínio	Hidróxidos.		

Manganês	Hidróxidos e óxidos.		
Ferro	Hidróxidos e óxidos.		
Sílica	SiO ₂ supersaturado polimeriza e pode formar um gel na superfície da membrana. SiO ₂ polimerizado na solução pode formar colóides.	Concentração máxima permissível: 150 ppm. Junto com cálcio, um dos principais fatores que limitam o rendimento de sistema de OI.	Remoção por pré-tratamento. A remoção de precipitados de sílica é difícil e depende do emprego de produtos altamente tóxicos.
Bicarbonato	Carbonatos.	Pode ser convertido em carbonatos se o pH subir muito durante o processo.	Controle do pH para evitar formação de carbonatos.
Carbonato	Sais insolúveis com metais.		Controle do pH.
Hidróxido	Sais insolúveis com metais.		
Fosfato	Sais insolúveis com metais.		Remoção de cátions por pré-tratamento.
Sulfato	Sais insolúveis com metais.		
Gás sulfídrico	Grânulos de enxofre.	Pode ser convertido em enxofre em muitos sistemas aquáticos.	Oxidação na etapa de pré-tratamento.

Fonte: SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001.

No pré-tratamento, há dois parâmetros que devem ser medidos, monitorados ou controlados, porque eles influenciam diretamente no desempenho da OI. Um parâmetro é o potencial de incrustação de cálcio, que envolve cálculos que determinam o grau de saturação do carbonato de cálcio através do Índice de

Saturação de Langelier (ISL). O segundo parâmetro é o Índice de Densidade de Sedimento (IDS), que envolve também, caracterizar o potencial de incrustação da água de alimentação (MINDLER and EPSTEIN, 1986; ISAIAS, 2001).

2.5.1. Indicadores de Incrustações

A tendência da água de alimentação de bloquear membranas é um dos parâmetros de projeto mais importante em sistemas de membrana. Essa tendência pode ser avaliada em testes específicos de determinação de índices de *fouling* (incrustações) (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001). Os índices mais utilizados são o IDS (Índice de Densidade de Sedimentos) e o ISL (Índice de Saturação de Langelier).

O Índice de Densidade de Sedimentos é um parâmetro largamente utilizado em projetos de sistema de dessalinização que mostra a qualidade da água que será dessalinizada. Através do valor do IDS pode-se escolher, ditado pela prática, o tipo de membrana e/ou qualificar as condições do pré-tratamento atribuído à água bruta (SOUZA, 2003).

O IDS é calculado a partir de três intervalos de tempo: o primeiro intervalo (t_i) é o tempo, em minutos, necessário para a coleta dos primeiros 500 mL da amostra da água de alimentação, o segundo intervalo (t_f) é o tempo, em minutos, necessário para a coleta dos últimos 500 mL da amostra. 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 500 mL e o início da coleta dos segundos 500 mL. O tempo padrão para o t_t é 15 minutos. O IDS é determinado através da Equação (2.1) (TAYLOR and JACOBS, 1996).

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

O equipamento básico, como mostra a Figura 2.7 consiste de um sistema de filtração pressurizada equipado com filtros de 0,45 μm e diâmetro de 47 mm. A amostra deve ser filtrada a uma pressão de 2,00 kgf.cm^{-2} (TAYLOR and JACOBS, 1996).

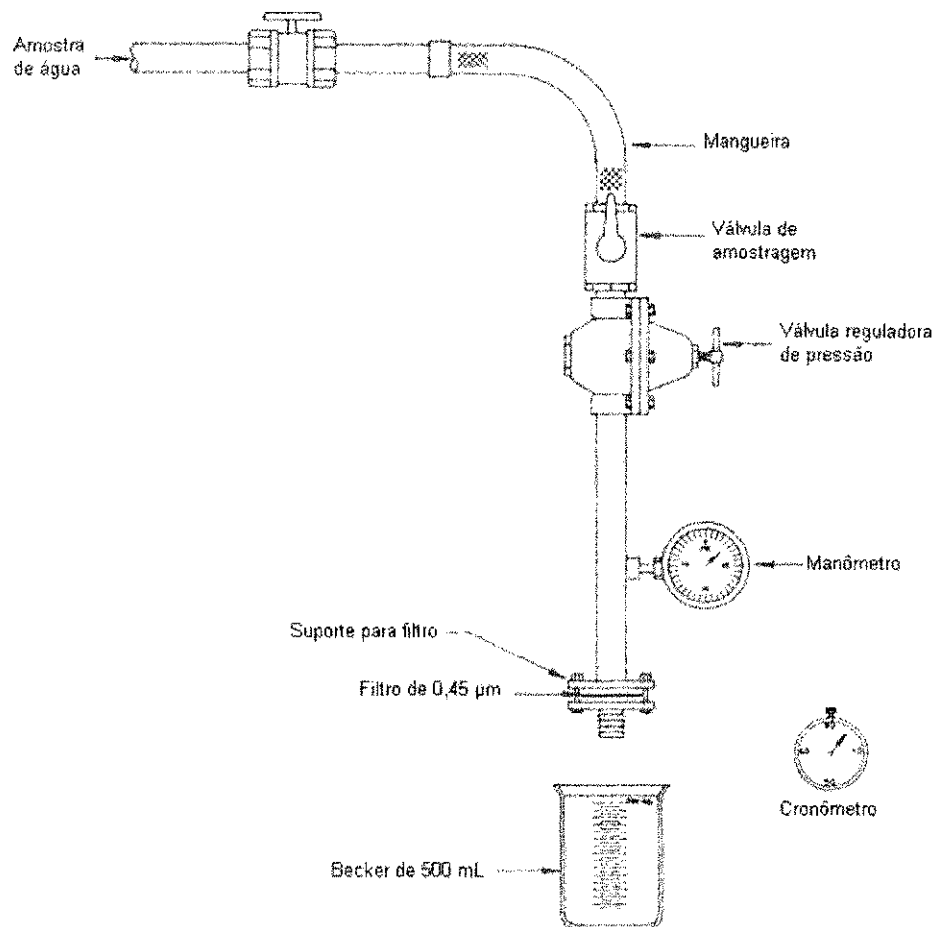


Figura 2.7 – Equipamento básico para medição do IDS.

Fonte: AMJAD, 1993

Em geral, os sistemas de OI que operam com fontes de água de alimentação com valores de IDS menores que 1,0 se encontram funcionando há anos sem problemas, aqueles que operam com fontes que tem valores de IDS menores que 3 funcionam por meses sem necessidade da 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, 1993).

O Índice de Saturação de Langelier é usado para avaliar o risco de formação de precipitados de carbonato de cálcio em águas salobras com sólidos totais dissolvidos (STD) até 10.000 mg.L⁻¹. Langelier desenvolveu um método a partir do pH, no qual o pH da água se encontra saturada com CaCO₃, chamado pH_s. O ISL é definido pela diferença entre o pH e o pH_s, de acordo com a Equação (2.2) (SINCERO and SINCERO, 2003).

$$ISL = pH - pH_s \quad (2.2)$$

Para determinar o ISL é necessário saber a alcalinidade (mg.L⁻¹ como CaCO₃), a dureza em cálcio (mg.L⁻¹ Ca⁺² como CaCO₃), STD e a temperatura da água (°C). Com estes dados e com as Equações (2.2 a 2.7) (MINDLER and EPSTEIN, 1986; NING and NETWIG, 2002) podemos obter o valor de ISL.

$$pH_s = (9,3 + A + B) - (C + D) \quad (2.3)$$

Onde:

$$A = \frac{(\text{Log}[STD] - 1)}{10} \quad (2.4)$$

$$B = -13,12 \times \text{Log}(^{\circ}C + 273) + 34,55 \quad (2.5)$$

$$C = \text{Log}(Ca^{+2} \text{ como } CaCO_3) - 0,4 \quad (2.6)$$

$$D = \text{Log}(\text{Alcalinidade} \text{ _ como } CaCO_3) \quad (2.7)$$

Neste caso, *A* é um fator que depende da concentração total de sólidos dissolvidos, *B* depende da temperatura, o fator *C* depende da concentração de cálcio, e *D* é um fator que depende da alcalinidade (MINDLER and EPSTEIN, 1986).

Se o pH da água estiver abaixo do pH_s, o ISL será negativo, isso implica que a água possui um potencial muito limitado de incrustação. Se o pH exceder o

pH_s, o ISL será positivo, o que indica uma água supersaturada com CaCO₃ e com tendência de formação de incrustação, através da precipitação do CaCO₃, logo algum método de controle de incrustação deve ser adotado, como por exemplo, a dosagem de anti-incrustante deve ser utilizada, se esta medida já estiver sendo adotada deve-se fazer um ajuste na dosagem de anti-incrustante (FILMTEC, 1995). O ISL igual a zero indica que não haverá precipitação nem dissolução do CaCO₃.

2.6. PÓS-TRATAMENTO

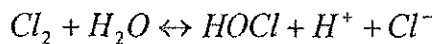
O processo utilizando membranas remove essencialmente todos os microorganismos, dentre eles os patogênicos e a maioria dos sais e outros solutos presentes na água de alimentação. Porém, todos os gases dissolvidos, incluindo dióxido de carbono e hidrogênio sulfídrico passam através da membrana. Com a finalidade de remover esses gases do permeado, o processo de osmose inversa necessita de algum tipo de pós-tratamento antes de ser utilizado para o consumo humano (TAYLOR and JACOBS, 1996).

O pós-tratamento é aplicado em função do uso final da água. Em uma aplicação industrial, consiste na desmineralização com resinas trocadoras de íons e desinfecção via radiação ultravioleta. Para uso direto (consumo municipal), poderá haver necessidade de ajuste do pH, degaseificação, para remover o dióxido de carbono (CO₂), por aeração, gerado durante a injeção ácida na água de alimentação para controlar a formação de incrustações (*scaling*) e em algumas situações se faz necessário a desinfecção com cloro e fluoração da água (FRANÇA, 2004).

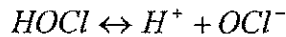
A desinfecção é um tipo de pós-tratamento que tem como objetivo assegurar que a água potável, antes de ser distribuída, esteja completamente isenta de microorganismos patogênicos (SILVEIRA, 1999).

Nas aplicações para as águas de abastecimento, o produto da osmose inversa é geralmente desinfetado por adição de cloro. Em grandes sistemas, o gás cloro (Cl₂) é adicionado à água e em pequenos sistemas, geralmente injetam-se soluções aquosas de hipoclorito de sódio.

O gás cloro é dissolvido em hidrólise com água de acordo com a equação abaixo:



A ação desinfetante e oxidante do cloro é controlada pelo ácido hipocloroso que se dissocia instantaneamente segundo a reação:



A água produzida pelo processo de osmose inversa contém baixos níveis de compostos que reagem com o cloro, tais como Fe^{2+} , Mn^{2+} e orgânicos. Desta maneira a quantidade de cloro necessária para desinfecção pode ser menor comparado com que é requerida para a desinfecção da água do poço. Além disso, as baixas concentrações de orgânicos minimizam ou eliminam a formação de triclorometanos e outros compostos orgânicos clorados. Com a própria cloração, doenças de veiculação hídrica, tais como febre tifóide e a cólera, serão prevenidas. Para uma desinfecção eficiente, o cloro e a água devem ser misturados e depois de um tempo de contato de aproximadamente 30 minutos, deverá estar presente uma concentração de cloro residual. A desinfecção do permeado (água potável) produzido por osmose inversa é geralmente concluída com um nível de cloro residual em 0,5 - 1,0 mg.L^{-1} . Frequentemente deve ser realizada a medição de cloro residual, embora somente a análise bacteriológica possa determinar a eficiência da desinfecção por cloro (ALMEIDA, 2003).

Já com o rejeito, é necessário que o mesmo tenha um destino final adequado para que não agrida o meio ambiente. As formas mais comuns de aproveitamento do rejeito são: criação de tilápias rosas; criação de plantas que suportem alta salinidade no solo (plantas halófitas), a exemplo da *Atriplex*; injeção em poços profundos; lagos de evaporação; despejos diretos para águas superficiais; uso de destiladores solares (HASNAIN and ALAJLAN, 1998).

2.7. LIMPEZA QUÍMICA DAS MEMBRANAS

Um dos problemas no uso da OI é a presença de certas substâncias na água de alimentação do processo que, sem a devida atenção, podem diminuir a produtividade, diminuindo o fluxo da água produzida, ou tornar o produto mais

concentrado em sais, até torná-la imprópria para consumo. A pressão de operação tende também a aumentar gradativamente, para superar a diminuição de área útil de permeação da membrana. Por isso, os fabricantes de membranas disponibilizam produtos químicos para limpar as membranas periodicamente, os quais promovem a dissolução dos incrustantes na superfície da membrana (ALMEIDA, 2003).

O pré-tratamento em um sistema de membranas não é tudo. Um programa de limpeza química integraliza a operação do sistema. As impurezas (*fouling*) ocorrem lentamente, tornando-as imperceptível ao desempenho do sistema. O fato de vários tipos de minúsculas incrustações se depositarem em função do tempo leva a uma degradação e uma diminuição do desempenho da membrana. Eventualmente, a remoção destas impurezas se torna irreversível levando a substituição dos elementos de membrana.

Os problemas de incrustação podem surgir em função de vários tipos de problemas, mecânicos ou químicos. Quando uma membrana diminui seu desempenho, é importante procurar identificar a origem da causa do problema, antes de tomar qualquer iniciativa precipitada.

As técnicas mecânicas de remoção de impurezas de membranas se resumem em vários tipos de ações como; *flushing* com alta velocidade, limpeza com esponja (depende do tipo de membrana), jato de ar, etc. Um sistema de membrana pode operar a constante pressão com declínio no fluxo ou vice-versa. A técnica do *flushing* com alta velocidade ajuda parcialmente manter o sistema sob as condições pré-estabelecidas. Quando isso não funciona ao contento, tem-se que partir para remoção química, a qual se usa reagente químico com uma combinação mecânica. Existe um grande número de reagentes químicos disponíveis no mercado para remover incrustações.

Os tipos de produtos químicos que podem ser utilizados para limpeza de depósitos de membranas dependem da natureza da membrana, sua resistência ao estresse e a composição do material depositado na superfície da membrana (FRANÇA, 2004).

Os produtos mais comuns utilizados são os seguintes (FRANÇA, 2004):

- ✓ Ácido forte (clorídrico, sulfúrico, fosfórico) e ácidos orgânicos complexantes (cítrico, oxálico, glucônico), são usados para dissolver óxidos metálicos e hidróxidos (ferro, manganês, alumínio) e carbonatos;
- ✓ Hidróxido de sódio a temperatura ambiente ou aquecido é utilizado para remover matéria orgânica;
- ✓ Oxidantes (hipoclorito de sódio, peróxido de hidrogênio, ácido peracético) são usados para oxidar macromoléculas orgânicas;
- ✓ Sufactantes e detergentes, normalmente são combinados com quelões (como por exemplo: ácido etilenodiaminotetracético), são usados para baixar a tensão superficial com objetivo de formar complexo de metais;
- ✓ Bisulfito de sódio é usado para conservar as membranas contra a formação de bactérias.

As membranas se incrustam em função da qualidade da água de alimentação e com o tempo de uso. O sistema de limpeza química deve ser composto das seguintes unidades (FRANÇA, 2004):

- ✓ Um tanque (não metálico) composto de um agitador mecânico e sistema de temperatura controlada para aquecimento da solução de limpeza;
- ✓ Uma bomba centrífuga de carcaça não metálica;
- ✓ Um rotâmetro;
- ✓ Um manômetro;
- ✓ Um filtro de acetato de celulose de 5 μm (ou similar);
- ✓ Um condutivímetro (de preferência com escala em mg.L^{-1});
- ✓ Um pHmetro;
- ✓ Um termômetro.

Os instrumentos de medidas como condutivímetro e pHmetro são fundamentais e devem ser calibrados para evitar problemas durante a limpeza química. A Figura 2.8 apresenta um esquema típico de um sistema de limpeza química.

Não existe um procedimento único para limpeza química. A forma como realizá-la vai depender das condições que se encontra o sistema de dessalinização em termos conservação, qualidade da água de alimentação, o

tempo que se encontra funcionando, parado ou quebrado, o tipo de pré-tratamento, etc.

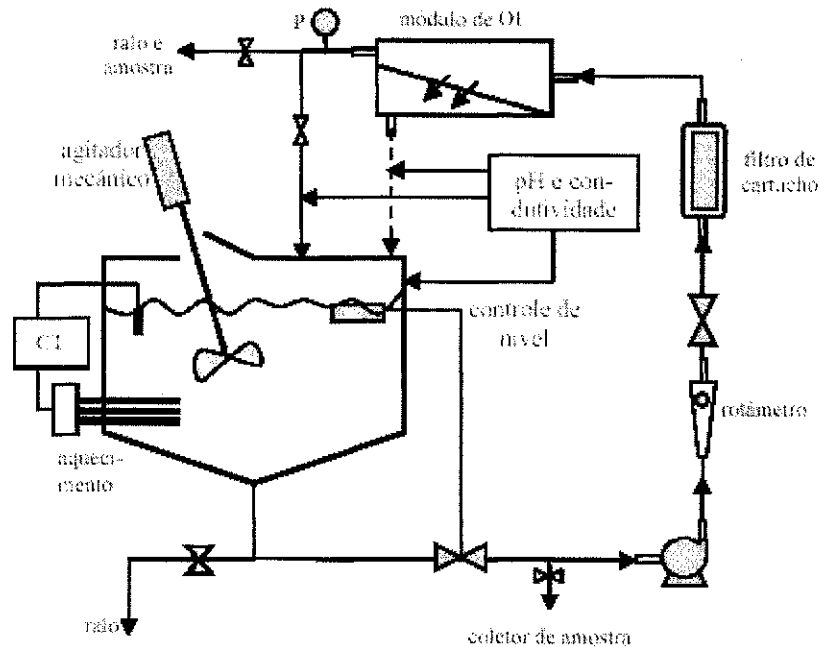


Figura 2.8 – Esquema típico de um sistema de limpeza química.

Fonte: FRANÇA, 2004

Um prévio conhecimento, através de um diagnóstico completo, incluindo as análises físico-químicas da água de alimentação, permeado e concentrado, do sistema seria muito importante para o grupo responsável pela limpeza química. Com o auxílio do diagnóstico a equipe técnica de manutenção pode determinar a escolha dos materiais e facilidades que devem se encontrar disponíveis durante a limpeza química (FRANÇA, 2004).

2.8. PRINCIPAIS PARÂMETROS DO PROCESSO DE OSMOSE INVERSA

2.8.1. Pressão Osmótica

A pressão osmótica, π , que uma solução iônica exerce depende da concentração do soluto, da temperatura absoluta da solução e das espécies de

íons presentes. Quanto maior for a concentração da solução, maior será o valor da pressão osmótica dessa solução (BRANDT *et al*, 1993). A pressão osmótica é dada pela Equação (2.8) (AMJAD, 1993), conhecida como Equação de Van't Hoff.

$$\pi = \sum v_i C_i RT \quad (2.8)$$

Onde:

π – pressão osmótica da solução (kgf.cm⁻²);

v_i – carga elétrica do íon;

C_i – concentração molar (mol.L⁻¹);

R – constante universal dos gases (kgf.L.cm⁻².mol⁻¹.K⁻¹);

T – temperatura absoluta da solução (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. Para propósitos, a Equação de Van't Hoff pode ser usada para água salobra (AMJAD, 1993).

No processo de osmose inversa tem-se que aplicar uma pressão superior à pressão osmótica na membrana para que haja produção de permeado. A pressão osmótica é função da concentração de sais e do tipo das moléculas orgânicas contidas na água de alimentação.

2.8.2. Fluxo do Permeado e do Concentrado

Na osmose inversa os sais dissolvidos retidos na superfície da membrana causam o aumento da concentração próxima à superfície considerada. Este aumento de concentração causa um aumento no valor da diferença de pressão osmótica da solução, o que tende a diminuir o fluxo de permeado.

O fluxo do permeado através de uma membrana de osmose inversa é proporcional à diferença de pressão hidráulica e osmótica e inversamente

proporcional à área da membrana, e é representado pela Equação (2.9) (TAYLOR and JACOBS, 1996).

$$J_w = K_w (\Delta P - \Delta \pi) = \frac{Q_p}{A} \quad (2.9)$$

Onde:

J_w – fluxo do permeado ($L.m^{-2}.h^{-1}$);

K_w – coeficiente de transferência de massa do solvente ($L.kgf^{-1}.h^{-1}$);

ΔP – gradiente de pressão hidráulica ($kgf.cm^{-2}$);

$\Delta \pi$ – gradiente de pressão osmótica ($kgf.cm^{-2}$);

Q_p – vazão do permeado ($L.h^{-1}$);

A – área de permeação da membrana (m^2).

O transporte de sais através da membrana é proporcional a concentração ou diferença de potencial químico, depende da diferença de concentração e independe da pressão aplicada ao sistema. O fluxo do concentrado é representado pela Equação (2.10) (TAYLOR and JACOBS, 1996).

$$J_i = K_i \Delta C = \frac{Q_p C_p}{A} \quad (2.10)$$

Onde:

J_i - fluxo mássico do soluto ($mg.m^{-2}.h^{-1}$);

K_i - coeficiente de transferência de massa do soluto ($L.m^{-2}.h^{-1}$);

ΔC – gradiente de concentração ($mg.L^{-1}$);

Q_p – vazão do permeado ($L.h^{-1}$);

C_p – concentração do permeado ($mg.L^{-1}$);

A – área de permeação da membrana (m^2).

ΔP , $\Delta \pi$ e ΔC são dados por:

$$\Delta P = \left[\frac{(P_a + P_c)}{2} - P_p \right] \quad (2.11)$$

$$\Delta \pi = \left[\frac{(\pi_a + \pi_c)}{2} - \pi_p \right] \quad (2.12)$$

$$\Delta C = \left[\frac{(C_a + C_c)}{2} - C_p \right] \quad (2.13)$$

Onde:

P_a , P_c e P_p são as pressões de alimentação, concentrado e permeado, respectivamente;

π_a , π_c e π_p são as pressões osmóticas de alimentação, concentrado e permeado, respectivamente;

C_a , C_c e C_p são as concentrações de alimentação, concentrado e permeado, respectivamente (TAYLOR and JACOBS, 1996).

O gradiente de pressão osmótica pode ser dado ainda pela Equação (2.14).

$$\Delta \pi = \left[\left(\frac{TDS_a + TDS_c}{2} \right) - TDS_p \right] \times 7,033 \times 10^{-4} \quad (2.14)$$

Onde:

TDS_a , TDS_c e TDS_p são o total de sais dissolvidos na corrente de alimentação, concentrado e permeado, respectivamente (MALLEVIALLE *et al*, 1996).

O TDS é dado em mg.L^{-1} e $\Delta \pi$ é dado em kgf.cm^{-2} . O fator de conversão $7,033 \times 10^{-4}$ converte a pressão para kgf.cm^{-2} .

2.8.3. Taxa de Rejeição de Sais

A taxa de rejeição de sais (TRS) refere-se à capacidade da membrana de rejeitar sais dissolvidos durante a permeação da água, e é calculada de acordo com a Equação (2.15) (CHEN *et al*, 1997; TOMASZEWSKA *et al*, 2005).

$$TRS(\%) = \frac{C_a - C_p}{C_a} \times 100 = \left(1 - \frac{C_p}{C_a}\right) \times 100 \quad (2.15)$$

Onde:

TRS (%) - taxa de rejeição de sais;

C_a - concentração de alimentação (mg.L^{-1});

C_p - concentração do permeado (mg.L^{-1}).

A TRS indica a efetividade de remoção de sais e outras espécies químicas pela membrana, possuindo valores que variam de 90 a 99,8% para a maioria dos íons existentes na água (DOW LATIN QUÍMICA, 1996).

A eficácia de processos de separação é geralmente medida pela taxa de rejeição de sais.

Uma grande variedade de fatores influencia a rejeição de solutos por membranas: dimensões do soluto, morfologia dos componentes retidos pela membrana, tamanho dos poros da membrana, propriedades químicas da solução a ser filtrada e fatores hidrodinâmicos, que determinam a tensão de arraste e as forças de cisalhamento na superfície da membrana (LIRA, 2004).

2.8.4. Taxa de Passagem de Sais

A taxa de passagem de sais (TPS) é oposta a taxa de rejeição de sais (TRS), e corresponde a porcentagem de sal na água de alimentação que

atravessa a membrana, ela é calculada de acordo com a Equação (2.16) (AMJAD, 1993; BRANDT *et al*, 1993).

$$TPS(\%) = \left(\frac{C_p}{C_a} \right) \times 100 \quad (2.16)$$

Onde:

TPS (%) - taxa de passagem de sais;

C_p - concentração do permeado (mg.L^{-1});

C_a - concentração de alimentação (mg.L^{-1}).

2.8.5. Recuperação do Sistema

A recuperação do sistema refere-se a razão da água de alimentação convertida em água purificada ou permeada e depende de vários fatores, como a formação de incrustação na superfície das membranas, a pressão osmótica e a qualidade da água de alimentação do sistema.

A recuperação do sistema pode ser definida de acordo com a Equação (2.17) (TAYLOR and JACOBS, 1996).

$$r(\%) = \frac{Q_p}{Q_a} \times 100 = \frac{Q_p}{Q_p + Q_c} \times 100 \quad (2.17)$$

Onde:

r (%) - recuperação do sistema;

Q_p - vazão do permeado ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$);

Q_a - vazão de alimentação ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$);

Q_c - vazão do concentrado ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$).

A recuperação máxima em qualquer instalação de OI, depende dos sais presentes na água de alimentação e de sua tendência a se precipitar na superfície da membrana (LIRA, 2004). O aumento do nível de recuperação do sistema faz com que mais água seja convertida em produto. Isto reduz o volume da água a ser rejeitada e, conseqüentemente, aumenta o valor de sais dissolvidos na corrente do concentrado, assim como a possibilidade de sua precipitação na superfície da membrana (OLIVEIRA, 2002).

2.8.6. Concentração de Sais Dissolvidos

A concentração de sais dissolvidos na corrente do concentrado é matematicamente estimada, baseando-se nos resultados analíticos obtidos das águas de alimentação, através da Equação (2.18) (EL-MANHARAWY and HAFEZ, 2001).

$$C_c = \frac{C_a}{1-r} \quad (2.18)$$

Onde:

C_c - concentração de sais dissolvidos na corrente do concentrado (mg.L^{-1});
 C_a - concentração de sais dissolvidos na corrente de alimentação (mg.L^{-1});
 r - nível de recuperação do sistema (%).

O fator de concentração (FC) é dado pela Equação (2.19) (BRADLEY, 1993).

$$FC = \frac{1}{1-r} \quad (2.19)$$

A Equação (2.18) simplesmente indica que a concentração de um soluto no fluxo de alimentação dobrará, se a planta de membrana for operada a uma

recuperação de 50 %, a Equação (2.19) é válida desde que seja assumido 100 % de rejeição (quando $C_P = 0$), contudo alguns íons atravessarão o fluxo de produto (TAYLOR and JACOBS, 1996; EL-MANHARAWY and HAFEZ, 2001).

2.9. BALANÇO DE MASSA PARA OS SISTEMAS DE OSMOSE INVERSA

De acordo com Himmelblau, 1984, para exemplificar o fluxo de massa para dentro e para fora de um volume de controle, a lei geral de conservação (a massa não é criada ou destruída) é expressa na forma de um balanço, aplicável a processos com ou sem reação química, geração, consumo ou acúmulo de massa dentro da região de controle, ou seja:

$$\text{acúmulo} = \text{entrada} - \text{saída} + \text{geração} - \text{consumo} \quad (2.20)$$

Nos sistemas estudados no presente trabalho não ocorre acúmulo nem geração.

2.9.1. Sistema de Dessalinização do Sítio Amorim

O Sistema 1 é constituído por dois permeadores em série de acordo com a Figura 2.9.

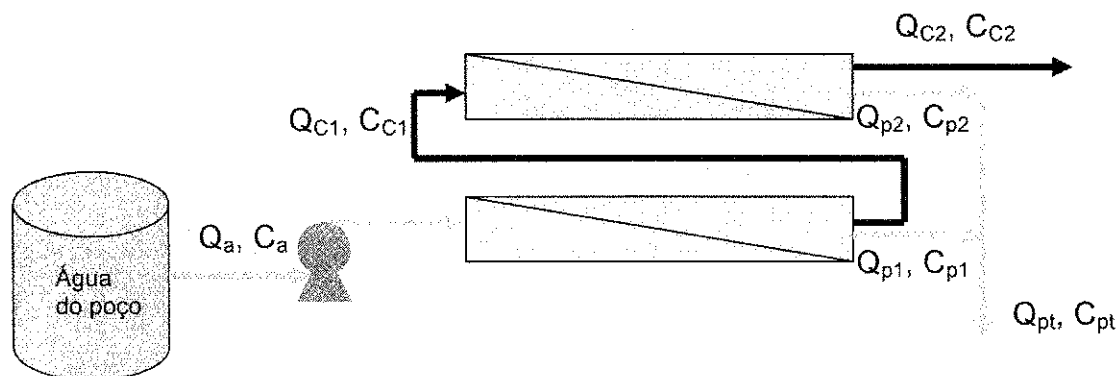


Figura 2.9 – Sistema 1 constituído por dois permeadores em série.

O balanço de massa para o Sistema 1 é dado por:

$$Q_a C_a = Q_{p1} C_{p1} + Q_{c1} C_{c1} \quad (2.21)$$

Onde:

$$Q_{p1} = Q_{p1} + Q_{p2} \quad (2.22)$$

$$Q_{c1} = Q_{c2} \quad (2.23)$$

O balanço parcial para o primeiro permeador é dado por:

$$Q_a C_a = Q_{p1} C_{p1} + Q_{c1} C_{c1} \quad (2.24)$$

O balanço parcial para o segundo permeador é dado por:

$$Q_{c1} C_{c1} = Q_{p2} C_{p2} + Q_{c2} C_{c2} \quad (2.25)$$

2.9.2. Sistema de Dessalinização do Sítio Carretão

O Sistema 2 é constituído por um permeador de acordo com a Figura 2.10.

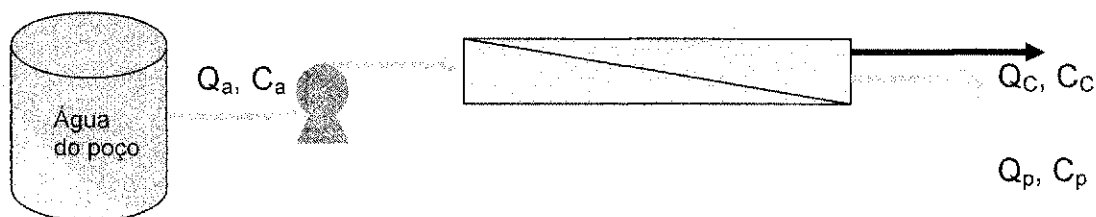


Figura 2.10 - Sistema 2 constituído por um permeador.

O balanço de massa para o Sistema 2 é dado por:

$$Q_a C_a = Q_p C_p + Q_c C_c \quad (2.26)$$

2.10. PROJETO DE SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO

O projeto e a instalação de uma unidade de dessalinização devem ser precedidos de análises detalhadas sobre os objetivos de qualidade de água a serem atingidos. A análise sobre o tipo de unidade de membrana que será utilizada depende principalmente da avaliação detalhada da qualidade de água do manancial e de sua variabilidade ao longo do tempo (FRANÇA, 2005).

As etapas mais importantes no projeto e implantação de uma unidade de dessalinização por membranas, são as seguintes (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001):

- ✓ Definição precisa da qualidade de água almejada, com o estabelecimento de parâmetros e valores;
- ✓ Análise detalhada da qualidade da água de alimentação;
- ✓ Definição do tipo de unidade de membrana filtrante que permitirá atingir os valores de qualidade de água estipulada;
- ✓ Definição do porte da unidade de tratamento;
- ✓ Elaboração de pré-projetos;
- ✓ Avaliação dos projetos propostos e estabelecimento de plantas piloto;
- ✓ Operações das plantas piloto;
- ✓ Seleção da melhor proposta e elaboração do projeto definitivo;
- ✓ Construção e início de operação da planta;
- ✓ Acompanhamento contínuo de desempenho da planta pelos operadores, para otimização de processos e redução de custo operacional.

A determinação quantitativa dos componentes constituintes de uma amostra de água é de grande importância para o projeto e manutenção de um sistema de dessalinização. A água, na maioria dos casos não é encontrada em estado de absoluta pureza, em geral contém várias impurezas que vão desde alguns miligramas por litro na água de chuva a mais de 35.000 mg.L⁻¹ quando se trata da água do mar (FRANÇA, 2005).

2.11. SIMULAÇÃO DE PROCESSOS DE OSMOSE INVERSA

Um sistema de osmose inversa pode ser projetado com exatidão usando um programa de simulação em computador, onde com a ajuda do simulador, resultados exatos podem ser obtidos muito rapidamente, de modo que possa ser usado para modificar e otimizar o projeto do sistema de dessalinização (FILMTEC, 1995).

A simplicidade dos modelos matemáticos que representam os fenômenos de OI observados nos experimentos é um fator que ajuda na simulação, dada a rapidez, eficiência e segurança nos projetos de plantas de OI, que fizeram com que as indústrias fabricantes de membranas (Dow-Filmtec, Hydranautics, Fluid Systems (atual Koch), Osmonics e TriSep) desenvolvessem seus próprios programas de simulação. Esses programas são ferramentas para desenvolver e testar várias configurações de sistemas, podendo estimar a qualidade da água permeada a partir dos parâmetros fornecidos (FILHO, 2000).

Através do uso de um simulador e de posse de alguns dados como análise físico-química, pH e temperatura da água de alimentação, vazão do permeado, recuperação desejada para o sistema, é possível determinar as melhores condições de operação para a planta, através da escolha adequada das membranas, arranjo, área de permeação.

CAPÍTULO III

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este Capítulo apresenta a forma como foi desenvolvido o trabalho de campo nos sistemas de dessalinização do Sítio Amorim situado no distrito rural de Galante (Sistema 1) e do Sítio Carretão (Sistema 2), ambos no Município de Campina Grande – PB, visando monitorar seus desempenhos.

3.1. METODOLOGIA ADOTADA PARA O PROCESSO DE MONITORAMENTO DOS SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO

Considerando que os dois sistemas de dessalinização que foram escolhidos para realização deste trabalho se encontram em funcionamento desde as suas instalações, foi necessário desenvolver a princípio, um diagnóstico técnico, o qual mostrou os estados que se encontram os equipamentos.

A metodologia empregada neste trabalho segue as seguintes etapas:

- ✓ Visita à localidade onde existe um sistema de dessalinização instalado para coletar informações sobre sua produtividade em termos de vazões, pressões, número de pessoas que estão sendo beneficiadas com água dessalinizada, número de horas de operação, etc.

- ✓ Coletar amostras de águas (permeado, concentrado e água bruta) para fins de análises laboratoriais. Dependendo da situação que se encontra o dessalinizador pode-se ou não fazer uma limpeza química das membranas.

- ✓ Em função do diagnóstico, dos resultados das variáveis de medidas e análises físico-químicas os sistemas foram simulados através do *software* do fabricante das membranas para fins de estudar seus desempenhos.

✓ Em função dos dados obtidos no item anterior procurar ajustar o equipamento em campo.

A Figura 3.1 representa o diagrama de blocos do processo de monitoramento e avaliação dos sistemas de dessalinização que serão estudados neste trabalho, processo este que foi descrito anteriormente.

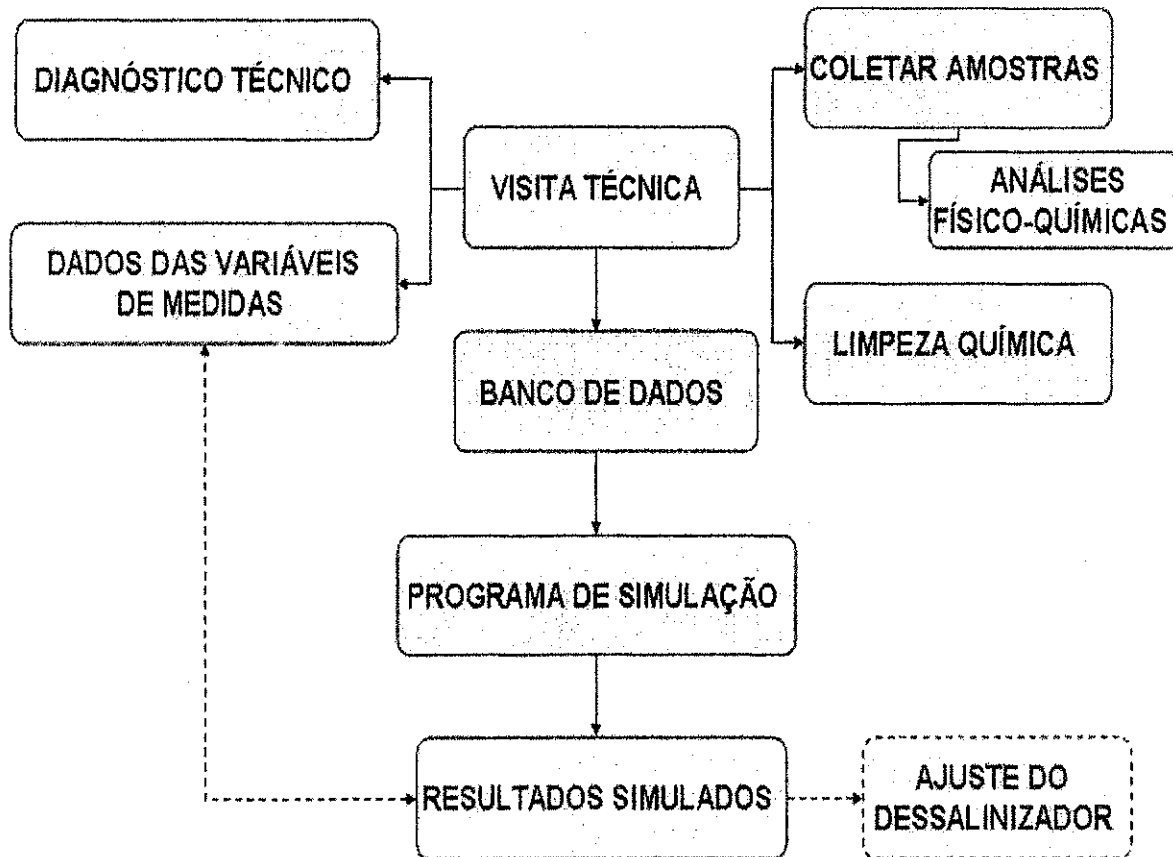


Figura 3.1 – Diagrama de blocos do processo de monitoramento dos sistemas de dessalinização.

3.2. FONTE HÍDRICA

Para o Sistema 1 a água é proveniente de um poço tubular com 18,0 m de profundidade, com uma vazão de $7,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, estando a água com uma concentração média de sólidos totais dissolvidos (STD) de $3.030,0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

Para o Sistema 2 a água é proveniente de um poço tubular com 45,0 m de profundidade, com uma vazão de $1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, estando a água com uma concentração média de STD de $10.063,3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

3.3. SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE INVERSA

Os sistemas de dessalinização escolhidos para esse trabalho foram os mais comuns encontrados no Semi-árido do Nordeste, composto de poço, como fonte hídrica de alimentação do dessalinizador, um tanque de alimentação, um abrigo para o dessalinizador, tanques de concentrado e permeado e um chafariz. A Figura 2.1 do Capítulo II representa o sistema de dessalinização.

As Figuras 3.2 e 3.3 mostram os dessalinizadores do Sítio Amorim (Sistema 1) e do Sítio Carretão (Sistema 2).

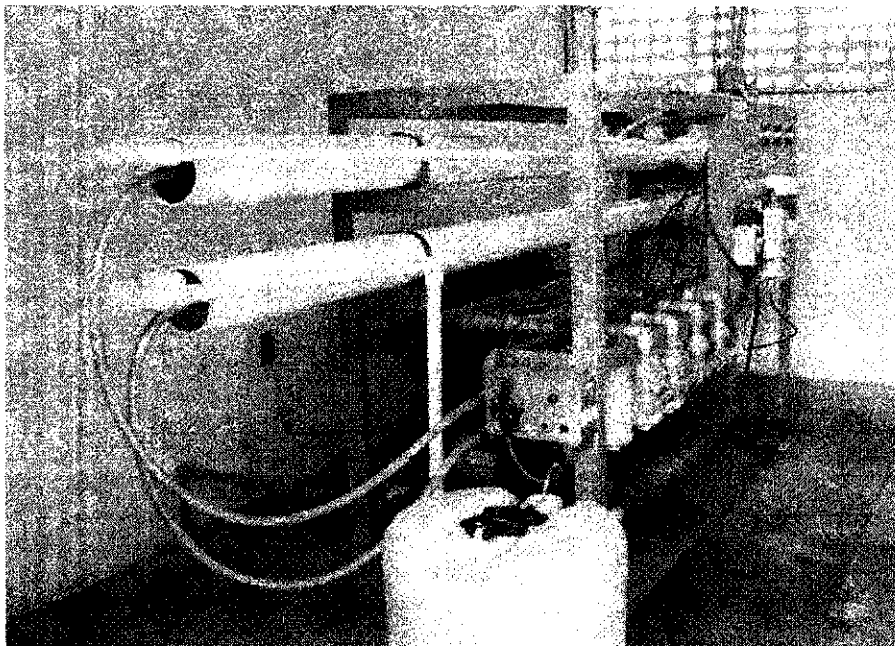


Figura 3.2 – Foto do dessalinizador do Sítio Amorim.

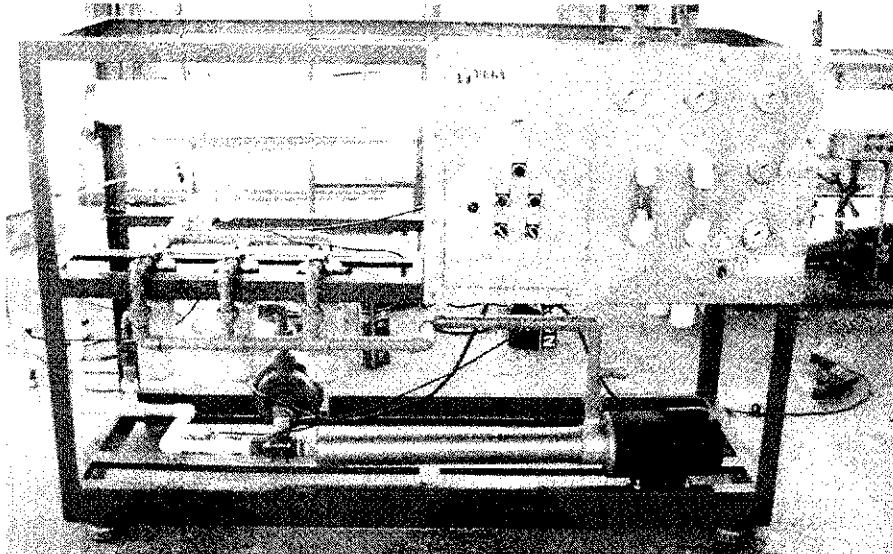


Figura 3.3 - Foto do dessalinizador do Sítio Carretão.

Os dois sistemas utilizam as membranas de osmose inversa do tipo CPA2 - 4040 da *Hydranautics Corporate*, cujas características específicas encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Especificações das membranas de osmose inversa usadas nos Sistemas 1 e 2.

Material	Compósito de poliamida
Tipo	CPA2 - 4040
Configuração	Enrolado em espiral
Pressão máxima aplicada	42,2 kgf.cm ⁻²
Vazão máxima de alimentação	3,6 m ³ .h ⁻¹
Vazão do permeado	8,5 m ³ .d ⁻¹
Temperatura máxima de operação	45 °C
pH	3,0 – 10,0
Área nominal da membrana	7,9 m ²
Rejeição de sais (totais)	99,2%

3.4. DIAGNÓSTICO TÉCNICO DOS SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO

A Tabela 3.2 apresenta o diagnóstico técnico dos Sistemas de dessalinização estudados no presente trabalho, onde as informações do Sistema 1 foram fornecidas pelo operador Marconi Campos de Melo, em junho de 2006 e as informações do Sistema 2 foram fornecidas pelo operador Arlindo Domingos Pereira, em setembro de 2005.

Tabela 3.2 - Diagnóstico técnico dos Sistemas de dessalinização do Sítio Amorim (Sistema 1) e do Sítio Carretão (Sistema 2).

INFORMAÇÕES INICIAIS		
	Sistema 1	Sistema 2
Localidade	Área rural. Sítio Amorim – Galante - Campina Grande/PB	Área rural. Sítio Carretão - Campina Grande/PB
Operador responsável	Marconi Campos de Melo	Arlindo Domingos Pereira
Nº de famílias beneficiadas	100	30
DADOS TÉCNICOS DO POÇO		
	Sistema 1	Sistema 2
Distância do poço ao dessalinizador (m)	Aproximadamente 350	Aproximadamente 50
Ano de perfuração	1999	2000
Vazão informada ($m^3 \cdot h^{-1}$)	7,0	1,2
Profundidade (m)	18,0	45,0
Tipo de revestimento	Ferro galvanizado	Ferro galvanizado
Marca, tipo e potência do motor bomba	JKB, injeção e com 3 CV	King (JET), submersa e com 3 CV
Rede elétrica	Trifásica	Monofásica
Condições físicas	Boa	Regular
DADOS TÉCNICOS DO DESSALINIZADOR		
	Sistema 1	Sistema 2
Empresa fabricante	PERENNE	PERENNE
Capacidade de produção ($m^3 \cdot h^{-1}$)	1,0	0,6
Distância do	Aproximadamente 1000	Aproximadamente 800

dessalinizador à comunidade (m)		
Tempo de funcionamento (h.dia ⁻¹)	8	8
Outra fonte de abastecimento	Não há outra fonte	Há uma cisterna perto do dessalinizador que é usada como reserva do próprio dessalinizador
Número de copos de filtro e marca	4 copos da CUNO	3 copos da CUNO
Número de filtros de cartucho	4	3
Número de vasos de pressão	2 com 3 m de comprimento cada	1 com 3 m de comprimento
Número de membranas	6 membranas CPA 2 – 4040 da Hydranautics	3 membranas CPA 2 – 4040 da Hydranautics
Quantidade e tipo de rotâmetros	2 com mola	2 com mola
Quantidade e tipo de manômetros	5 glicerinados	5 glicerinados
Pressostato	Possui mas não está ligado	Não possui
Marca e potência da bomba de alta pressão	DANCOR com 3 CV	DANCOR com 3 CV
Bomba dosadora	Possui	Possui mas está quebrada
Marca e potência da bomba de retrolavagem	DANCOR com 1/3 CV	DANCOR com 1/3 CV
Marca e potência da bomba auxiliar	DANCOR com 1/3 CV	Não possui
Reservatórios	Possui uma bombona de retrolavagem com 150 L e uma bombona de antiincrustante com 60 L	Possui uma bombona de retrolavagem com 150 L e uma bombona de antiincrustante com 100 L
PRE-TRATAMENTO FÍSICO		
	Sistema 1	Sistema 2
Tipo	Filtro de cartucho	Filtro de cartucho
PRE-TRATAMENTO QUÍMICO		
	Sistema 1	Sistema 2
Tipo	Flocon	Flocon
RESERVATÓRIOS DE ALIMENTAÇÃO, PERMEADO E REJEITO		
	Sistema 1	Sistema 2
Quantidade, tipo e capacidade do reservatório de alimentação	Um reservatório de fibra de vidro com 5 m ³	Um reservatório de fibra de vidro com 5 m ³

Quantidade, tipo e capacidade do reservatório do permeado	Dois reservatórios de fibra de vidro com 5 m ³ cada	Um reservatório de fibra de vidro com 5 m ³
Quantidade, tipo e capacidade do reservatório do rejeito	Não possui	Não possui
Período de limpeza dos reservatórios	A cada 15 dias	A cada 15 dias
DESTINO DO REJEITO		
	Sistema 1	Sistema 2
Uso do concentrado	Nada é feito com o rejeito	Nada é feito com o rejeito

O flocon é utilizado como antiincrustante em sistemas de OI, ele é constituído por uma solução aquosa de ácido policarboxílico.

Nos Anexos I e II encontram-se algumas informações adicionais obtidas durante a realização do diagnóstico técnico dos sistemas de dessalinização.

Independentemente das diferenças dos diagnósticos técnicos dos dois sistemas, é importante ressaltar que o Sistema 1 vem operando com as mesmas membranas a sete anos, enquanto que o Sistema 2 as membranas só possuem onze meses de operação, pois pouco tempo após a realização deste diagnóstico iniciou-se a recuperação do Sistema 2.

3.5. PRODUTOS QUÍMICOS

- ✓ Ácido clorídrico 37% (Quimex P.A.)

3.6. EQUIPAMENTOS

- ✓ Condutímetro portátil da OAKTON
- ✓ pHmetro portátil da GEHAKA – PG 1400
- ✓ Termômetro
- ✓ Aquecedor térmico
- ✓ Cronômetro

3.7. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

As análises físico-químicas das amostras (água de alimentação, permeado e concentrado) coletadas durante as visitas técnicas aos sistemas em estudo, foram realizadas no LABDES, obedecendo ao *Standard Methods* (CLESCERI *et al*, 1998) e obedecendo os níveis de concentrações exigidos pela Portaria 518/04 do Ministério da Saúde. Os laudos referentes a essas análises encontram-se em forma de Tabelas nos Anexos I e II.

3.8. PROCESSO DE LIMPEZA DOS ELEMENTOS DE MEMBRANAS

Periodicamente deve ser realizada uma limpeza química dos elementos de membranas com o propósito de manter o desempenho dos elementos de acordo com as normas técnicas dos fabricantes de membranas.

O procedimento descrito abaixo apresenta etapas padrões para uma limpeza química de membranas (França, 2004).

1. As membranas foram lavadas com água permeada a 30°C, durante 15 minutos sob uma pressão de 3,0 kg.cm⁻². No final dos 15 minutos as membranas ficaram embebidas com água permeada a 30°C durante 15 minutos e em seguida descartou-se a água no ralo.

2. Preparou-se a solução de limpeza de acordo com as instruções do boletim da respectiva membrana. Ajustou-se o pH da solução e a temperatura de acordo com o limite máximo estabelecido pelo fabricante das membranas.

3. Com ajuda de uma bomba a solução de limpeza foi passada através dos elementos de membranas durante 1 a 2 minutos deixando-a cair no ralo. Desligou-se a bomba e todas as válvulas durante 30 minutos.

4. Repetiu-se o item 3 mais duas vezes. Monitorou-se a cor da solução de limpeza. Se ocorrer mudança de cor, repete-se o item 3 até minimizar a coloração da solução.

5. Reciclou-se o concentrado para o tanque da solução de limpeza e monitorou-se a temperatura e o pH da solução. Procurando manter a temperatura constante durante a limpeza. Quanto o pH, este variará em função do tipo de material que esta sendo usado na limpeza. Para soluções ácidas o pH tende a subir, para soluções alcalinas o pH tende a diminuir. Em ambas situações no final da limpeza química o pH tende a ficar constante.

6. Quando o pH da solução de limpeza se apresentou constante, descartou-se a solução de limpeza para o ralo. (Em caso de repetir a limpeza recomenda-se tirar amostras da solução anterior e a nova com o propósito de avaliar a taxa de remoção de impurezas a partir das análises físico-química).

7. Recomenda-se que toda a tubulação hidráulica do sistema de dessalinização seja lavada com uma solução de ácido clorídrico de pH 4,0.

8. Em seguida lavou-se as membranas e toda tubulação hidráulica com água permeada durante 15 minutos sob um fluxo moderado a $3,0 \text{ kgf.cm}^{-2}$ (ou até se atingir a qualidade de permeado desejado). A temperatura da água deve se encontrar acima de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, nunca acima de $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Considerações importantes:

No início da limpeza devem-se tomar as seguintes medidas:

- ✓ Procurar medir o pH e a condutividade elétrica da água de alimentação, do permeado e concentrado do sistema e anotá-las em uma planilha de dados.
- ✓ Calcular o volume do tanque da solução de limpeza do sistema de dessalinização.
- ✓ Preparar a solução de limpeza com um volume superior de 10% ao calculado para não passar por dificuldade durante a limpeza.
- ✓ O controle de temperatura é muito importante durante a limpeza química.
- ✓ Não esquecer de lavar as membranas com própria água de alimentação pelo menos 15 minutos antes de dar partida no sistema novamente.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste Capítulo são avaliados e discutidos os dados obtidos na fase experimental deste trabalho.

Para análise destes dados foi necessária a utilização de gráficos e tabelas relacionados com o comportamento dos parâmetros do processo de OI. Os gráficos encontram-se no corpo deste Capítulo e todas as tabelas referentes aos gráficos encontram-se nos Anexos I e II correspondentes aos Sistemas 1 e 2, respectivamente.

4.1. VARIAÇÃO DO POTENCIAL HIDROGENIÔNICO DA SOLUÇÃO USADA DURANTE A LIMPEZA QUÍMICA DE MEMBRANAS

Considerando que a variação do pH é um dos parâmetros que fundamenta a limpeza química de membranas, as Figuras 4.1 e 4.2, referentes aos dados das Tabelas A6 e A7 do Anexo I, apresentam o comportamento do pH durante as limpezas para o Sistema 1 e a Figura 4.3, referente aos dados da Tabela B5 do Anexo II, para o Sistema 2, onde foram utilizadas soluções de HCl, obedecendo as etapas técnicas de limpeza química, conforme mencionado no item 3.8 do Capítulo III.

Foram realizadas duas limpezas químicas no Sistema 1, onde a primeira ocorreu 3 meses antes da segunda. Já no Sistema 2 foi realizada uma limpeza química após onze meses de sua instalação.

O pH da solução de HCl para limpeza química das membranas foi ajustado dentro da faixa oferecida pelo fabricante das membranas, conforme boletim técnico presente nos Anexos, onde o pH inicial da solução foi de aproximadamente 3 e a temperatura da solução foi controlada variando entre 35 e

38 °C, com o objetivo de facilitar a dissolução dos sais incrustados na superfície das membranas, durante a limpeza química.

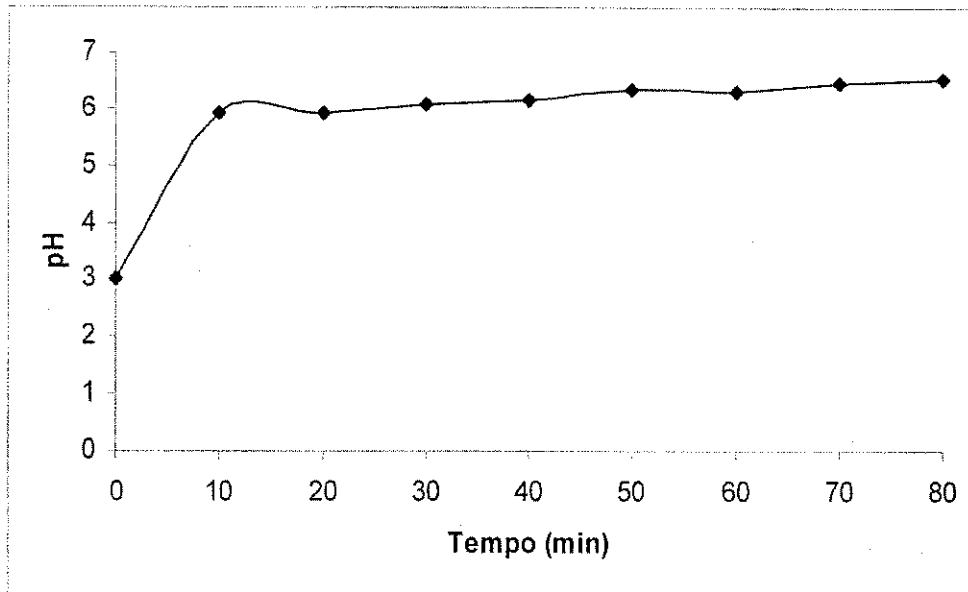


Figura 4.1 – Variação do pH da solução de HCl usada durante a primeira limpeza química dos elementos de membrana do Sistema 1.

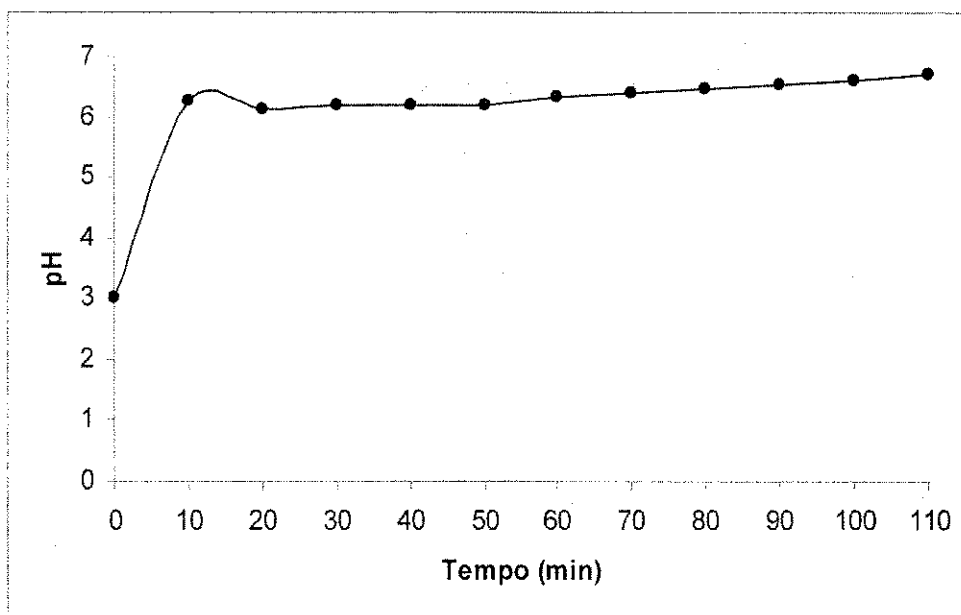


Figura 4.2 – Variação do pH da solução de HCl usada durante a segunda limpeza química dos elementos de membrana do Sistema 1.

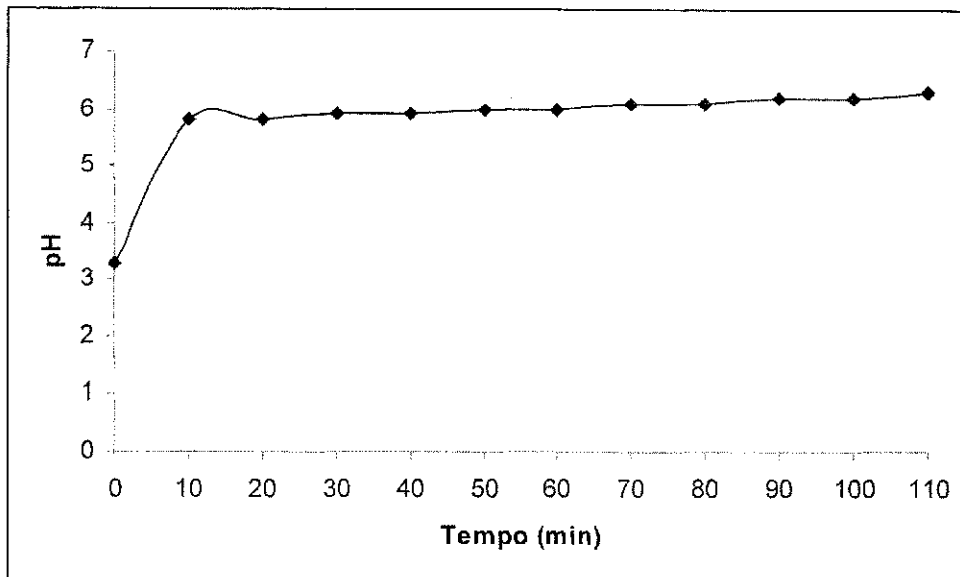


Figura 4.3 - Variação do pH da solução de HCl usada durante a limpeza química dos elementos de membrana do Sistema 2.

A variação do pH para as três limpezas químicas apresentou o mesmo comportamento, onde o resultado obtido está de acordo com a metodologia para limpeza química dos elementos de membrana, conforme descrito no item anterior. Inicialmente, para os primeiros 10 minutos o pH da solução aumentou praticamente duas vezes acima do valor inicial. Essa elevação é decorrente da dissociação dos sais que se encontram incrustado na superfície das membranas. A partir dos 20 minutos o pH tende a apresentar um comportamento de estabilização, indicando que a extração de sais na superfície das membranas ocorre mais lentamente em função do pH. Considerando que o pH após 70 minutos não apresentou variações significativas, considerou-se concluída a limpeza química. Isso não significa que todos os sais tenham sido removidos, os resquícios que permanecem podem formar precipitados insolúveis na porosidade das membranas, os quais com o tempo tende a diminuir o desempenho das mesmas.

4.2. VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DURANTE A LIMPEZA QUÍMICA DE MEMBRANAS

O comportamento da variação da condutividade elétrica das soluções de HCl, usadas durante as limpezas químicas dos elementos de membranas dos Sistemas 1 e 2, está representado nas Figuras 4.4 a 4.6.

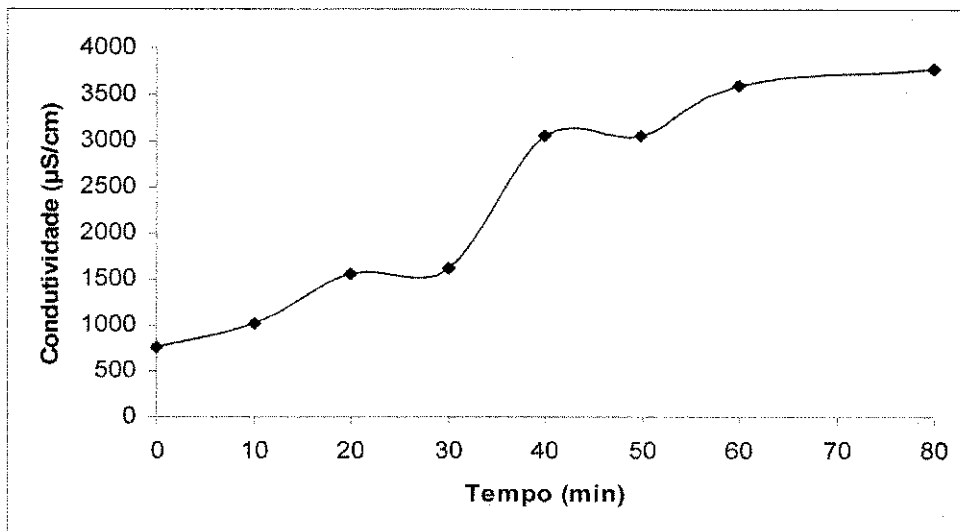


Figura 4.4 - Variação da condutividade elétrica da solução de HCl usada durante a primeira limpeza química dos elementos de membrana do Sistema 1.

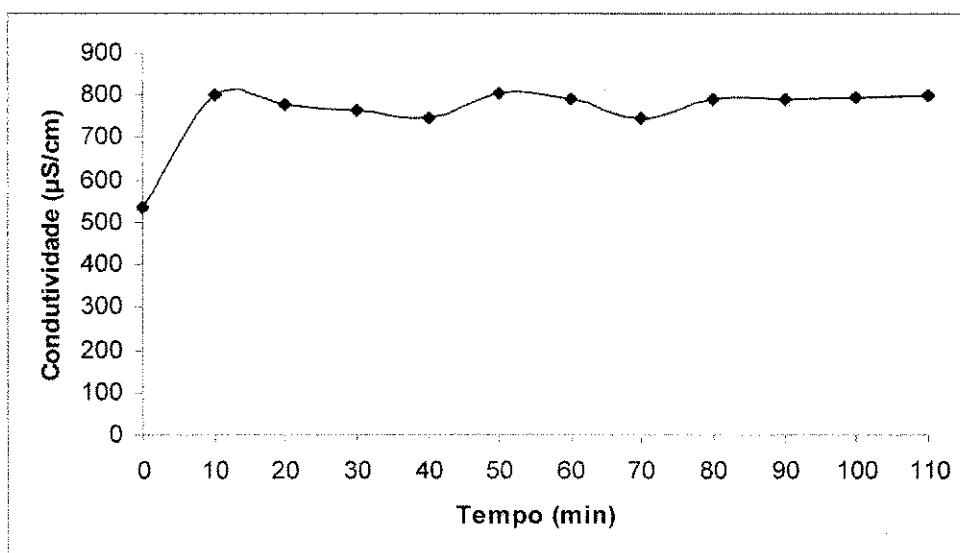


Figura 4.5 - Variação da condutividade elétrica da solução de HCl usada durante a segunda limpeza química dos elementos de membrana do Sistema 1.

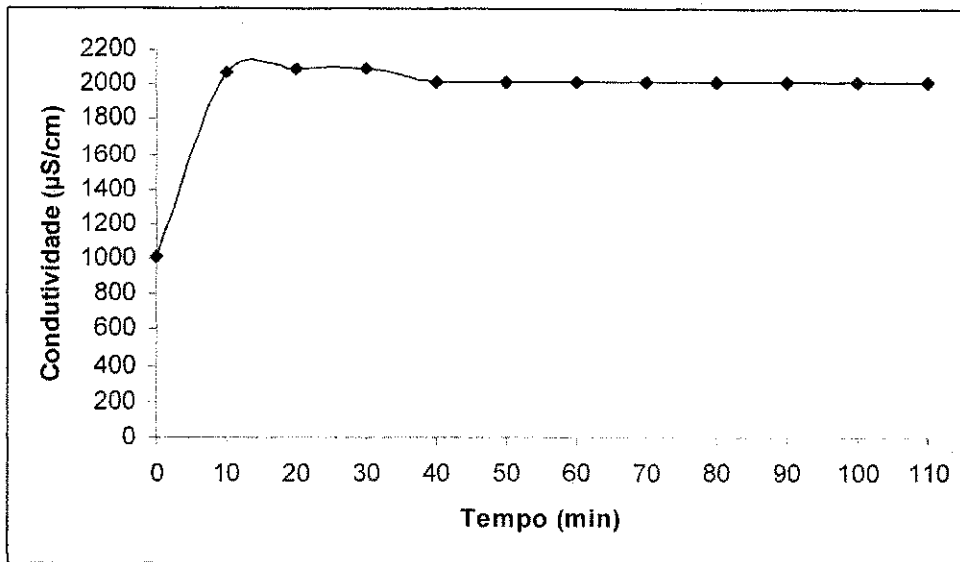


Figura 4.6 - Variação da condutividade elétrica da solução de HCl usada durante a limpeza química dos elementos de membrana do Sistema 2.

Considerando que o Sistema 1 havia recebido a última limpeza química a um ano atrás, a concentração de sais presentes nas membranas durante a primeira limpeza química é maior do que a concentração de sais, quando foi realizada a segunda limpeza química (que se deu após três meses da primeira limpeza). Por este motivo a condutividade elétrica da Figura 4.4 apresentou variações elevadas em pequeno espaço de tempo, chegando a atingir valores acima de $3.500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ próximo aos 80 minutos de limpeza. Por outro lado a Figura 4.5 mostra que a condutividade apresentou um patamar variando entre 700 e $800 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ logo após os primeiros minutos.

A Figura 4.4 nos mostra ainda que entre 30 e 40 minutos houve uma maior remoção dos sais incrustados nas membranas, fato comprovado pela inclinação da curva entre esse intervalo de tempo, devido à elevada variação da condutividade. A partir dos 40 minutos temos uma menor remoção dos sais, observada pela tendência a estabilização da curva.

A Figura 4.5 tendeu a estabilização logo após os 10 minutos da limpeza química, o que indica que as membranas não estavam muito incrustadas, ou seja, esse fato nos mostra que a primeira limpeza química em relação à segunda foi significativa em termos de remoção de sais. Isso pode ser observado, através da

Tabela A9, do Anexo I, onde a vazão do permeado aumentou de 1,1 para 1,4 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

A Figura 4.6 apresentou o mesmo comportamento da figura anterior, ou seja, a condutividade elétrica tendeu a estabilização após 10 minutos da limpeza química. Apesar de o Sistema 2 operar com uma concentração média de sais três vezes superior a concentração média do Sistema 1, as membranas têm somente onze meses de uso, o que justifica o fato da vazão do permeado ter permanecido constante, antes e após a limpeza química, conforme mostra a Tabela B7 do Anexo II.

4.3. CONCENTRAÇÃO DE SAIS PRESENTES NA ÁGUA ANTES E APÓS A LIMPEZA QUÍMICA

As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam as concentrações de sais presentes na água de alimentação, concentrado e permeado, antes e após a limpeza química, de acordo com os dados das Tabelas A2, A3, A4 e A5 do Anexo I e das Tabelas B3 e B4 do Anexo II.

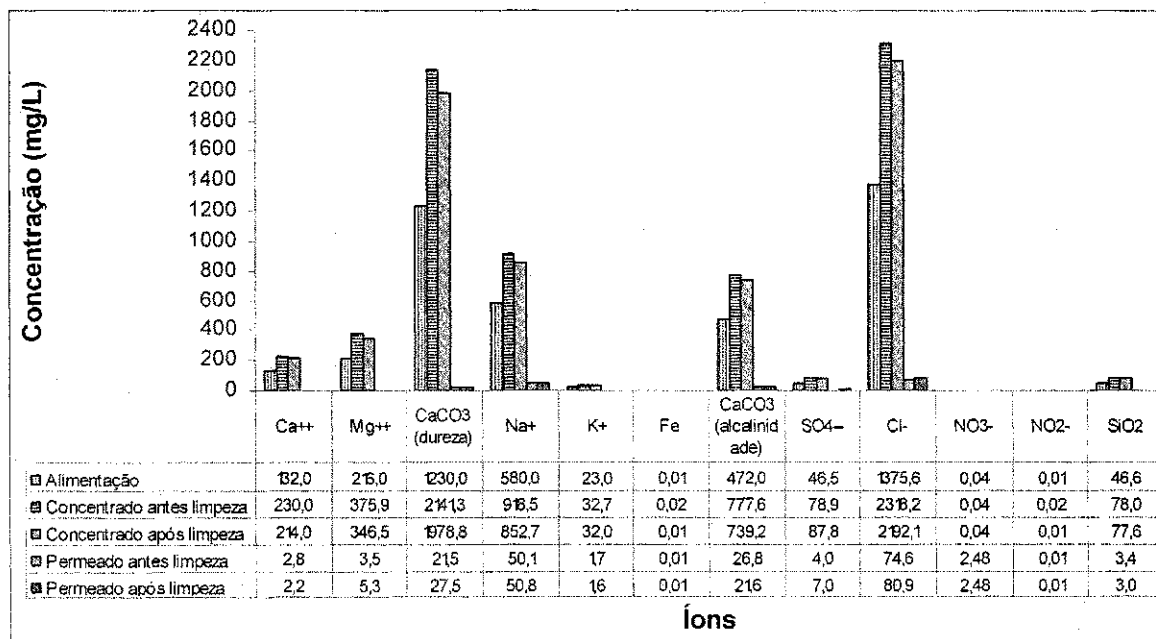


Figura 4.7 – Perfil da concentração de sais presentes na água antes e após a primeira limpeza química realizada no Sistema 1.

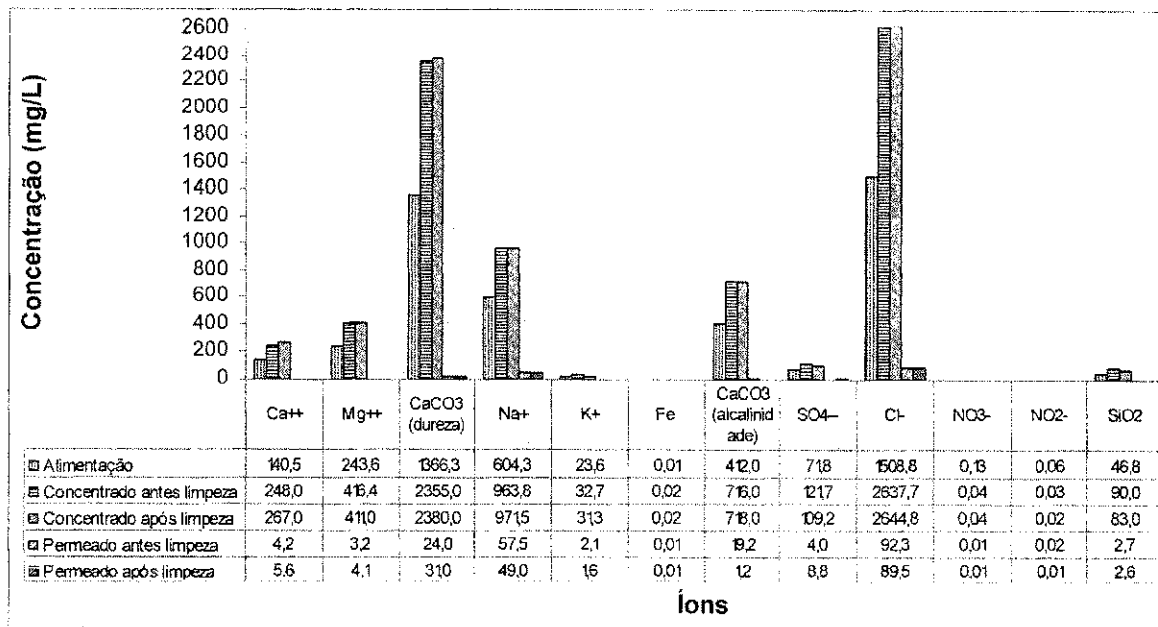


Figura 4.8 - Perfil da concentração de sais presentes na água antes e após a segunda limpeza química realizada no Sistema 1.

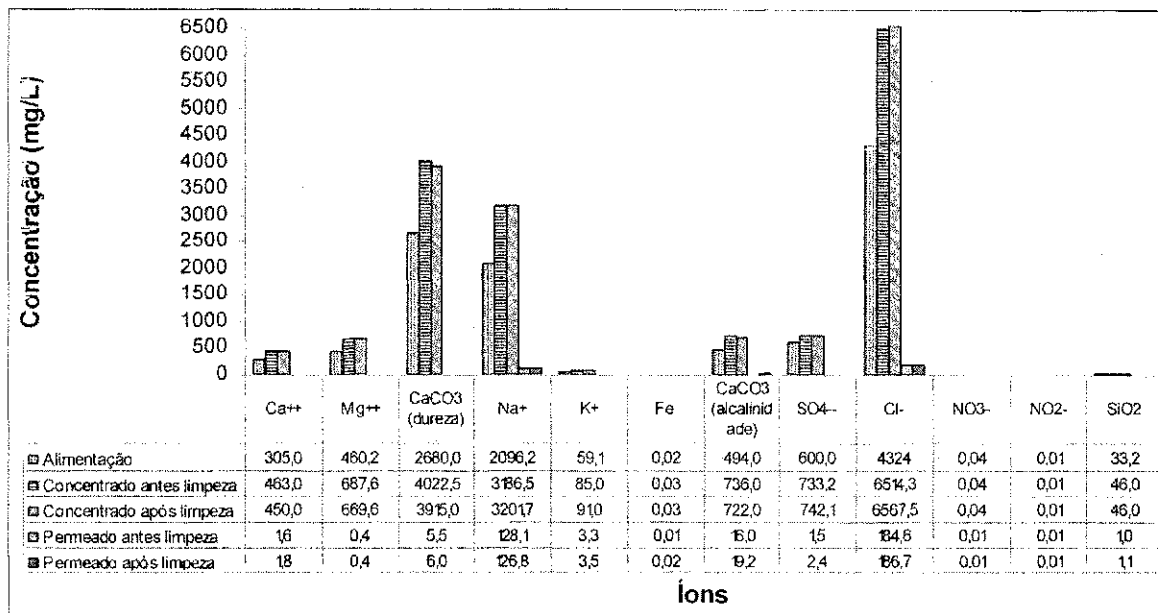


Figura 4.9 - Perfil da concentração de sais presentes na água antes e após a limpeza química realizada no Sistema 2.

Podemos observar na Figura 4.7, de acordo com o perfil das concentrações, o efeito da primeira limpeza química do Sistema 1, onde em função do tempo de uso das membranas (sete anos), para a maioria dos componentes analisados, houve uma diminuição na concentração de sais do

concentrado e uma elevação da concentração de sais do permeado após a limpeza química, esse fato ocorreu devido a remoção dos sais que estavam incrustados na superfície das membranas.

As Figuras 4.8 e 4.9 mostram que as concentrações de sais do concentrado e permeado foram praticamente às mesmas após a limpeza química.

4.4. COMPORTAMENTO DO POTENCIAL HIDROGENIÔNICO COM O TEMPO, ANTES E APÓS A LIMPEZA QUÍMICA

Nas Figuras 4.10 e 4.11 está representado o comportamento do potencial hidrogeniônico com o tempo, para o permeado e concentrado, antes e após a limpeza química dos Sistemas 1 e 2, os dados são referentes as Tabelas A8 e B6 dos Anexos I e II.

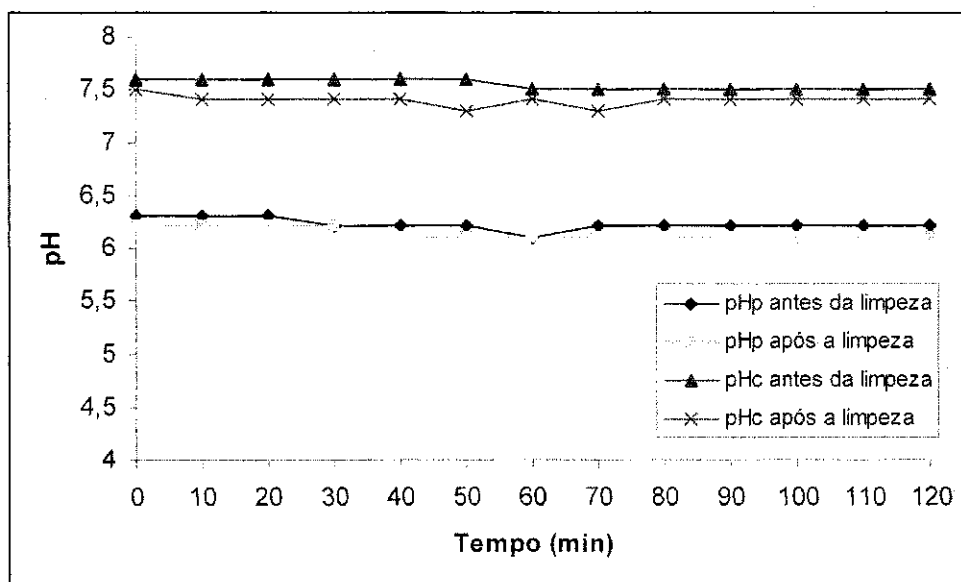


Figura 4.10 – Variação do pH do permeado e concentrado, sob efeito da pressão de $16,0 \text{ kgf.cm}^{-2}$ antes e após a limpeza do Sistema 1.

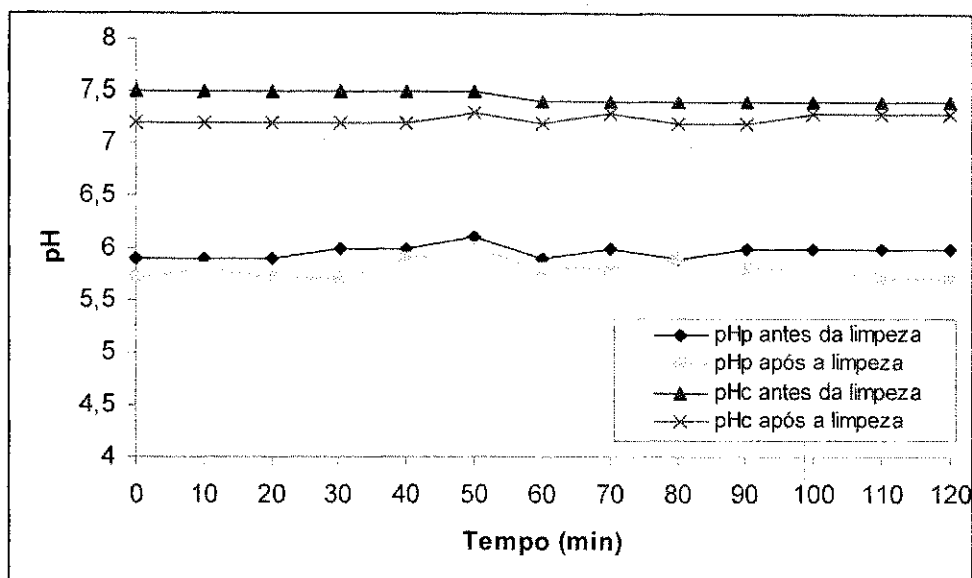


Figura 4.11 - Variação do pH do permeado e concentrado, sob efeito da pressão de $13,8 \text{ kgf.cm}^{-2}$ antes e após a limpeza do Sistema 2.

Analisando o comportamento das curvas podemos observar que ocorreram pequenas variações do pH do permeado e concentrado durante o tempo de operação. Os valores do pH do concentrado para os sistemas estudados foram superiores aos do permeado. Isso se deve à separação dos sais dissolvidos na corrente de alimentação dos sistemas, ou seja, a presença de carbonatos e bicarbonatos no concentrado faz o pH aumentar e a ausência destes no permeado faz o pH diminuir.

Observamos também que houve uma diminuição do pH do concentrado e permeado após a limpeza química dos elementos de membrana para os sistemas estudados. Esse fato ocorre porque após a limpeza da membrana a mesma consegue extrair ainda mais os sais dissolvidos na corrente de alimentação.

4.5. COMPORTAMENTO DA CONDUTIVIDADE COM O TEMPO, ANTES E APÓS A LIMPEZA QUÍMICA

Nas Figuras 4.12 e 4.13 está representado o comportamento da condutividade elétrica com o tempo, para o permeado e concentrado, antes e

após a limpeza química dos Sistemas 1 e 2, os dados são referentes as Tabelas A8 e B6 dos Anexos I e II.

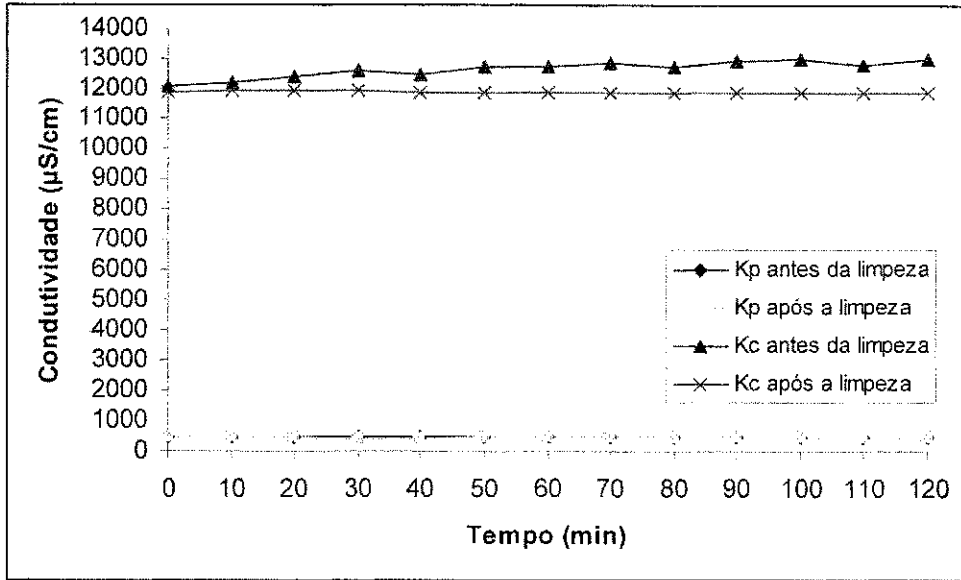


Figura 4.12 - Variação da condutividade elétrica do permeado e concentrado, sob efeito da pressão de $16,0 \text{ kgf.cm}^{-2}$ antes e após a limpeza do Sistema 1.

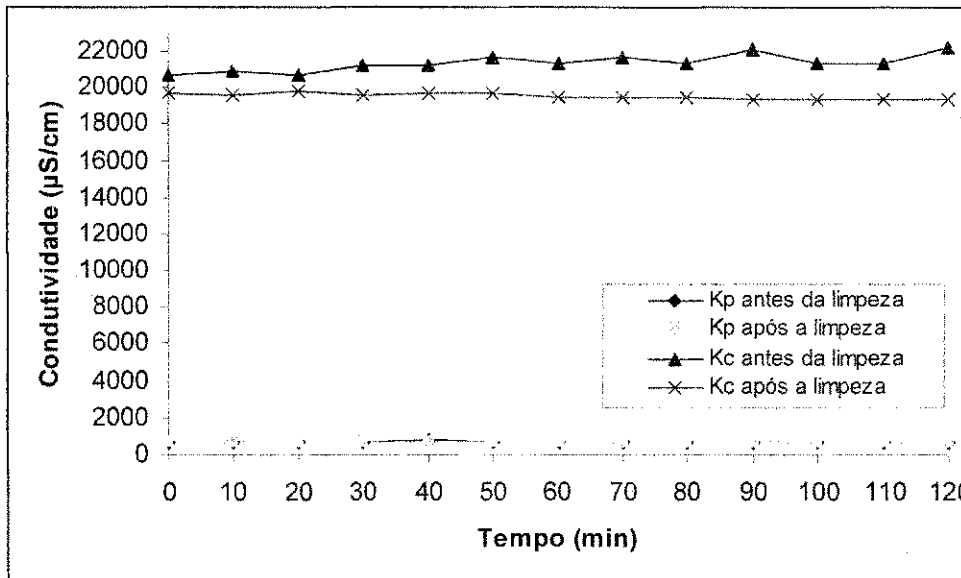


Figura 4.13 - Variação da condutividade elétrica do permeado e concentrado, sob efeito da pressão de $13,8 \text{ kgf.cm}^{-2}$ antes e após a limpeza do Sistema 2.

Analisando o comportamento das curvas podemos observar que a condutividade elétrica do concentrado é superior a do permeado para os dois sistemas estudados, isto significa que os sais presentes na água de alimentação não estão atravessando as membranas de osmose inversa, sendo carreados na corrente do concentrado.

Observamos também que a condutividade elétrica do permeado se aproxima de zero para os dois sistemas estudados, com pouca variação após a limpeza química dos elementos de membrana, isso comprova a excelente qualidade da água produzida. A condutividade elétrica do concentrado apresentou uma pequena diminuição após a limpeza.

4.6. TAXA DE REJEIÇÃO DE SAIS

As Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 mostram o perfil da taxa de rejeição de sais antes e depois da limpeza química dos sistemas, onde a TRS (%) foi calculada através da Equação (2.15) presente no Capítulo II e com os dados das Tabelas A2, A3, A4 e A5 do Anexo I e Tabelas B3 e B4 do Anexo II.

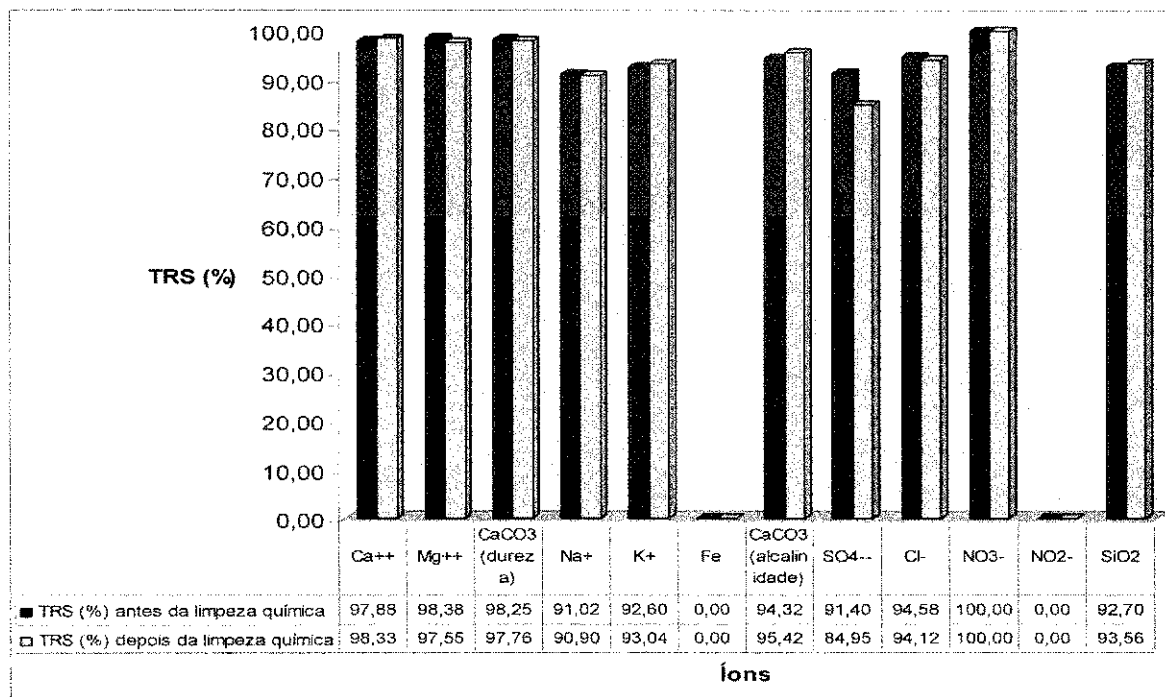


Figura 4.14 – Perfil da taxa de rejeição de sais antes e depois da primeira limpeza química do Sistema 1.

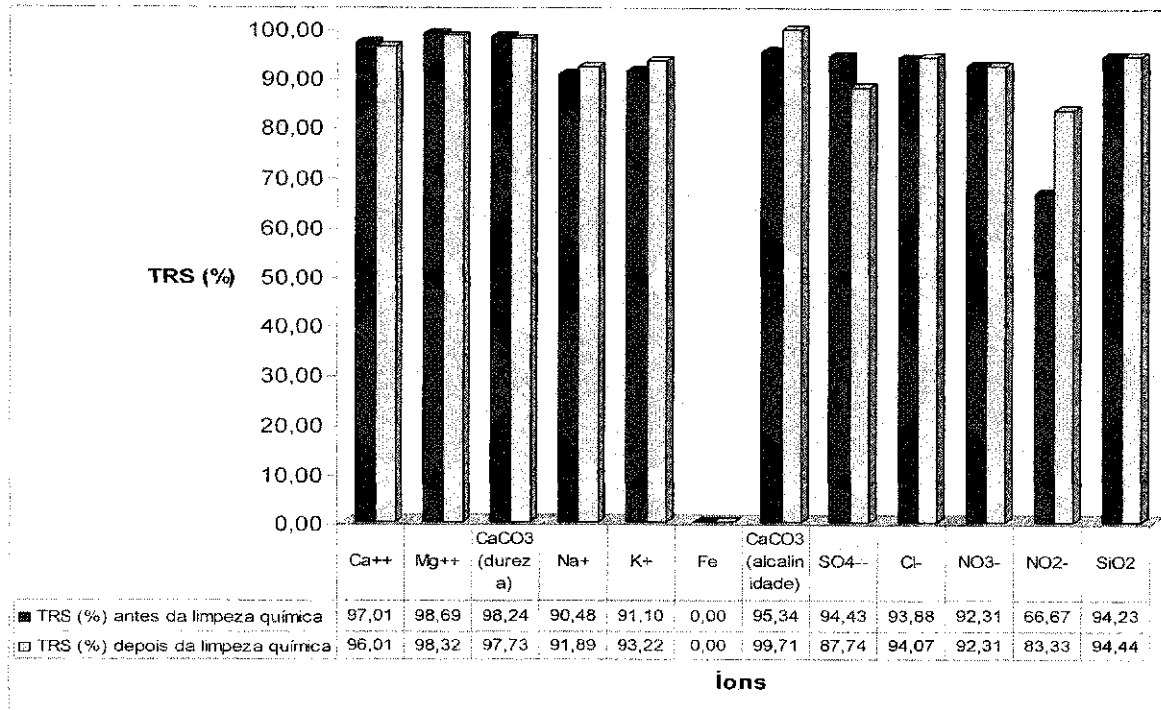


Figura 4.15 - Perfil da taxa de rejeição de sais antes e depois da segunda limpeza química do Sistema 1.

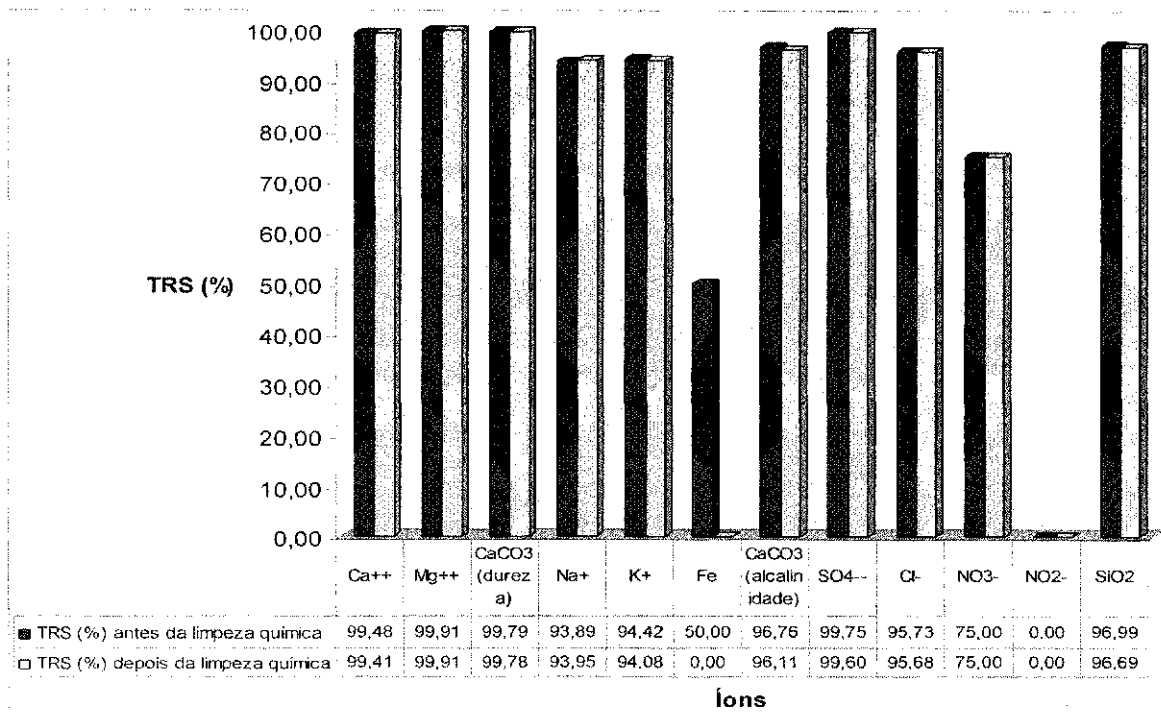


Figura 4.16 - Perfil da taxa de rejeição de sais antes e depois da limpeza química do Sistema 2.

Apesar das águas de poço utilizadas como alimentação para os sistemas estudados apresentarem concentrações de STD tão diferentes, pois o Sistema 2 é alimentado com uma água cerca de três vezes mais concentrada que a do Sistema 1, podemos observar uma rejeição de sais superior a 90% para praticamente todos os íons em ambos os sistemas, indicando assim uma ótima rejeição de sais pela membrana e a grande eficiência dos sistemas de dessalinização de osmose inversa.

A rejeição faz parte do processo, considerando que a taxa na ordem de 90%, mostra que a membrana opera dentro dos padrões estabelecidos pelo fabricante, de acordo com o boletim técnico da membrana em anexo. Considerando que o processo de dessalinização é contínuo a tendência de incrustação de sais é aumentar com o tempo, caso não ocorra um programa periódico de limpeza química das membranas.

4.7. COMPARAÇÃO DOS DADOS SIMULADOS COM OS SISTEMAS EM CAMPO

Com o resultado das análises físico-químicas da água de alimentação, foram desenvolvidas simulações de operação de um sistema de dessalinização via osmose inversa através do *software* do fabricante das membranas dos Sistemas 1 e 2, o *RO System* da *Hydranautics*, com a finalidade de comparar o desempenho dos sistemas após as limpezas químicas, os resultados simulados encontram-se nos Anexos I e II.

Para realizar a simulação foram necessárias as seguintes informações: tipo de água, temperatura, análise físico-química da água de alimentação, vazão desejada para o permeado, número de vasos de pressão, número de membranas e tipo das membranas. As Figuras 4.17e 4.18 apresentam os dados simulados e os dados reais experimentais para os Sistemas 1 e 2.

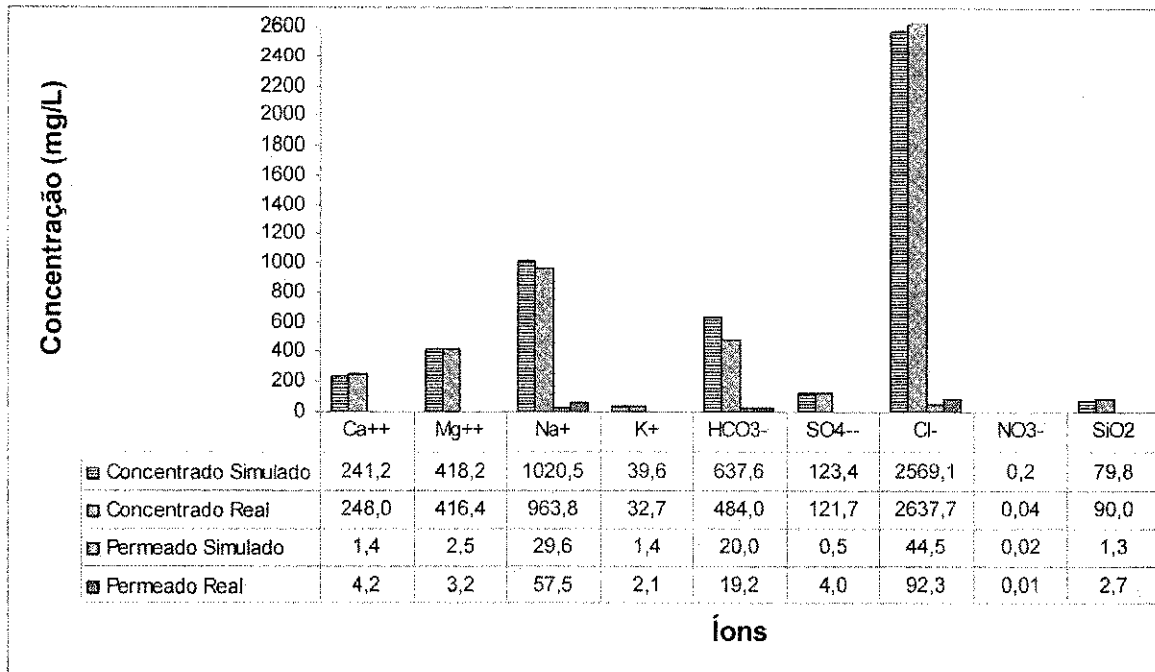


Figura 4.17 – Resultados experimentais e simulados das análises físico-químicas do concentrado e permeado do Sistema 1.

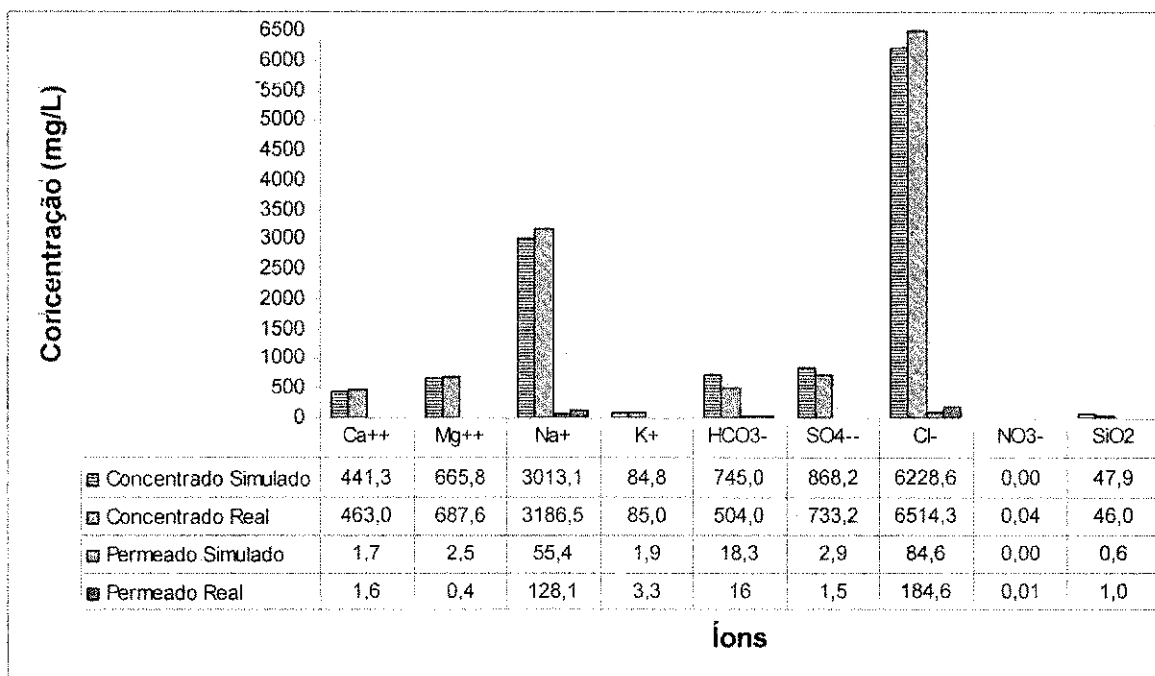


Figura 4.18 - Resultados experimentais e simulados das análises físico-químicas do concentrado e permeado do Sistema 2.

É importante ressaltar que o processo de simulação é uma das ferramentas mais usadas para reproduzir sistemas de dessalinização, e que o tempo de uso da membrana é um dos parâmetros do processo.

Para os casos anteriormente estudados observa-se que a diferença, entre os dados simulados e os obtidos experimentalmente, das concentrações dos cátions e ânions, foram insignificantes. Isso demonstra que o simulador é eficiente e pode ser usado para estimar o desempenho de sistemas de dessalinização. Os sistemas estão produzindo água de boa qualidade para o consumo humano de acordo com a Legislação Brasileira em vigor, conforme Portaria 518/04 do Ministério da Saúde.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES

O diagnóstico técnico de sistemas de OI acompanhado por um monitoramento periódico do desempenho do sistema são ferramentas importantes na detecção de problemas que venham afetar a qualidade e produção de água.

Observou-se que a variação do pH da solução de limpeza aumentou nos primeiros dez minutos e logo em seguida permaneceu praticamente constante para todos os casos estudados.

Para o Sistema 1 observou-se que a vazão do permeado aumentou após a limpeza química realizada depois de um ano de operação, indicando a presença de sais na superfície da membrana que impedia a permeação.

O pH e a condutividade elétrica do permeado e concentrado diminuí após a limpeza química dos elementos de membrana.

A comparação das concentrações dos cátions e ânions antes e após as limpezas químicas mostra que concentrações elevadas de sais na superfície das membranas podem afetar a qualidade do permeado em termos de concentração e produção.

A taxa de rejeição das membranas do sistema de dessalinização do Sítio Amorim foi superior a 90% mesmo considerando que a membrana possui sete anos de uso.

Os dados obtidos pelo programa de simulação de membranas e aqueles obtidos no campo após a limpeza química mostram que os sistemas encontram-

se funcionando adequadamente e que a ferramenta de simulação pode ser utilizada para reproduzir qualquer sistema de dessalinização.

Os sistemas estudados estão produzindo água de boa qualidade para o consumo humano de acordo com a Legislação Brasileira em vigor, conforme Portaria 518/04 do Ministério da Saúde.

CAPÍTULO VI

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através de limpeza química de membrana desenvolver um estudo para verificar quais os sais mais comuns que ficam incrustados na superfície das membranas dos dessalinizadores que se encontram instalados nas regiões do Curimataú e Cariri do Estado da Paraíba.

Desenvolver um programa de monitoramento nas membranas para avaliar a formação de bio-filmes por material orgânico.

CAPÍTULO VII

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, G. E. and SCHMID, J. Feasibility study of brackish water desalination in the Egyptian deserts and rural regions using PV systems, *Energy Conversion & Management*, 9 p., 2001.

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, 2003.

AMJAD, Z. *Reverse Osmosis: Membrane Technology, Water Chemistry, and Industrial Applications*. Van Nostrand-Reinold, New York, 1993.

AMBIENTEBRASIL. *Dessalinização é uma das opções para combater seca no nordeste*. Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br/noticias/index.php3?action=ler&id=2553>>. Acesso em: 05 de nov. de 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023: Informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

BRANDLEY, R. *Design considerations for reverse osmosis systems*. In Zahid Amjad (ed), *Reverse osmosis: Membrane Technology, Water Chemistry & Industrial Applications*, Van Nostrand-Reinold, New York, 1993.

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

BRUGGEN, B. V. and VANDECASTEELE, C. *Distillation vs. membrane filtration: overview of process evaluations in seawater desalination*. *Desalination*, vol. 143, pp. 207 – 218, 2002.

BUROS, O. K. *O ABC da Dessalinização*. Associação Internacional de Dessalinização (IDA), Massachusetts, 1990.

CARDONA, E. and PIACENTINO, A. *Optimal design of cogeneration plants for seawater desalination*. *Desalination*, vol. 166, pp. 411 – 426, 2004.

CHEN, S. S., TAYLOR, J. S., MORRIS, C. D. and HOFMAN, J. A. M. H. *Flat sheet testing for pesticide removal by varying RO/NF membranes*. *Desalination*, pp. 843 - 848, 1997.

CLESCERI, L. S., GREENBERG, A. E. and EATON, A. D. *Standard methods – For the examination of water and wastewater*. 20 ed., EUA, 1998.

DAEE. *Distribuição de água no planeta*. Departamento de águas e energia elétrica. Governo do Estado de São Paulo. Disponível em: <<http://www.daee.sp.gov.br/acervoepesquisa/distribuicao.htm>>. Acesso em: 05 de jan. de 2007.

DOW LATIN AMERICA. *A tecnologia de membrana de osmose reversa*. Boletim Técnico, 1996.

DRIOLI, E., CRISCUOLI, A. and CURCIO, E. *Integrated membrane operations for seawater desalination*. *Desalination*, vol. 147, pp. 77 - 81, 2002.

EL-MANHARAWY, S. and HAFEZ, A. *Molar ratios as a useful tool for predictions of scaling potencial incide RO systems*. *Desalination*, vol. 136, pp. 243 – 254, 2001.

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.

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

FRANÇA, K. B. *Avaliação de projetos de sistemas de dessalinização via osmose inversa*. Programa Água Doce SRH/MMA, LABDES, Campina Grande – PB, 2005.

FRANÇA, K. B. *Curso de limpeza química de membranas de sistemas de dessalinização via osmose inversa*. LABDES, Campina Grande - PB, 2004.

FRANÇA, K. B. *Operadores de sistemas de dessalinização via osmose inversa*. Programa Água Doce SRH/MMA, LABDES, Campina Grande – PB, 2006.

HABERT, A. C., BORGES, C. P. e NÓBREGA, R. *Processos de separação com membranas*. Escola Piloto em Engenharia Química, COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Química, 1997.

HASNAIN, S. M. and ALAJLAN, S. A. *Coupling of PV – Powered RO Brackish water desalination plant with solar stills*. *Desalination*, vol. 116, pp. 57 – 64, 1998.

HIMMELBLAU, D. M. *Engenharia Química: Princípios e Cálculos*. 4ª ed., Prentice-Hall do Brasil, Rio de Janeiro, 1984.

HYDRANAUTICS. *Hydranautics membrane solutions design software, RO system design*, 2006.

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

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

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

MALLEVIALLE, J., ODENDAAL, P. E. and WIESNER, M. R. *Water treatment membrane processes*. American Water Works Association Research Foundation; Lyonnaise des Eaux; Water Research Commission of South Africa. McGraw-Hill, Washington, DC, USA, 1996.

MINDLER, A. B and EPSTEIN, A. C. *Measurements and control in reverse osmosis desalinations*. *Desalination*, vol. 59, pp. 343 - 379, 1986.

MOTTA, M. *Introdução aos processos de separação por membrana*. Departamento de Engenharia Química, UFPE.

NING, R. Y. and NETWIG, J. P. *Complete elimination of acid injection in reverse osmosis plants*. *Desalination*, vol. 143, pp. 29 - 34, 2002.

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.

OZAKI, H. and LI, H. Rejection of organic compounds by ultra-low pressure reverse osmosis membrane. *Water Research*, 36, pp. 123 – 130, 2002.

PRICE, M. *Water from the ground*. *New Scientist*, 42, 1 – 4, Fev. 1991.

SANTOS, H. R.; PRADO, G. S.; VIDAL, C. M. S.; MORUZZI, R. B. e CAMPOS, J. R. *Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas em*

sistemas de tratamento de água e esgoto sanitário. Em. sanit. ambient. Vol. 9, nº 4, pp. 291 – 300, 2004.

SCHNEIDER, R. P.; TSUTIYA, M. T. *Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso*. 1ª ed., São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 234 p., 2001.

SEMIAT, R. *Desalination: present and future*. Water International, vol. 25, nº 1, pp. 54 - 65, 2000.

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

SINCERO, A. P. and SINCERO, G. A. *Physical-chemical treatment of water and wastewater*. IWA Publishing, London, UK, 2003.

SYSTEMS. *Manutenção e sistemas para tratamento de água*. Disponível em: <<http://www.nbjsystems.com.br/osmose.htm>>. Acesso em: 06 de nov. de 2006.

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

SUASSUNA, J. *Água: fonte de vida*. Potencialidades hídricas do Nordeste brasileiro: O uso múltiplo da água e a importância do rio São Francisco. Por João Suassuna: organizadores Arminda Saconi Messias e Marcos Roberto Nunes Costa. Recife: UNICAP, Série encontro da águas, n. 1, 240 p., 2005.

TAYLOR, J. P. and JACOBS, E. P. *Reverse osmosis and nanofiltration*. In Joel Mallevalle et al (eds), water treatment membrane process, Mc Graw-Hill, New York, 1996.

TOMASZEWSKA, M., ORECKI, A. and KARAKULSKI, K. *Treatment of bilge water using a combination of ultrafiltration and reverse osmosis*. Desalination, vol. 185, pp. 203 - 212, 2005.

TSIOURTIS, N. X. *Desalination and the environment*. Desalination, vol. 141, pp. 223 – 236, 2001.

YOUNOS, T. and TULOU, K. E. *Overview of desalination techniques*. Journal of contemporary water research & education, vol. 132, pp. 3 – 10, 2005.

ANEXO I

DADOS EXPERIMENTAIS

O Anexo I refere-se às Tabelas de dados experimentais, informações adicionais obtidas durante a realização do diagnóstico técnico, boletim técnico da membrana e simulação referentes ao Sistema de Dessalinização do Sítio Amorim situado no distrito rural de Galante no Município de Campina Grande - PB (Sistema 1).

As análises físico-químicas das águas coletadas foram realizadas pelo LABDES.

Tabela A1 – Laudo das análises físico-químicas da água do sistema de dessalinização de Amorim, amostras coletadas em junho de 2006.

PARÂMETROS	Poço	Concentrado	Permeado	VMP (*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm a } 25\text{ }^\circ\text{C}$	4.540,0	6.390,0	341,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	8,0	8,1	7,4	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	0,15	0,15	0,11	1,0 a 5,0
Cor	Não Objetável	Não Objetável	Não Objetável	Não Objetável
Dureza em Cálcio, mg/L Ca^{++}	130,0	203,5	2,3	---
Dureza em Magnésio, mg/L Mg^{++}	204,3	314,1	2,9	---
Dureza Total, mg/L CaCO_3	1.176,3	1.817,5	17,8	500,0
Sódio, mg/L Na^+	501,2	769,2	51,9	200,0
Potássio, mg/L K^+	18,4	30,0	3,2	---
Ferro Total, mg/L	0,01	0,02	0,01	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L CaCO_3	0,0	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L CaCO_3	90,4	36,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L CaCO_3	361,2	614,0	14,0	---
Alcalinidade Total, mg/L CaCO_3	451,6	650,0	14,0	---
Sulfato, mg/L SO_4^{--}	42,9	52,2	3,5	250,0
Cloreto, mg/L Cl^-	1.279,8	1.931,2	80,2	250,0
Nitrato, mg/L NO_3^-	0,00	0,00	0,0	10,0
Nitrito, mg/L NO_2^-	0,01	0,01	0,10	1,0
Sílica, mg/L SiO_2	36,0	78,0	3,0	---

ISL (Índice de Saturação de Langelier)	1,14	1,61	-2,63	≤ 0
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	2.600,0	4.110,0	151,0	1.000,0

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

Tabela A2 – Laudo das análises físico-químicas da água do sistema de dessalinização de Amorim antes da limpeza química, amostras coletadas em agosto de 2006.

PARÂMETROS	Poço	Concentrado	Permeado	VMP (*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25 °C	4.720,0	7.430,0	365,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,5	7,6	6,1	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	0,10	0,17	0,07	1,0 a 5,0
Cor	Não Objetável	Não Objetável	Não Objetável	Não Objetável
Dureza em Cálcio, mg/L Ca^{++}	132,0	230,0	2,8	---
Dureza em Magnésio, mg/L Mg^{++}	216,0	375,9	3,5	---
Dureza Total, mg/L CaCO_3	1.230,0	2.141,3	21,5	500,0
Sódio, mg/L Na^+	558,0	918,5	50,1	200,0
Potássio, mg/L K^+	23,0	32,7	1,7	---
Ferro Total, mg/L	0,01	0,02	0,01	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L CaCO_3	0,0	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L CaCO_3	0,0	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L CaCO_3	472,0	777,6	26,8	---
Alcalinidade Total, mg/L CaCO_3	472,0	777,6	26,8	---
Sulfato, mg/L SO_4^{--}	46,5	78,9	4,0	250,0
Cloreto, mg/L Cl^-	1.375,6	2.318,2	74,6	250,0
Nitrato, mg/L NO_3^-	0,04	0,04	0,0	10,0
Nitrito, mg/L NO_2^-	0,01	0,02	0,01	1,0
Sílica, mg/L SiO_2	46,6	78,0	3,4	---
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	0,69	1,16	-3,51	≤ 0
Total de Sólidos Dissolvidos Secos	2.910,0	4.981,0	175,31	1.000,0

a 180°C, mg/L

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

Tabela A3 – Laudo das análises físico-químicas da água do sistema de dessalinização de Amorim após a limpeza química, amostras coletadas em agosto de 2006.

PARÂMETROS	Concentrado	Permeado	VMP (*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25 °C	7.110,0	341,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,5	6,0	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	0,05	0,07	1,0 a 5,0
Cor	Não Objetável	Não Objetável	Não Objetável
Dureza em Cálcio, mg/L Ca^{++}	214,0	2,2	---
Dureza em Magnésio, mg/L Mg^{++}	346,5	5,3	---
Dureza Total, mg/L CaCO_3	1.978,8	27,5	500,0
Sódio, mg/L Na^+	852,7	50,8	200,0
Potássio, mg/L K^+	32,0	1,6	---
Ferro Total, mg/L	0,01	0,01	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L CaCO_3	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L CaCO_3	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L CaCO_3	739,2	21,6	---
Alcalinidade Total, mg/L CaCO_3	739,2	21,6	---
Sulfato, mg/L SO_4^{--}	87,8	7,0	250,0
Cloreto, mg/L Cl^-	2.192,1	80,9	250,0
Nitrato, mg/L NO_3^-	0,04	0,0	10,0
Nitrito, mg/L NO_2^-	0,01	0,01	1,0
Silica, mg/L SiO_2	77,6	3,0	---
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	1,06	-3,78	≤ 0
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	4.615,0	180,0	1.000,0

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

Tabela A4 - Laudo das análises físico-químicas da água do sistema de dessalinização de Amorim antes da limpeza química, amostras coletadas em novembro de 2006.

PARÂMETROS	Poço	Concentrado	Permeado	VMP (*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25 °C	4.860,0	7.860,0	352,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,9	7,9	6,8	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	0,21	0,15	0,10	1,0 a 5,0
Cor	Não Objetável	Não Objetável	Não Objetável	Não Objetável
Dureza em Cálcio, mg/L Ca^{++}	140,5	248,0	4,2	---
Dureza em Magnésio, mg/L Mg^{++}	243,6	416,4	3,2	---
Dureza Total, mg/L CaCO_3	1.366,3	2.355,0	24,0	500,0
Sódio, mg/L Na^+	604,3	963,8	57,5	200,0
Potássio, mg/L K^+	23,6	32,7	2,1	---
Ferro Total, mg/L	0,01	0,02	0,01	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L CaCO_3	0,0	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L CaCO_3	102,0	232,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L CaCO_3	310,0	484,0	19,2	---
Alcalinidade Total, mg/L CaCO_3	412,0	716,0	19,2	---
Sulfato, mg/L SO_4^{--}	71,8	121,7	4,0	250,0
Cloreto, mg/L Cl^-	1.508,8	2.637,7	92,3	250,0
Nitrato, mg/L NO_3^-	0,13	0,04	0,01	10,0
Nitrito, mg/L NO_2^-	0,06	0,03	0,02	1,0
Silica, mg/L SiO_2	46,8	90,0	2,7	---
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	1,07	1,54	-2,8	≤ 0
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	3.580,0	5.961,0	214,0	1.000,0

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

Tabela A5 - Laudo das análises físico-químicas da água do sistema de dessalinização de Amorim após a limpeza química, amostras coletadas em novembro de 2006.

PARÂMETROS	Concentrado	Permeado	VMP (*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25 °C	7.910,0	369,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	8,0	7,0	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	0,12	0,13	1,0 a 5,0
Cor	Não Objetável	Não Objetável	Não Objetável
Dureza em Cálcio, mg/L Ca^{++}	267,0	5,6	---
Dureza em Magnésio, mg/L Mg^{++}	411,0	4,1	---
Dureza Total, mg/L CaCO_3	2.380,0	31,0	500,0
Sódio, mg/L Na^+	971,5	49,0	200,0
Potássio, mg/L K^+	31,3	1,6	---
Ferro Total, mg/L	0,02	0,01	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L CaCO_3	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L CaCO_3	236,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L CaCO_3	482,0	1,2	---
Alcalinidade Total, mg/L CaCO_3	718,0	1,2	---
Sulfato, mg/L SO_4^{--}	109,2	8,8	250,0
Cloreto, mg/L Cl^-	2.644,8	89,5	250,0
Nitrato, mg/L NO_3^-	0,04	0,01	10,0
Nítrito, mg/L NO_2^-	0,02	0,01	1,0
Silica, mg/L SiO_2	83,0	2,6	---
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	1,62	-3,68	≤ 0
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	6.050,4	191,0	1.000,0

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

Tabela A6 - Variação do pH e da condutividade elétrica da solução usada durante a primeira limpeza química dos elementos de membrana realizada no Sistema 1.

Tempo (min)	pH	K ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)
0	3,02	766
10	5,92	1015
20	5,90	1562
30	6,09	1618
40	6,15	3060
50	6,35	3070
60	6,29	3610
70	6,45	-
80	6,52	3780

Tabela A7 - Variação do pH e da condutividade elétrica da solução usada durante a segunda limpeza química dos elementos de membrana realizada no Sistema 1.

Tempo (min)	pH	K ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)
0	3,00	536
10	6,26	803
20	6,14	779
30	6,21	766
40	6,21	745
50	6,21	806
60	6,32	791
70	6,41	746
80	6,47	794
90	6,54	791
100	6,61	798
110	6,72	800

Tabela A8 – Monitoramento da condutividade elétrica, pH e vazão do permeado e concentrado antes e após a limpeza química no Sistema 1, para uma pressão de 16,0 kgf.cm⁻².

t (min)	K _p (μS.cm ⁻¹)	K _c (μS.cm ⁻¹)	pH _p	pH _c	Q _p (m ³ .h ⁻¹)	Q _c (m ³ .h ⁻¹)
0	500	12050	6,3	7,6	0,9	1,2
10	480	12230	6,3	7,6	0,9	1,2
20	480	12390	6,3	7,6	0,9	1,2
30	480	12570	6,2	7,6	0,9	1,2
40	460	12500	6,2	7,6	0,9	1,2
50	490	12710	6,2	7,6	0,9	1,2
60	490	12720	6,1	7,5	0,9	1,2
70	480	12850	6,2	7,5	0,9	1,2
80	480	12710	6,2	7,5	0,9	1,2
90	480	12960	6,2	7,5	0,9	1,2
100	480	12980	6,2	7,5	0,9	1,2
110	470	12800	6,2	7,5	0,9	1,2
120	480	12980	6,2	7,5	0,9	1,2
LIMPEZA QUÍMICA						
0	460	11890	6,2	7,5	0,9	1,2
10	440	11910	6,2	7,4	0,9	1,2
20	440	11940	6,2	7,4	0,9	1,2
30	430	11910	6,2	7,4	0,9	1,2
40	430	11900	6,1	7,4	0,9	1,2
50	450	11900	6,1	7,3	0,9	1,2
60	440	11890	6,1	7,4	0,9	1,2
70	440	11880	6,1	7,3	0,9	1,2
80	440	11880	6,1	7,4	0,9	1,2
90	440	11880	6,1	7,4	0,9	1,2
100	440	11890	6,1	7,4	0,9	1,2
110	440	11900	6,1	7,4	0,9	1,2
120	440	11900	6,1	7,4	0,9	1,2

r = 42,86 %

Tabela A9 – Monitoramento das pressões e vazões do Sistema 1.

DATA	P₁ Kgf.cm ⁻²	P₂ Kgf.cm ⁻²	P₃ Kgf.cm ⁻²	P₄ Kgf.cm ⁻²	P₅ Kgf.cm ⁻²	Q₁ m ³ .h ⁻¹	Q₂ m ³ .h ⁻¹
Jun/06	1,5	1,6	16,0	12,0	0,5	1,4	0,9
Ago/2006 (Antes Limpeza)	1,6	1,7	16,0	12,0	0,4	1,2	1,1
Ago/2006 (Após Limpeza)	1,4	1,6	15,0	12,0	0,4	1,5	1,4
Nov/2006 (Antes Limpeza)	1,6	1,6	16,0	12,0	0,5	1,2	0,9
Nov/2006 (Após Limpeza)	1,5	1,6	16,0	12,0	0,5	1,2	0,9
Jan/2007	1,6	1,7	16,0	12,7	0,5	1,2	0,9

Informações obtidas durante o diagnóstico técnico do sistema de dessalinização

As tampas dos copos de filtro apresentam vazamento, sendo necessária à substituição dos mesmos;

As mangueiras do tipo cristal e a mangueira da bomba dosadora estão sujas, se fazendo necessária a limpeza das mesmas;

A bombona de antiincrustante necessita de limpeza;

As membranas vêm sendo usadas há sete anos. Mesmo dentro das condições de operação, recomenda-se que o sistema fique sob o monitoramento periódico, e que seja realizada uma limpeza química das membranas periodicamente;

O sistema não possui tanque de armazenamento do concentrado.

Boletim técnico das membranas do Sistema 1



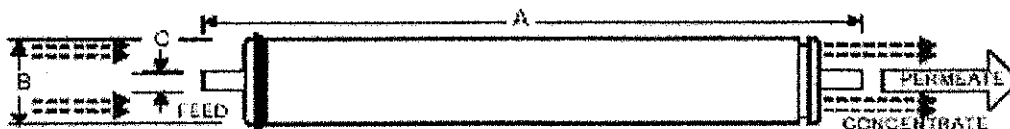
Membrane Element		CPA2-4040
Performance:	Permeate Flow:	2,250 gpd (8.5 m ³ /d)
	Salt Rejection: Minimum:	99.2 %
Type	Configuration:	Spiral Wound
	Membrane Polymer:	Composite Polyamide
	Nominal Membrane Area:	85 ft ²
Application Data*	Maximum Applied Pressure:	800 psig (4.16 MPa)
	Maximum Chlorine Concentration:	<0.1 PPM
	Maximum Operating Temperature:	113 °F (45 °C)
	Feedwater pH Range:	3.0 - 10.0
	Maximum Feedwater Turbidity:	1.0 NTU
	Maximum Feedwater SDI (15 cone):	5.0
	Maximum Feed Flow:	16 GPM (3.6 m ³ /h)
	Minimum Ratio of Concentrate to Permeate Flow for any Element:	5:1
Maximum Pressure Drop for Each Element:	10 ps	

* The limitations shown here are for general use. The values may be more conservative for specific projects to ensure the best performance and longest life of the membrane.

Test Conditions

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

- 1500 ppm NaCl solution
- 225 psi (1.55 MPa) Applied Pressure
- 77 °F (25 °C) Operating Temperature
- 55% Permeate Recovery
- 6.9 - 7.0 pH Range



A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)	Weight, lbs. (kg)
40.00 (1016)	3.95 (100.3)	2.76 (70.3)	6 (2.7)

Core tube extension = 1.95" (26.7 mm)

Notes: Permeate flow for individual membrane elements is 22 gpd (84 l/d) typical. All membrane elements are accepted with a 100% initial and intermediate and change. Membranes are accepted on a basis of polyamide bag containing less than 10% water moisture. The solution and pH requirements and flow performance are described in the technical data.

Performance between the information and data provided herein is approximate only. The information and data are offered in good faith but without guarantee, so that users are advised to use the products and/or services with care and to consult the manufacturer for further information. The manufacturer is not responsible for the application of the products and/or services to any specific project. © 2005 NITTO DENKO

Resultado da Simulação

NOME PROJETO: Sítio Amorim_Campina Grande_PB

FONTE ÁGUA: Água Poço

ANÁLISE ÁGUA

pH	7,90	
Turb	0,2	
E. cond	5595	uS/cm
Temp	25,0	C
TDS / Cond.	3079,0	ppm

Ion	mg/l	meq/l
Ca	140,5	7,01
Mg	243,6	20,05
Na	604,3	26,27
K	23,6	0,61
NH4	0,0	0,00
Ba	0,000	0,00
Sr	0,000	0,00
CO3	61,2	2,04
HCO3	378,2	6,20
SO4	71,8	1,50
Cl	1508,8	42,56
F	0,0	0,00
NO3	0,1	0,00
B	0,0	0,00
SiO2	46,80	

Índice Langelier Saturação	1,11
Pressão Osmótica	2,1 bar

DESENHO BÁSICO

Programa licenciado para:	Waneide Gomes Lopes		
Simulação feita por:	Sítio Amorim_Campina Grande_Pb		
Nome Projeto:	Vazão de permeado:	1,00	m3/hr
Potencia bomba:	2,4	m3/hr	Vazão água não
Pressão recomendada bomba.:	16,5	bar	2,4
Pressão alim.:	15,1	bar	Recup. permeado:
Temp. Alim.:	25,0	C(77F)	42,0
pH água alim.:	7,9		%
Dosagem quim, ppm (100%):	0,0	none	Idade do elem.:
CO2 acidificado alim.:	6,62		Declínio fluxo por ano
Average flux rate:	21,1	lm2hr	%:
			Aumento da pass. sal, %/ano:
			10,0
			Tipo alim.:
			Água Poço

Estágio	Perm. Fluxo m3/hr	Vazão/Vaso Alim. m3/hr	Conc m3/hr	Flux l/m2	Beta	Conc.&Contra P. Pressões bar	Elemento Tipo	Elem. No.	Arranjo
---------	-------------------	------------------------	------------	-----------	------	------------------------------	---------------	-----------	---------

1-1	0,5	2,4	1,8	23,0	1,10	14,0	0,0	CPA2-4040	3	1x3
1-2	0,5	1,8	1,4	19,3	1,10	13,0	0,0	CPA2-4040	3	1x3

Ion	Água alim.		Permeado		Conc.	
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l
Ca	140,5	7,0	1,442	0,1	241,2	12,0
Mg	243,6	20,0	2,501	0,2	418,2	34,4
Na	604,3	26,3	29,577	1,3	1020,5	44,4
K	23,6	0,6	1,441	0,0	39,6	1,0
NH4	0,0	0,0	0,000	0,0	0,0	0,0
Ba	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0
Sr	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0
CO3	61,2	2,0	0,182	0,0	105,4	3,5
HCO3	378,2	6,2	19,979	0,3	637,6	10,5
SO4	71,8	1,5	0,532	0,0	123,4	2,6
Cl	1508,8	42,6	44,513	1,3	2569,1	72,5
F	0,0	0,0	0,000	0,0	0,0	0,0
NO3	0,1	0,0	0,021	0,0	0,2	0,0
B	0,00		0,000		0,00	
SiO2	46,8		1,28		79,8	
TDS	3078,9		101,5		5235,0	
pH	7,9		6,7		8,1	

Índice Langelier Saturação	Água alim.	Conc.
Pressão Osmótica	1,11	1,76
	2,1 bar	3,6 bar

DESENHO BÁSICO

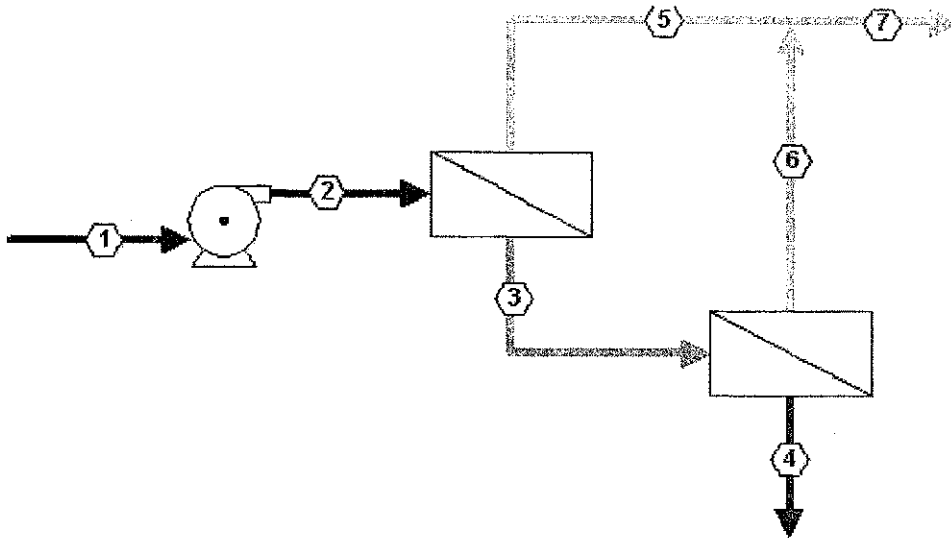
Programa licenciado para:	Waneide Gomes Lopes		
Simulação feita por:	Sítio Amorim_Campina Grande_Pb		
Nome Projeto:	Vazão de permeado:	1,00	m3/hr
Potencia bomba:	2,4	m3/hr	Vazão água não
Pressão recomendada bomba.:	16,5	bar	2,4
Pressão alim.:	15,1	bar	Recup. permeado:
Temp. Alim.:	25,0	C(77F)	42,0
pH água alim.:	7,9		%
Dosagem quim. ppm (100%):	0,0	none	Idade do elem.:
CO2 acidificado alim.:	6,62		7,0
			Declínio fluxo por ano
			%:
			Aumento da pass. sal,
			10,0
			%/ano:
Average flux rate:	21,1	lm2hr	Tipo alim.:
			Água Poço

Estágio	Perm. Fluxo m3/hr	Vazão/Vaso Alim. m3/hr	Conc m3/hr	Fluxo l/m2-hr	Beta	Conc.&Contra Pressões bar	Elemento Tipo	Elem. No.	Arranj
1-1	0,5	2,4	1,8	23,0	1,10	14,0 0,0	CPA2-4040	3	1x3
1-2	0,5	1,8	1,4	19,3	1,10	13,0 0,0	CPA2-4040	3	1x3

Está ggio	El em no.	Alim. pres bar	Pres perd bar	Perm vazã m3/h r	Perm Fluxo lm2hr	Beta	Perm sal TDS / Cond.	Con c osm pres	Saturação Conc.				Lang.
									CaSO4	SrSO4	BaSO4	SiO2	
1-1	1	15,1	0,4	0,2	23,9	1,08	64,6	2,3	1	0	0	36	2,4
1-1	2	14,7	0,4	0,2	22,9	1,10	69,1	2,5	1	0	0	39	2,5
1-1	3	14,3	0,3	0,2	21,8	1,10	75,3	2,7	1	0	0	43	2,5

1-2	1	13,8	0,3	0,2	20,3	1,09	83,1	3,0	2	0	0	47	2,6
1-2	2	13,5	0,3	0,2	19,2	1,10	92,5	3,3	2	0	0	52	2,7
1-2	3	13,3	0,2	0,1	18,2	1,10	103,2	3,6	2	0	0	57	2,7

DIAGRAMAÇÃO DA SIMULAÇÃO



	1	2	3	4	5	6	7
Fluxo m ³ /hr	2,4	2,4	1,8	1,4	0,5	0,5	1,0
Pressão: bar	0,0	15,1	14,0	13,0	0,0	0,0	0,0
TDS (ppm)	3078,9	3078,9	3968,6	5235,0	73,7	134,6	101,5

ANEXO II

DADOS EXPERIMENTAIS

O Anexo II refere-se às Tabelas de dados experimentais, informações adicionais obtidas durante a realização do diagnóstico técnico, boletim técnico da membrana e simulação referentes ao Sistema de Dessalinização do Sítio Carretão situado no Município de Campina Grande - PB (Sistema 2).

As análises físico-químicas das águas coletadas foram realizadas pelo LABDES.

Tabela B1 – Laudo das análises físico-químicas da água do sistema de dessalinização de Carretão, amostras coletadas em setembro de 2005.

PARÂMETROS	Poço	Concentrado	Permeado	VMP (*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25 °C	11.580	16.340	5.420	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	8,0	7,5	8,1	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	0,00	0,00	0,00	1,0 a 5,0
Cor	Objetável	Objetável	Objetável	Não objetável
Dureza em Cálcio, mg/L Ca ⁺⁺	260,0	379,0	102,5	---
Dureza em Magnésio, mg/L Mg ⁺⁺	471,6	744,3	158,4	---
Dureza Total, mg/L CaCO ₃	2.615,0	4.048,8	916,3	500,0
Sódio, mg/L Na ⁺	1.892,4	2.392,2	956,2	200,0
Potássio, mg/L K ⁺	35,4	53,5	24,3	---
Ferro Total, mg/L	0,00	0,01	0,01	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L CaCO ₃	0,0	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L CaCO ₃	129,6	100,0	37,6	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L CaCO ₃	164,4	156,4	87,6	---
Alcalinidade Total, mg/L CaCO ₃	294,0	256,4	125,2	---
Sulfato, mg/L SO ₄ ⁻⁻	118,6	269,9	199,8	250,0
Cloreto, mg/L Cl ⁻	4.322,1	6.169,9	1.805,2	250,0
Nitrato, mg/L NO ₃ ⁻	0,00	0,00	0,00	10,0
Nitrito, mg/L NO ₂ ⁻	0,01	0,02	0,01	1,0
Silica, mg/L SiO ₂	35,0	55,0	12,8	---

ISL (Índice de Saturação de Langelier)	0,77	1,23	0,62	≤ 0
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	9.261	13.755	3.475	1.000,0

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

Tabela B2 – Laudo das análises físico-químicas da água do sistema de dessalinização de Carretão, amostras coletadas em fevereiro de 2006.

PARÂMETROS	Poço	Concentrado	Permeado	VMP (*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25 °C	13.890,0	17.610,0	294,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	8,5	8,6	7,7	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	0,03	0,15	0,00	1,0 a 5,0
Cor	Não Objetável	Não Objetável	Não Objetável	Não objetável
Dureza em Cálcio, mg/L Ca^{++}	277,0	336,0	0,3	---
Dureza em Magnésio, mg/L Mg^{++}	580,8	769,2	0,4	---
Dureza Total, mg/L CaCO_3	3.112,5	4.045,0	2,3	500,0
Sódio, mg/L Na^+	2.875,4	3.678,6	42,3	200,0
Potássio, mg/L K^+	99,8	118,2	1,2	---
Ferro Total, mg/L	0,02	0,02	0,01	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L CaCO_3	0,0	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L CaCO_3	120,0	136,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L CaCO_3	243,0	305,0	3,0	---
Alcalinidade Total, mg/L CaCO_3	363,0	441,0	3,0	---
Sulfato, mg/L SO_4^{--}	1.280,6	1.765,3	1,5	250,0
Cloreto, mg/L Cl^-	5.349,9	7.082,3	67,5	250,0
Nitrato, mg/L NO_3^-	0,00	0,00	0,00	10,0
Nitrito, mg/L NO_2^-	0,01	0,01	0,00	1,0
Silica, mg/L SiO_2	38,8	53,6	0,2	---
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	1,86	2,08	-3,78	≤ 0
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	11.141,0	14.304,0	117,0	1.000,0

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

Tabela B3 - Laudo das análises físico-químicas da água do sistema de dessalinização de Carretão antes da limpeza química, amostras coletadas em janeiro de 2007.

PARÂMETROS	Poço	Concentrado	Permeado	VMP (*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm a } 25^\circ\text{C}$	11.680,0	15.810,0	706,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,2	7,3	5,7	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	0,26	0,18	0,10	1,0 a 5,0
Cor	Não Objetável	Não Objetável	Não Objetável	Não objetável
Dureza em Cálcio, mg/L Ca^{++}	305,0	463,0	1,6	---
Dureza em Magnésio, mg/L Mg^{++}	460,2	687,6	0,4	---
Dureza Total, mg/L CaCO_3	2.680,0	4.022,5	5,5	500,0
Sódio, mg/L Na^+	2.096,2	3.186,5	128,1	200,0
Potássio, mg/L K^+	59,1	85,0	3,3	---
Ferro Total, mg/L	0,02	0,03	0,01	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L CaCO_3	0,0	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L CaCO_3	68,0	232,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L CaCO_3	426,0	504,0	16,0	---
Alcalinidade Total, mg/L CaCO_3	494,0	736,0	16,0	---
Sulfato, mg/L SO_4^{--}	600,0	733,2	1,5	250,0
Cloreto, mg/L Cl^-	4.324,0	6.514,3	184,6	250,0
Nitrato, mg/L NO_3^-	0,04	0,04	0,01	10,0
Nitrito, mg/L NO_2^-	0,01	0,01	0,01	1,0
Silica, mg/L SiO_2	33,2	46,0	1,0	---
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	0,66	1,15	-4,39	≤ 0
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C , mg/L	9.788,0	13.564,0	382,0	1.000,0

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

Tabela B4 - Laudo das análises físico-químicas da água do sistema de dessalinização de Carretão após a limpeza química, amostras coletadas em janeiro de 2007.

PARÂMETROS	Concentrado	Permeado	VMP (*)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25 °C	15.950,0	713,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,4	5,8	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	0,13	0,10	1,0 a 5,0
Cor	Não Objetável	Não Objetável	Não Objetável
Dureza em Cálcio, mg/L Ca^{++}	450,0	1,8	---
Dureza em Magnésio, mg/L Mg^{++}	669,6	0,4	---
Dureza Total, mg/L CaCO_3	3.915,0	6,0	500,0
Sódio, mg/L Na^+	3.201,7	126,8	200,0
Potássio, mg/L K^+	91,0	3,5	---
Ferro Total, mg/L	0,03	0,02	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L CaCO_3	0,0	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L CaCO_3	240,0	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L CaCO_3	482,0	19,2	---
Alcalinidade Total, mg/L CaCO_3	722,0	19,2	---
Sulfato, mg/L SO_4^{--}	742,1	2,4	250,0
Cloreto, mg/L Cl^-	6.567,5	186,7	250,0
Nitrato, mg/L NO_3^-	0,04	0,01	10,0
Nitrito, mg/L NO_2^-	0,01	0,01	1,0
Sílica, mg/L SiO_2	46,0	1,1	---
ISL (Índice de Saturação de Langelier)	1,23	-4,15	≤ 0
Total de Sólidos Dissolvidos Secos a 180°C, mg/L	13.634,0	364,0	1.000,0

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

Tabela B5 - Variação do pH e da condutividade da solução usada durante a limpeza química dos elementos de membrana realizada no Sistema 2.

Tempo (min)	pH	K ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)
0	3,3	1010
10	5,8	2070
20	5,8	2090
30	5,9	2090
40	5,9	2013
50	6,0	2014
60	6,0	2015
70	6,1	2015
80	6,1	2016
90	6,2	2017
100	6,2	2017
110	6,3	2017

Tabela B6 – Monitoramento da condutividade elétrica, pH e vazão do permeado e concentrado antes e após a limpeza química no Sistema 2, para uma pressão de $13,8 \text{ kgf.cm}^{-2}$.

t (min)	K_p ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	K_c ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	pH _p	pH _c	Q_p ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$)	Q_c ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$)
0	680	20700	5,9	7,5	0,55	1,2
10	710	20940	5,9	7,5	0,55	1,2
20	710	20740	5,9	7,5	0,55	1,2
30	700	21230	6,0	7,5	0,55	1,2
40	730	21240	6,0	7,5	0,55	1,2
50	710	21680	6,1	7,5	0,55	1,2
60	690	21400	5,9	7,4	0,55	1,2
70	700	21720	6,0	7,4	0,55	1,2
80	710	21340	5,9	7,4	0,55	1,2
90	700	22120	6,0	7,4	0,55	1,2

100	700	21380	6,0	7,4	0,55	1,2
110	700	21400	6,0	7,4	0,55	1,2
120	700	22280	6,0	7,4	0,55	1,2
LIMPEZA QUÍMICA						
0	630	19690	5,7	7,2	0,55	1,2
10	630	19570	5,8	7,2	0,55	1,2
20	640	19760	5,7	7,2	0,55	1,2
30	640	19630	5,7	7,2	0,55	1,2
40	660	19690	5,9	7,2	0,55	1,2
50	660	19690	6,0	7,3	0,55	1,2
60	680	19520	5,8	7,2	0,55	1,2
70	690	19440	5,8	7,3	0,55	1,2
80	690	19440	5,9	7,2	0,55	1,2
90	690	19420	5,8	7,2	0,55	1,2
100	690	19390	5,8	7,3	0,55	1,2
110	690	19360	5,7	7,3	0,55	1,2
120	690	19380	5,7	7,3	0,55	1,2

$r = 31,43\%$

Tabela B7 – Monitoramento das pressões e vazões do Sistema 2.

DATA	P₁ Kgf.cm ⁻²	P₂ Kgf.cm ⁻²	P₃ Kgf.cm ⁻²	P₄ Kgf.cm ⁻²	P₅ Kgf.cm ⁻²	Q₁ m ³ .h ⁻¹	Q₂ m ³ .h ⁻¹
Ago/06	-	-	13,5	14,5	0,4	1,2	0,6
Jan/07 (Antes Limpeza)	-	-	13,8	14,5	0,4	1,2	0,55
Jan/07 (Após Limpeza)	-	-	13,8	14,0	0,4	1,2	0,55

Os manômetros P1 e P2, referentes as pressões de entrada e saída dos filtros não funcionam.

Informações obtidas durante o diagnóstico técnico do sistema de dessalinização

Os filtros de cartucho precisam ser substituídos;

As mangueiras do tipo cristal precisam ser substituídas, pois as mesmas encontram-se ressecadas;

O vaso de alta pressão apresenta vazamento entre o vaso e as tampas;

É necessária a troca das membranas, pois as mesmas estão comprometendo a qualidade do permeado;

Os rotômetros encontram-se sujos e precisam ser substituídos;

O manômetro da entrada do filtro não funciona e por isso precisa ser substituído;

A bomba dosadora está quebrada;

As tampas do reservatório de alimentação e do permeado precisam ser substituídas;

Assim como o sistema anterior, este sistema não possui reservatório de concentrado.

Conforme diagnóstico técnico realizado em setembro de 2005 o dessalinizador do Sistema 2 encontrava-se em funcionamento precário e necessitava ser recuperado. O mesmo foi recuperado com auxílio do Programa Água Doce da SRH/MMA em janeiro de 2006. Atualmente o sistema se encontra funcionando normalmente.

Boletim técnico das membranas do Sistema 2



Membrane Element		CPA2-4040
Performance:	Permeate Flow:	2,250 gpd (8.5 m ³ /d)
	Salt Rejection: Minimum:	99.2 %
Type	Configuration:	Spiral Wound
	Membrane Polymer:	Composite Polyamide
	Nominal Membrane Area:	85 ft ²
Application Data*	Maximum Applied Pressure:	600 psig (4.16 MPa)
	Maximum Chlorine Concentration:	< 0.1 PPM
	Maximum Operating Temperature:	113 °F (45 °C)
	Feedwater pH Range:	3.0 - 10.0
	Maximum Feedwater Turbidity:	1.0 NTU
	Maximum Feedwater SDI (15 min.):	5.0
	Maximum Feed Flow:	16 GPM (3.6 m ³ /h)
	Minimum Ratio of Concentrate to Permeate Flow for any Element:	5:1
Maximum Pressure Drop for Each Element:	10 psi	

* The limitations shown here are for general use. The values may be more conservative for specific projects to ensure the best performance and longest life of the membrane.

Test Conditions

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

- 1000 PPM NaCl solution
- 225 psig (1.55 MPa) Applied Pressure
- 77 °F (25 °C) Operating Temperature
- 15% Permeate Recovery
- 6.5 - 7.0 pH Range



A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)	Weight, lbs. (kg)
40.00 (1016)	3.25 (108.3)	0.75 (19.1)	6 (9.8)

Core tube extension = 1.06" (26.7 mm)

Notes: Permeate flow for individual elements may vary by 30% to 10% per unit. All membrane elements are packed with a steel wire mesh for support, and storage barrels are wrapped in a second polyethylene bag containing two liter 10% sodium hypochlorite solution and 10% propanol glycol, and then packaged in a cardboard box.

No warranty is made by the manufacturer and distributor for the use of the membrane elements for purposes other than those for which they are specifically designed. The manufacturer and distributor are not responsible for any damage or loss of performance resulting from the use of the membrane elements for purposes other than those for which they are specifically designed. The user is responsible for determining the appropriate use of the membrane products for their own specific end uses. N00000

Resultado da Simulação

NOME PROJETO: Sítio Carretão_Campina Grande_PB

FONTE ÁGUA: Água Poço

ANÁLISE ÁGUA

pH	7,20	
Turb	0,3	
E. cond	14259	uS/cm
Temp	25,0	C
TDS / Cond.	8438,0	ppm

Ion	mg/l	meq/l
Ca	305,0	15,21
Mg	460,2	37,88
Na	2096,2	91,14
K	59,1	1,52
NH4	0,0	0,00
Ba	0,000	0,00
Sr	0,000	0,00
CO3	40,8	1,36
HCO3	519,7	8,52
SO4	600,0	12,50
Cl	4324,0	121,97
F	0,0	0,00
NO3	0,0	0,00
B	0,0	0,00
SiO2	33,20	

Índice Langelier Saturação	0,79
Pressão Osmótica	5,9 bar

DESENHO BÁSICO

Programa licenciado para:			
Simulação feita por:	Waneide Gomes Lopes		
Nome Projeto:	Sítio Carretão_Campina Grande_PB	Vazão de permeado:	0,60 m3/hr
Potencia bomba:	1,9 m3/hr	Vazão água nao	1,9 m3/hr
Pressao recomendada bomba.:	17,9 bar		
Pressao alim.:	16,8 bar	Recup. permeado:	31,0 %
Temp. Alim.:	25,0 C(77F)	Idade do elem.:	1,0 anos
pH água alim:	7,2	Declínio fluxo por ano %:	7,0
Dosagem quim, ppm (100%):	0,0 none	Aumento da pass. sal, %/ano:	10,0
CO2 acidificado alim:	41,88	Tipo alim.:	Água Poço
Average flux rate:	25,3 lm2hr		

Estágio	Perm. Fluxo m3/hr	Vazão/Vaso Alim. m3/hr	Conc m3/hr	Fluxo l/m2-	Beta	Conc.&Contra P. Pressões bar		Elemento Tipo	Elem. No.	Arranjo
1-1	0,6	1,9	1,3	25,3	1,10	16,0	0,0	CPA2-4040	3	1x3

Ion	Água alim.		Permeado		Conc.	
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l
Ca	305,0	15,2	1,683	0,1	441,3	22,0
Mg	460,2	37,9	2,540	0,2	665,8	54,8
Na	2096,2	91,1	55,369	2,4	3013,1	131,0
K	59,1	1,5	1,950	0,0	84,8	2,2
NH4	0,0	0,0	0,000	0,0	0,0	0,0
Ba	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0
Sr	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0
CO3	40,8	1,4	0,080	0,0	59,1	2,0
HCO3	519,7	8,5	18,262	0,3	745,0	12,2
SO4	600,0	12,5	2,942	0,1	868,2	18,1
Cl	4324,0	122,0	84,619	2,4	6228,6	175,7
F	0,0	0,0	0,000	0,0	0,0	0,0
NO3	0,0	0,0	0,000	0,0	0,0	0,0
B	0,00	0,0	0,000	0,0	0,00	0,0
SiO2	33,2		0,55		47,9	
TDS	8438,2		168,0		12153,8	
pH	7,2		5,9		7,3	

	Água alim.	Conc.
Índice Langelier Saturação	0,79	1,23
Pressão Osmótica	5,9 bar	8,5 bar

DESENHO BÁSICO

Programa licenciado para:
 Simulação feita por: Waneide Gomes Lopes
 Nome Projeto: Sítio Carretão_Campina Grande_PB

Vazão de permeado: 0,60 m3/hr
 Vazão água não: 1,9 m3/hr

Potência bomba: 1,9 m3/hr
 Pressão recomendada bomba.: 17,9 bar

Pressão alim.: 16,8 bar
 Temp. Alim.: 25,0 C(77F)
 pH água alim.: 7,2
 Dosagem quim, ppm (100%): 0,0 none
 CO2 acidificado alim.: 41,88

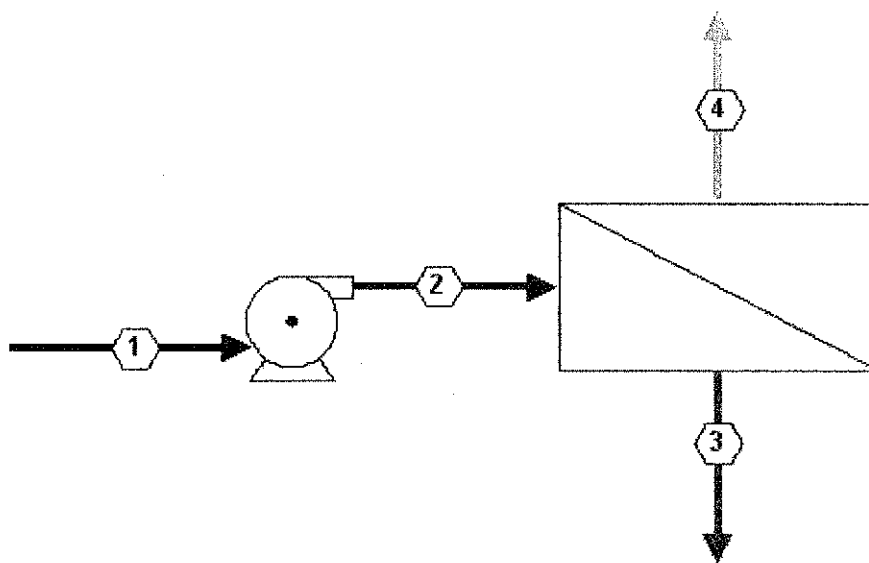
Recup. permeado: 31,0 %
 Idade do elem.: 1,0 anos
 Declínio fluxo por ano %: 7,0
 Aumento da pass. sal, %/ano: 10,0

Average flux rate: 25,3 l/m2hr
 Tipo alim.: Água Poço

Estágio	Perm. Fluxo m3/hr	Vazão/Vaso Alim. m3/hr	Conc m3/hr	Fluxo l/m2	Beta	Conc.&Contra P. Pressões bar		Elemento Tipo	Elem. No.	Arranjo
1-1	0,6	1,9	1,3	25,3	1,10	16,0	0,0	CPA2-4040	3	1x3

Estágio	Elem no.	Saturação Conc.												
		Alim. pres bar	Pres perd bar	Perm vazão m3/hr	Perm Fluxo l/m2hr	Beta	Perm sal TDS / Cond.	Conc osm pres	CaSO4	SrSO4	BaSO4	SiO2	Lang	
1-1	1	16,8	0,3	0,2	28,3	1,12	134,8	6,7	11	0	0	27	0,9	
1-1	2	16,5	0,3	0,2	25,2	1,10	150,5	7,6	13	0	0	30	1,1	
1-1	3	16,2	0,2	0,2	21,9	1,10	170,2	8,5	15	0	0	34	1,2	

DIAGRAMAÇÃO DA SIMULAÇÃO



		1	2	3	4
Fluxo	m ³ /hr	1,9	1,9	1,3	0,6
Pressão:	bar	0,0	16,8	16,0	0,0
TDS (ppm)		8438,2	8438,2	12153,8	168,0