

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
LABORATÓRIO DE REFERÊNCIA EM DESSALINIZAÇÃO DA SRH/MMA**

**COMPARAÇÃO DE DOIS SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO VIA
OSMOSE INVERSA E OS EFEITOS DA LIMPEZA QUÍMICA DOS
ELEMENTOS DE MEMBRANAS**

ESTER PIRES DE ALMEIDA

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

Março de 2003

**COMPARAÇÃO DE DOIS SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE
INVERSA E OS EFEITOS DA LIMPEZA QUÍMICA DOS ELEMENTOS DE
MEMBRANAS**

ESTER PIRES DE ALMEIDA

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

Área de Concentração: **Operações e Processos**

Orientador: **Prof. Kepler Borges França (Dr.)**

**Campina Grande – Paraíba
Março de 2003**



A447c

Almeida, Ester Pires de

Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas/ Ester Pires de Almeida – Campina Grande: UFCG, 2003.

81p. : il.

Dissertação (Mestrado). UFCG/CCT

Inclui bibliografia

1.Osmose Inversa 2.Dessalinização 3.Membranas I. Título

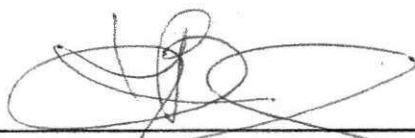
CDU: 544.725.7

**“COMPARAÇÃO DE DOIS SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE
INVERSA E OS EFEITOS DA LIMPEZA QUÍMICA DOS ELEMENTOS DE
MEMBRANAS”**

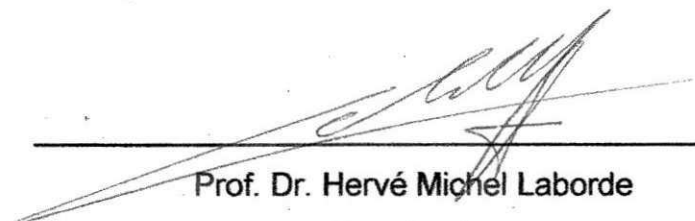
ESTER PIRES DE ALMEIDA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 27, 03, 2003

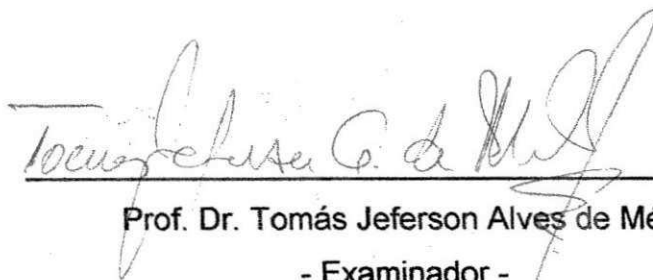
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Kepler Borges França
- Orientador -



Prof. Dr. Hervé Michel Laborde
- Examinador -



Prof. Dr. Tomás Jeferson Alves de Mélo
- Examinador -

DEDICATÓRIA

*A minha mãe, meu pai in memoriam,
minha querida filha Lis e familiares.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar eu agradeço à Deus por ter me proporcionado mais esta chance na vida, na hora certa e no lugar certo.

A minha mãe, filha e familiares pelo incentivo e atenção.

Ao meu namorado Netário que me deu grande apoio e incentivo, me fornecendo material para coleta das análises.

Ao meu orientador, professor Dr. Kepler Borges França, pela orientação e ensinamentos no desenvolvimento dessa pesquisa.

A todos do Laboratório de Referência em Dessalinização.

A todos os professores do mestrado em Engenharia Química, em especial ao professor Dr. Romildo Brito, pelo apoio e amizade.

Aos amigos da pós-graduação com carinho especial a Shefora, Rucilana, Kleberson, Arleide.

A Dona Maria José e Maricé pela colaboração prestada durante o curso de mestrado.

A coordenação da Pós-Graduação em Engenharia Química, em nome do Prof. Luiz Gonzaga S. Vasconcelos, pela atenção.

A CAPES pelo suporte financeiro.

E finalmente à todos que contribuíram direto ou indiretamente com este trabalho.

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar o desempenho de dois sistemas de dessalinização (I) e (II) via osmose inversa e estudar os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas. O sistema (I) é constituído de três elementos de membranas em série e o Sistema (II) com dois elementos de membranas em paralelo seguido com outro em série. Em função do arranjo dos elementos, o Sistema (I) apresentou melhores resultados em termos de recuperação, chegando atingir 54 % acima da recuperação do sistema (II).

PALAVRAS-CHAVE: osmose inversa, dessalinização, membranas.

ABSTRACT

The present work has as objective to evaluate the performance of two desalination system (I) e (II) by reverse osmosis and to study the effect of membranes cleaning. The system (I) is constituted of three elements of membranes in series and System (II) with two elements of membranes in parallel followed with one another in serie. As a function of the arrangement of the elements the system (I) presented better results in term of recovery which was 54% above of the recovery of system (II).

KEY WORDS: reverse osmosis, desalination, membranes.

Índice de Figuras.....	i
Índice de Tabelas.....	iii
Simbologia.....	vii

CAPÍTULO I

1- Introdução.....	1
---------------------------	----------

CAPÍTULO II

2 – Revisão Bibliográfica	6
2.1 - O processo de dessalinização	6
2.2 – Membranas.....	6
2.3 - Membranas semipermeáveis	7
2.3.1- Processo de separação por membranas.....	8
2.4 – Osmose	9
2.5 – Osmose inversa.....	10
2.5.1- Vantagens e aplicações de osmose inversa	10
2.5.2- Dessalinização da água do mar por osmose inversa	11
2.6 - Equações empíricas do processo de osmose inversa.....	12
2.6.1 - Fluxo do permeado.....	12
2.6.2 - Fluxo da passagem de sais	14
2.6.3 - Pressão osmótica	14
2.6.4- Taxa de rejeição de sais.....	15
2.6.5 - Recuperação	16
2.7 – Balanço de massa para o sistema I e II de osmose inversa	16
2.8 – Polarização de Concentração	22
2.9 – Pré-tratamento para água de poço tubular.....	24
2.10 – Indicadores de incrustações.....	25
2.11 – Incrustações	26
2.12 – Pós-tratamento	28
2.12.1- Estabilização	28
2.12.2- Desinfecção.....	29
2.11.2.1- Radiação ultravioleta	29

2.11.2.2- Cloração	30
2.12 – Limpeza química das membranas.....	30

CAPÍTULO III

3 - Experimental.....	32
3.1 – Água para estudo	32
3.2 – Produtos químicos	32
3.3 – Equipamentos.....	32
3.4 – Análises físico-químicas.....	33
3.5 – Características e composição das membranas	35
3.6 – Sistema de dessalinização via osmose inversa.....	37
3.6.1 - Processo experimental	38
3.7 – Processo de limpeza dos elementos de membranas.....	40

CAPÍTULO IV

4 - Resultados e discussão.....	41
4.1 – Avaliação do processo de dessalinização em função da pressão, vazão e recuperação.....	41
4.2 – Comportamento do potencial hidrogeniônico, antes e após limpeza química ...	42
4.3 – Variação da condutividade elétrica antes e após limpeza química	44
4.4 – Comportamento do coeficiente de transferência de massa.	46
4.5 – Comportamento da quantidade de STD (sólidos totais dissolvidos) para o Sistema I e II.....	48
4.6 – Comportamento do fluxo da passagem de sais para o sistema I e II.....	49
4.7 – Comportamento do fluxo do permeado	50
4.8 - Comportamento da concentração de sais presentes na água antes e após a limpeza química.....	50
4.9 – Comportamento da vazão do permeado e concentrado em função do tempo ..	52
4.10 – Comportamento do Índice de saturação de Langelier (ISL).....	53

CAPÍTULO V

5 - Conclusões.....	55
----------------------------	-----------

CAPÍTULO VI	
6 – Sugestões para trabalhos futuros.....	56
CAPÍTULO VII	
7- Referências bibliográficas.....	57
CAPÍTULO VIII	
Apêndice I.....	60
Apêndice II.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: Porcentagem de água no planeta.....	1
FIGURA 2: Membrana espiral de osmose inversa.....	7
FIGURA 3: Tipos de membranas ou processos de filtração.....	9
FIGURA 4: Sistema de osmose inversa.....	10
FIGURA 5: Sistema experimental constituído de três elementos de membranas em série.....	17
FIGURA 6: Sistema experimental constituído de dois elementos de membranas em paralelo em série com um terceiro.....	17
FIGURA 7: Condições da camada limite na membrana /interface.....	23
FIGURA 8: Sistema de dessalinização via osmose inversa.....	38
FIGURA 9: Variação do pH com o tempo, do permeado e concentrado sob o efeito da pressão de 10 kgf/cm ² da água do poço do convento das Clarissas antes e após limpeza, sistema I.....	43
FIGURA 10: Variação do pH com o tempo, antes e após limpeza química, da água permeada em cada elemento de membrana, sob efeito da pressão de 10 Kgf/cm ² , da água do poço do convento das Clarissas, Sistema I.....	43
FIGURA 11: Variação do pH do concentrado e permeado com o tempo, sob o efeito da pressão de 12 kgf/cm ² da água do poço do convento das Clarissas, C. Grande-PB.	44
FIGURA 12: Variação do pH da água de cada elemento de membrana com o tempo, sob o efeito da pressão de 12 kgf/cm ² , Sistema I, água do poço do convento das Clarissas.....	44
FIGURA 13: Variação da condutividade elétrica com o tempo do permeado e concentrado, sob o efeito da P = 8,0 kgf/cm ² , Sistema I, antes e após limpeza química, da água do poço do convento das Clarissas.	45
FIGURA 14: Variação da condutividade elétrica com o tempo da água de cada elemento de membrana, sob efeito da P= 8,0 kgf/cm ² , Sistema I, água do poço do convento das Clarissas.....	45
FIGURA 15: Variação do coeficiente de transferência de massa do solvente com a pressão aplicada, para o Sistema I, antes e após a limpeza química.....	47
FIGURA 16: Variação do coeficiente de transferência de massa do soluto com a pressão aplicada, para o Sistema I, antes e após a limpeza química.....	47

FIGURA 17: Variação do coeficiente de transferência de massa do solvente com a pressão aplicada, para o Sistema II, antes e após limpeza química.....	47
FIGURA 18: Variação do coeficiente de transferência de massa do soluto com a pressão aplicada, para o Sistema II, antes e após limpeza química.....	47
FIGURA 19: Variação dos STD com a pressão aplicada do concentrado, antes e após a limpeza química, Sistema I.....	48
FIGURA 20: Variação dos STD com a pressão aplicada do permeado, antes e após a limpeza química, Sistema I.....	48
FIGURA 21: Variação dos STD com a pressão aplicada do concentrado, antes e após a limpeza química, Sistema II.....	49
FIGURA 22: Variação do fluxo da passagem de sais com a pressão aplicada, para o sistema I.....	49
FIGURA 23: Variação do fluxo da passagem de sais com a pressão aplicada, para o sistema II.....	49
FIGURA 24: Variação do fluxo do permeado com a diferença de pressão aplicada, para o sistema I.....	50
FIGURA 25: Variação do fluxo do permeado com a diferença de pressão aplicada, para o sistema II.....	50
FIGURA 26: Concentração de sais presentes na água do poço Luiza Motta, sob $P = 6,0 \text{ kgf/cm}^2$ antes e após limpeza química.....	51
FIGURA 27: Concentração de sais presentes na água do poço Luiza Motta, sob $P = 8,0 \text{ kgf/cm}^2$ antes e após limpeza química.....	51
FIGURA 28: Vazão do permeado e concentrado em função do tempo, sob pressão de $8,0 \text{ kgf/cm}^2$, poço Luiza Motta.....	52
FIGURA 29: Vazão do permeado e concentrado em função do tempo, sob pressão de $7,0 \text{ kgf/cm}^2$, poço Catingueira.....	53

PARTE I

TABELA 1: Relação entre porosidade da membrana, pressão de operação e rendimento total do processo..... 8

TABELA 2: Consumo de energia para destilação e osmose inversa para dessalinização da água do mar..... 12

TABELA 4.1: Variação da produção do permeado, concentrado e recuperação da água do poço de Nova Floresta-PB de STD = 2163,00 mg/L T=26°C, para o Sistema41

TABELA 4.2: Variação da produção do permeado, concentrado e recuperação para água do poço de Nova Floresta-PB de STD = 1820,12 mg/L T=26°C, para o Sistema II.42

TABELA 4.3: Comportamento do ISL para diversas águas estudadas no nosso trabalho 54

TABELA A1: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,92$ mS/cm, $pH_a = 4,60$, $P_s = 8$ kgf/cm², $P_a = 9$ kgf/cm², $Q_p = 1,0$ L/min, $Q_c = 0,68$ L/min, antes da limpeza 61

TABELA A2: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,87$ mS/cm, $pH_a = 4,60$, $P_s = 10$ kgf/cm², $P_a = 11$ kgf/cm², $Q_p = 0,8$ L/min, $Q_c = 0,7$ L/min, antes da limpeza. 61

TABELA A3: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,87$ mS/cm, $pH_a = 4,60$, $P_s = 12$ kgf/cm², $P_a = 13$ kgf/cm², $Q_p = 1,05$ L/min, $Q_c = 0,4$ L/min, antes da limpeza 61

TABELA A4: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,58$ mS/cm, $pH_a = 4,60$, $P_s = 14$ kgf/cm², $P_a = 16$ kgf/cm², $Q_p = 1,19$ L/min, $Q_c = 0,2$ L/min, antes da limpeza 62

TABELA A5: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,74$ mS/cm, $pH_a = 3,96$, $P_s = 8$ kgf/cm², $P_a = 9$ kgf/cm², $Q_p = 0,55$ LPM, $Q_c = 0,9$ LPM, após limpeza..... 62

TABELA A6: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,84$ mS/cm, $pH_a = 3,80$, $P_s = 10$ kgf/cm², $P_a = 11$ kgf/cm², $Q_p = 0,72$ L/min, $Q_c = 0,6$ L/min, após limpeza 62

TABELA A7: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,78$ mS/cm, $pH_a = 3,88$, $P_s = 12$ kgf/cm², $P_a = 14$ kgf/cm², $Q_p = 0,82$ L/min, $Q_c = 0,3$ L/min, após limpeza 63

TABELA A8: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,65$ mS/cm, $pH_a = 3,95$, $P_s = 14$ kgf/cm ² , $P_a = 16$ kgf/cm ² , $Q_p = 0,8$ L/min, $Q_c = 0,1$ L/min, após limpeza.....	63
TABELA A9: Dados experimentais do Sistema II; $K_a = 3,36$ mS/cm, $pH_a = 3,92$, $P_s = 3,0$ kgf/cm ² , $P_a = 4,0$ kgf/cm ² , $Q_p = 0,2$ L/min, $Q_c = 1,9$ L/min, antes limpeza.....	63
TABELA A10: Dados experimentais Sistema II; $K_a = 3,26$ mS/cm, $pH_a = 4,61$, $P_s = 5$ kgf/cm ² , $P_a = 7$ kgf/cm ² , $Q_p = 0,39$ L/min, $Q_c = 1,21$ L/min, antes limpeza.....	64
TABELA A11: Dados experimentais do Sistema II; $K_a = 3,26$ mS/cm, $pH_a = 4,54$, $P_s = 7,0$ kgf/cm ² , $P_a = 10,0$ kgf/cm ² , $Q_p = 0,5$ L/min, $Q_c = 0,5$ L/min, antes limpeza....	64
TABELA A12: Dados experimentais do Sistema II; $K_a = 3,36$ mS/cm, $pH_a = 4,54$, $P_s = 3,0$ kgf/cm ² , $P_a = 4,0$ kgf/cm ² , $Q_p = 0,1$ L/min, $Q_c = 1,9$ L/min, após limpeza.....	64
TABELA A13: Dados experimentais do Sistema II; $K_a = 3,49$ mS/cm, $pH_a = 4,56$, $P_s = 5,0$ kgf/cm ² , $P_a = 6,0$ kgf/cm ² , $Q_p = 0,3$ L/min, $Q_c = 1,1$ L/min, após limpeza.....	65
TABELA A14: Dados experimentais do Sistema II; $K_a = 3,26$ mS/cm, $pH_a = 4,56$, $P_s = 7,0$ kgf/cm ² , $P_a = 8,0$ kgf/cm ² , $Q_p = 0,45$ L/min, $Q_c = 0,5$ L/min, após limpeza.....	65
TABELA A15: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,16$ mS/cm, $pH_a = 7,60$, $P_s = 8,0$ kgf/cm ² , $P_a = 9,0$ kgf/cm ² , $Q_p = 0,7$ L/min, $Q_c = 2,3$ L/min, antes limpeza.....	65
TABELA A16: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,08$ mS/cm, $pH_a = 7,62$, $P_s = 8,0$ kgf/cm ² , $P_a = 9,0$ kgf/cm ² , $Q_p = 0,82$ L/min, $Q_c = 1,53$ L/min, após limpeza...	66
TABELA A17: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,16$ mS/cm, $pH_a = 8,12$, $P_s = 10,0$ kgf/cm ² , $P_a = 11,0$ kgf/cm ² , $Q_p = 0,9$ L/min, $Q_c = 1,6$ L/min, antes limpeza..	66
TABELA A18: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,11$ mS/cm, $pH_a = 8,10$, $P_s = 10,0$ kgf/cm ² , $P_a = 11,0$ kgf/cm ² , $Q_p = 1,045$ L/min, $Q_c = 1,176$ L/min, após limpeza.....	66
TABELA A19: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,30$ mS/cm, $pH_a = 8,31$, $P_s = 12,0$ kgf/cm ² , $P_a = 13,5$ kgf/cm ² , $Q_p = 1,4$ L/min, $Q_c = 1,3$ L/min, antes limpeza..	67
TABELA A20: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,24$ mS/cm, $pH_a = 8,34$, $P_s = 12,0$ kgf/cm ² , $P_a = 14,0$ kgf/cm ² , $Q_p = 1,25$ L/min, $Q_c = 0,81$ L/min, após limpeza.....	67
TABELA A21: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço de Nova Floresta-PB, antes da limpeza química, Sistema I, sob $P = 8$ kgf/cm ²	67

TABELA A22: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço de Nova Floresta-PB, após limpeza química, Sistema I, sob $P = 8,0 \text{ kgf/cm}^2$	68
TABELA A23: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço de Nova Floresta-PB, antes e após limpeza química, Sistema I, sob $P = 10,0 \text{ kgf/cm}^2$..	68
TABELA A24: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço de Nova Floresta-PB, antes e após limpeza química, Sistema I, sob $P = 12,0 \text{ kgf/cm}^2$..	69
TABELA A25: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço de Nova Floresta-PB, antes da limpeza química, Sistema I, sob $P = 14,0 \text{ kgf/cm}^2$	69
TABELA A26: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço de Nova Floresta-PB, após limpeza química, Sistema I, sob $P = 14,0 \text{ kgf/cm}^2$	70
TABELA A27: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço de Nova Floresta-PB, antes limpeza química, Sistema II, sob $P = 3,0 \text{ kgf/cm}^2$,.....	70
TABELA A28: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço de Nova Floresta-PB, após limpeza química, Sistema II, sob $P = 3,0 \text{ kgf/cm}^2$,.....	71
TABELA A29: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço de Nova Floresta-PB, antes limpeza química, Sistema II, sob $P = 5,0 \text{ kgf/cm}^2$,.....	71
TABELA A30: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço de Nova Floresta-PB, após limpeza química, Sistema II, sob $P = 5,0 \text{ kgf/cm}^2$,.....	71
TABELA A31: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço tubular de Nova Floresta, antes da limpeza química, sob $P = 7 \text{ kgf/cm}^2$	72
TABELA A32: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço tubular de Nova Floresta, antes da limpeza química, sob $P = 7 \text{ kgf/cm}^2$	72
TABELA A33: Tabela de dados referentes ao sistema I, fluxos, coeficientes de transferência de massa, pressão osmótica e STD.....	73
TABELA A34: Tabela de dados referentes ao sistema II, fluxos, coeficientes de transferência de massa, pressão osmótica e STD.....	74

PARTE II

TABELA B1: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,62 \text{ mS/cm}$, $\text{pH}_a = 7,75$, $P_s = 6 \text{ kgf/cm}^2$, $P_a = 6 \text{ kgf/cm}^2$, $Q_p = 0,35 \text{ L/min}$, $Q_c = 5,45 \text{ L/min}$, antes da limpeza.....	76
---	----

TABELA B2: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,57$ mS/cm, $pH_a = 8,08$, $P_s = 8$ kgf/cm ² , $P_a = 8$ kgf/cm ² , $Q_p = 0,64$ L/min, $Q_c = 5,45$ L/min, antes da limpeza	76
TABELA B3: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,54$ mS/cm, $pH_a = 8,49$, $P_s = 6$ kgf/cm ² , $P_a = 6$ kgf/cm ² , $Q_p = 0,38$ L/min, $Q_c = 5,45$ L/min, após limpeza	77
TABELA B4: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,56$ mS/cm, $pH_a = 8,73$, $P_s = 8$ kgf/cm ² , $P_a = 8$ kgf/cm ² , $Q_p = 0,69$ L/min, $Q_c = 5,45$ L/min, após limpeza	77
TABELA B5: Monitoramento do desempenho do sistema de dessalinização Catingueira-PB, fase de implantação do sistema	78
TABELA B6: Monitoramento do desempenho do sistema de dessalinização Catingueira-PB, fase em operação	79
TABELA B7: Monitoramento do sistema experimental de dessalinização via osmose inversa, Sistema I, com a água do poço do Shopping Luiza Motta	79
TABELA B8: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço do Shopping Luiza Motta, antes e após limpeza química, sob $P = 6,0$ kgf/cm ²	81
TABELA B9: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço do Shopping Luiza Motta, antes e após limpeza química, sob $P = 8,0$ kgf/cm ²	82
TABELA B10: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço do município de Catingueira-PB, antes e após limpeza química, sob $P = 7,0$ kgf/cm ² ...	82
TABELA B11: Laudo de análises da água do poço do município de Catingueira-PB	83

A	área superficial da membrana (cm^2)
C	concentração (mg/L)
Ca	concentração da solução de alimentação (mg/L)
Cc	concentração do concentrado (mg/L)
Cp	concentração do permeado (mg/L)
Cpt	concentração do permeado total (mg/L)
Cct	concentração do concentrado total (mg/L)
Cp₁	concentração do permeado da primeira membrana (mg/L)
Cp₂	concentração do permeado da segunda membrana (mg/L)
Cp₃	concentração do permeado da terceira membrana (mg/L)
Cc₁	concentração do concentrado da primeira membrana (mg/L)
Cc₂	concentração do concentrado da segunda membrana (mg/L)
Cc₃	concentração do concentrado da terceira membrana (mg/L)
ΔC	gradiente de concentração (mg/L)
D	coeficiente de difusão (cm^2/s)
J_w	fluxo do permeado ($\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$).
J_s	fluxo de sais ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$)
K_w	coeficiente de transferência de massa do solvente ($\text{cm}^3/\text{kgf} \cdot \text{min}$)
K_s	coeficiente de transferência de massa do soluto (cm/min)
K	condutividade elétrica (mS/cm)
K_a	condutividade elétrica da alimentação (mS/cm)
K_p	condutividade elétrica do permeado (mS/cm)
K_c	condutividade elétrica do concentrado (mS/cm)
Kp₁	condutividade elétrica do permeado da primeira membrana (mS/cm)
Kp₂	condutividade elétrica do permeado da segunda membrana (mS/cm)
Kp₃	condutividade elétrica do permeado da terceira membrana (mS/cm)
M₁	membrana 1 - Alta filtração (HF)
M₂	membrana 2 - Ultrabaixa pressão(ULP)
M₃	membrana 3 - Alta rejeição (HR)
Pa	pressão de alimentação (Kgf/cm^2)
P_c	pressão do concentrado (Kgf/cm^2)
P_p	pressão do permeado (Kgf/cm^2)

ΔP	gradiente de pressão (kgf/cm^2)
p_{Hp}	potencial hidrogeniônico do permeado
p_{Hc}	potencial hidrogeniônico do concentrado
p_{Hp_1}	potencial hidrogeniônico do permeado da primeira membrana
p_{Hp_2}	potencial hidrogeniônico do permeado da segunda membrana
p_{Hp_3}	potencial hidrogeniônico do permeado da terceira membrana
Q_a	vazão de alimentação (L/min)
Q_p	vazão do permeado (L/min)
Q_{pt}	vazão do permeado total (L/min)
Q_{ct}	vazão do concentrado total (L/min)
Q_{pt}	vazão do permeado total (L/min)
Q_{p_1}	vazão do permeado da primeira membrana (L/min)
Q_{p_2}	vazão do permeado da segunda membrana (L/min)
Q_{p_3}	vazão do permeado da terceira membrana (L/min)
Q_{c_1}	vazão do concentrado da primeira membrana (L/min)
Q_{c_2}	vazão do concentrado da segunda membrana (L/min)
Q_{c_3}	vazão do concentrado da terceira membrana (L/min)
R	recuperação do sistema (%)
R	constante dos gases ideais ($\text{kgf.L/cm}^2.\text{mol.K}$)
T	temperatura (K)
TRS	taxa de rejeição de sais (%)
STD_a	sólidos totais dissolvidos na alimentação (mg/L)
STD_c	sólidos totais dissolvidos do concentrado (mg/L)
STD_p	sólidos totais dissolvidos do permeado (mg/L)

LETRAS GREGAS

$\Delta\pi$	gradiente de pressão osmótica (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)
 β polarização de concentração
 δ espessura da camada limite (cm)
 ν n° de íons formados na dissociação do soluto

CAPÍTULO I**1 INTRODUÇÃO**

A água é o produto de maior quantidade do nosso planeta, sendo considerada como um dos produtos mais nobres. A sua maior proporção encontra-se nas geleiras, mares e oceanos, ou nos depósitos e subterrâneos mais profundos; e apenas 1% de toda água existente é doce, encontrada nos rios, lagos e atmosfera (Price, 1991). Para melhor conhecimento da distribuição da água no nosso planeta, ela se encontra da seguinte forma, de acordo com a Figura 1:

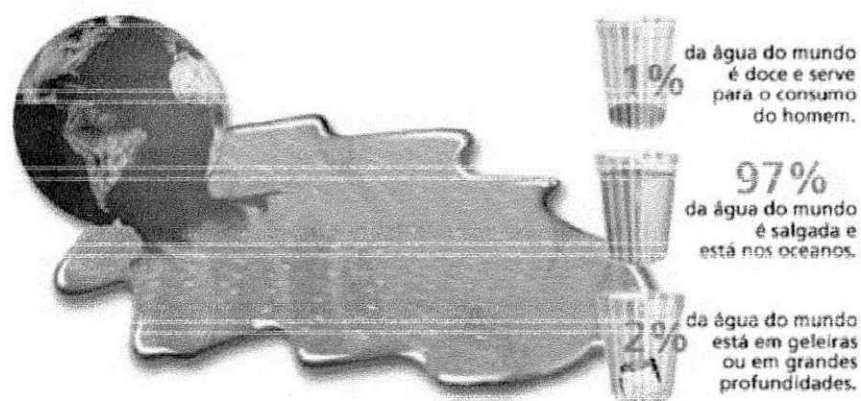


Figura 1 – Porcentagem de água no planeta

Devido à escassez de água potável nos últimos anos em todo o mundo, a humanidade vem tentando explorar novas fontes. Entre as soluções, os métodos de dessalinização de águas salobras e de água do mar surgiram com o objetivo de remover os sais da água, tornando-a potável com propósitos domésticos e municipais. Entre os processos de dessalinização disponíveis, a osmose inversa tem tido uma grande aplicabilidade. Além de dessalinização de águas, vem sendo empregada na recuperação de efluentes industriais, concentração de sucos, produtos farmacêuticos, processamento de alimentos e bebidas, soro de leite na fabricação de queijo, diálises, obtenção de água ultrapura, produção de aminoácidos para a engenharia bioquímica, etc. (Brandt et al, 1992).

Em função da característica geológica do solo a água pode fluir entre as fendas e se armazenar no subsolo, gerando assim grandes potenciais hídricos. Em algumas regiões que apresentam condições semi-áridas e a formação litológica do solo é predominantemente de rochas cristalinas e ou sedimentares há maior possibilidade de ocorrer a salinização dos mananciais hídricos ao longo do tempo. O que se tem encontrado nas mais variadas profundidades em diversas regiões, principalmente no chamado polígono das secas, constitui um fato bastante comum: a qualidade das águas, na grande maioria das vezes, é condenável pelo seu alto grau de insalubridade, tornando-as impróprias para o consumo humano, animal e irrigação, (Ferreira Filho, 1992).

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 50m³ de água potável. Em 1971 as instalações de Curaçao foram ampliadas para produzir 20.000 m³/dia. 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, (Ferreira Filho, 1992).

No Brasil, as primeiras experiências com destilação solar foram realizadas em 1970, sob o auspício do ITA-Instituto Tecnológico da Aeronáutica. Em 1987 a Petrobrás 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, (Ferreira Filho, 1992).

Há muitos anos, processos para dessalinização de águas salobras ou salinas vem sendo estudados. O maior passo no desenvolvimento das tecnologias de dessalinização foi dado durante a Segunda Guerra Mundial, devido à necessidade de água potável para suprir as tropas militares em áreas áridas. Desde então, o grande potencial da dessalinização foi reconhecido e os estudos nessa área foram intensificados. Atualmente, sistemas de dessalinização de diversas tecnologias vêm sendo empregados em mais de 120 países. Todavia tem-se observado que em função do desenvolvimento tecnológico, os processos térmicos, apesar de ainda serem bastante utilizados, vem sendo substituídos por processos com membranas, devido complexidade de instalação, alto custo energético e de manutenção dos mesmos, (IDAE, 1995).

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

O problema da escassez hídrica no Nordeste não se fundamenta na falta de água, mas na sua distribuição irregular. Os reservatórios naturais subterrâneos no Nordeste poderiam suprir as necessidades 234 % a mais do que o preciso.

Mas a qualidade desta água varia de local para local, sendo que a maior parte apresenta um elevado teor salino. Por falta de opção, a população bebe água salobra, o que contribui pra o elevado índice de doenças registradas na região e a alta porcentagem na taxa de mortalidade infantil. A Amazônia, onde a população é de 17 milhões de pessoas, tem 60 % da água doce do país. Os outros 40% estão divididos entre as demais regiões, onde vivem 133 milhões de habitantes. Para o especialista em águas subterrâneas do Ministério do Meio Ambiente, Jorge G. C Barros, a qualidade físico-química e biológica da água, para determinados usos, é tão importante quanto a quantidade disponível. Disse ainda que a aplicação da tecnologia da osmose inversa vai substituir progressivamente o uso de caminhões-pipa, com vantagens tanto na qualidade, como no preço do metro cúbico da água distribuída à população. Outros métodos como destilação, resina de troca iônica e eletrodialise também são conhecidos no processo de dessalinização, mas nenhum deles apresentou a eficiência e simplicidade da osmose inversa, cujo equipamento exige uma área de instalação reduzida com operação simples e contínua, podendo ser instalado em áreas de difícil acesso (Barros, 1997).

A osmose inversa por produzir água doce purificada, isenta de microorganismos, com as mesmas condições de uma água mineral que é vendida comercialmente, tem todas as condições para resolver grande parte dos problemas das pequenas comunidades do semi-árido que possuem poços e açudes com água salobra. Já existem mini-usinas de dessalinização, usando energia hidroelétrica, motor à gasolina ou energia solar, apenas necessária para fazer funcionar a bomba de alta pressão (Ferreira Filho, 1992).

Tendo em vista a grande carência de água potável na região Nordeste, o Laboratório de Referência em Dessalinização (LRD) do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande, com o apoio da Secretaria dos Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente, através do Programa Água Boa, vem desenvolvendo pesquisas e projetos sobre processos de dessalinização de águas salinas e salobras desde o final da década de 80. Os mais recentes trabalhos desenvolvidos foram os de: Oliveira (2002), usando sistema de dessalinização via osmose inversa alimentados por painéis fotovoltaicos; Dias (1999) sobre o desempenho de um reator para dessalinização de soluções salinas via osmose inversa e Silveira (1999) avaliando um sistema

híbrido para dessalinização de águas salinas pelo processo de osmose inversa, etc. E também, o LRD vem colaborando com a manutenção dos equipamentos já instalados, que hoje já consta com cerca de 600 equipamentos espalhados pelo Nordeste, fazendo pesquisas para que estes equipamentos tenham uma vida útil bem maior, dando apoio técnico e científico; como também a preocupação de vários dessalinizadores serem implantados na nossa região sem nenhuma manutenção após suas instalações.

O objetivo desse trabalho foi estudar o desempenho de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa para águas salobras de poços tubulares e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas. Foi utilizado um sistema contendo três elementos de membranas em série. O outro sistema estudado apresentou dois elementos de membrana em paralelo seguido com outro em série, sugerido por Silveira (1999). Os seus desempenhos foram estudados através dos seguintes parâmetros: análises físico-químicas antes e após a limpeza química, variação de pressão, recuperação, taxa de rejeição de sais e concentração da água bruta.

CAPÍTULO II**2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA****2.1 O PROCESSO DE DESSALINIZAÇÃO**

O processo de dessalinização por osmose inversa, conhecida dos cientistas desde o fim do século XIX, passou a ser aplicado em processos industriais na década de 60. Desde a década de 80 o emprego de membranas semipermeáveis sintéticas em aplicações industriais passou a se difundir, ampliando o campo de aplicação deste processo. Isto resulta em contínuas reduções de custo, não só pela maior escala de produção permitida como também pelo crescente conhecimento tecnológico adquirido. Nos anos recentes, os avanços científicos no campo de indústria de micro chips e da biotecnologia provocaram uma demanda por água de elevada pureza. Por outro lado, a consciência de preservação do meio ambiente da sociedade implica também em tratamentos de rejeitos industriais mais sofisticados e de maior eficiência. Nestes campos a osmose inversa tem se desenvolvido bastante. A escassez da água em muitas regiões do planeta também determina uma demanda por processos de dessalinização seguros e econômicos. Assim, o processo de dessalinização por osmose inversa tem se difundido, seus custos vem decrescendo e sendo colocado até ao alcance do indivíduo, viabilizando muitos projetos antes impensáveis (Sattamini, 1999).

2.2 MEMBRANAS

Uma membrana é uma película ou barreira fina separando dois fluidos. A barreira impede o fluxo hidrodinâmico, de modo que o transporte através da membrana ocorre por sorção e difusão. A permeabilidade da membrana é a propriedade que descreve a taxa de transporte. Uma membrana é semipermeável quando, sob condições idênticas, transporta espécies moleculares diferentes com velocidades diferentes. As exigências sobre uma membrana conveniente para a osmose inversa são severas. Por exemplo, algumas das propriedades da

“Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas”

membrana, importantes na economia do processo de dessalinização, são: (1) seletividade da membrana em relação à água, preferivelmente aos íons, o que determina o número de estágios pressurizados necessário à produção de água potável; (2) taxa de permeação da água por unidade de gradiente de pressão, o que determina as dimensões do equipamento pela taxa de produção unitária de água potável; e (3) a durabilidade da membrana, que determina o número de vezes que a membrana deve ser substituída. A membrana é feita de forma de uma estrutura composta, em que uma película delgada e densa, com espessura estimada em 0,1 a 10 μm , está suportada por uma outra muito mais espessa (com 0,05 a 0,122 mm), porosa e esponjosa, conforme é mostrado na Figura 2, formando um substrato que oferece resistência pequena ou nula à permeação. Este tipo de membrana é conhecido como membrana assimétrica, (Perry e Chilton, 1986).

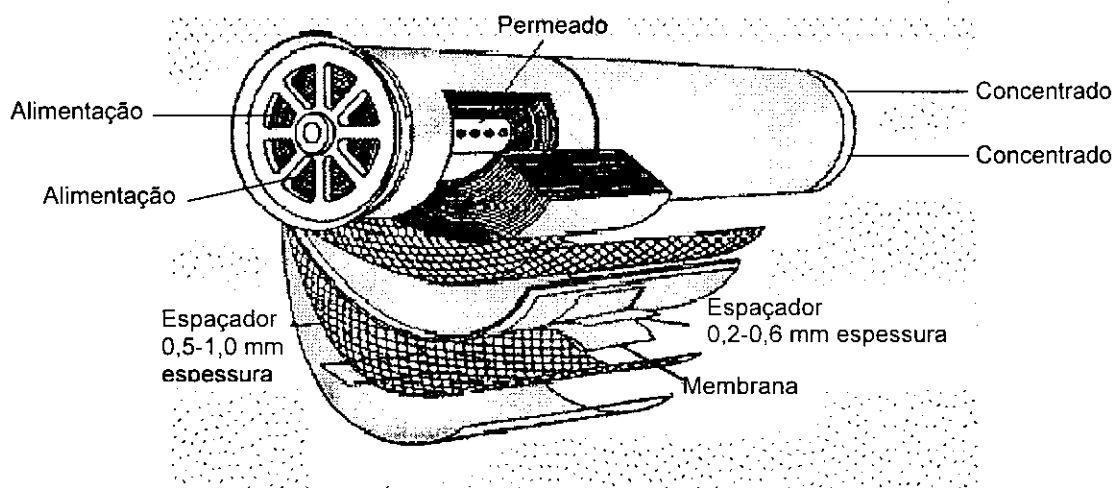


Figura 2: Membrana espiral de osmose inversa (Fonte: Gauwbergen, 1997).

2.3 MEMBRANA SEMIPERMEÁVEL

Membranas semipermeáveis são membranas existentes na natureza que têm a capacidade de deixar passar somente um líquido (a água), ou solvente, mas não deixam passar sais nela dissolvidos. Na verdade, o que se verifica é uma propriedade seletiva, isto é, o solvente água, passa de um lado para o outro da membrana com muito mais facilidade do que os solutos (sais) existentes. As

“Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas”

paredes das células dos seres vivos são membranas semipermeáveis naturais, regulando a passagem de sais e nutrientes para dentro da célula ou para fora dela. Os cientistas descobriram que existem membranas sintéticas que exibem a mesma propriedade. Talvez a mais comum delas seja o acetato de celulose, aquele papel transparente que costuma envolver os maços de cigarro. Com uma folha de acetato de celulose pode-se efetuar uma experiência de osmose, fenômeno descrito a seguir (Sattamini, 1999).

2.3.1 PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

Os processos que utilizam a tecnologia de membranas e o gradiente de pressão com força motriz são conhecidos como: microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI) e também conhecida como hiperfiltração.

Os processos de MF, UF, NF e OI, podem ser entendidos como uma extensão dos processos de filtração clássica que utilizam, nesta seqüência, meios filtrantes cada vez mais fechados, ou seja, com poros cada vez menores.

A escolha da membrana a ser utilizada no processo é determinada em função da natureza do tipo de soluto e da presença ou não de partículas em suspensão (Habert et al, 1997).

O tamanho dos poros, as pressões de operação e os rendimentos estão indicados na Tabela 1, conforme se observa nessa tabela, a pressão de operação aumenta com a diminuição da porosidade da membrana.

Tabela 1: Relação entre porosidade da membrana, pressão de operação e rendimento total do processo (Schneider e Tsutiya, 2001).

Membrana	Porosidade	Pressão (Kgf/cm ²)	Rendimento
Microfiltração	0,05 - 5 µm	< 2,09	90% - 100%
Ultrafiltração	3 - 50 nm	2,09 - 10,47	90%
Nanofiltração	1 - 4 nm	5,23 - 40,89	80% - 90%
Osmose inversa	0,1 - 1 nm	8,38 - 209,47	Água do mar 25%-50% Água salobra 95% - 99%

"Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas"

Na Figura 3 são apresentadas as operações de membrana cuja força motriz é uma diferença da pressão através da membrana.

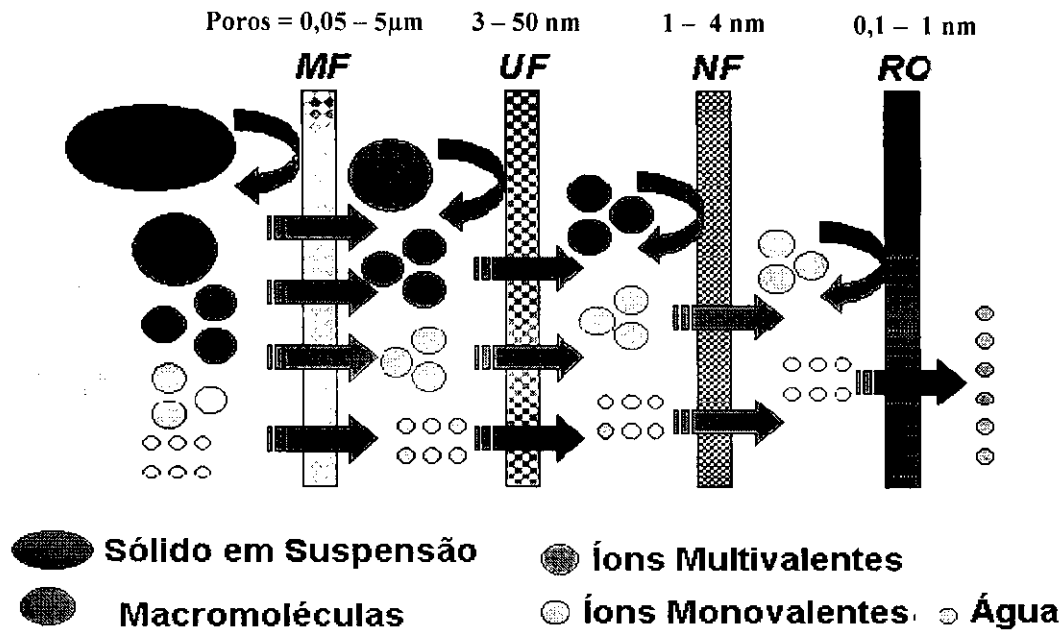


Figura 3: Tipos de membranas ou processos de filtração, de acordo com a dimensão das partículas e o tamanho dos poros.

2.4 OSMOSE

Osmose é uma palavra adicionada aos nossos dicionários desde o final do século XIX. A palavra vem do grego (*osmós*) e significa "impulso". A osmose natural ocorre quando duas soluções salinas de concentrações diferentes encontram-se separadas por uma membrana semipermeável. Neste caso, a solução menos concentrada tenderá a passar para o lado da solução de maior salinidade. Com isto, esta solução mais concentrada, ao receber mais solvente, se dilui, num processo impulsionado por uma grandeza chamada "pressão osmótica", até que as duas soluções atinjam o equilíbrio osmótico, (Sattamini, 1999).

2.5 OSMOSE INVERSA

A osmose inversa ocorre quando uma pressão superior à pressão osmótica é aplicada no lado da solução mais concentrada, contra uma membrana semipermeável, devidamente projetada para aquela solução. Ao atravessar a membrana a água é purificada e perde a maior porção de sais. Além de retirar o sal da água, este sistema permite ainda eliminar vírus, bactérias e fungos. Em processo de grande escala isso ocorre com um auxílio de uma bomba de alta pressão sob um fluxo contínuo passando por um permeador (vaso de pressão) onde fica situada a membrana (Sattamini, 1999).

Para melhor entender o fenômeno recorre-se a Figura 4, um vaso dividido ao meio por uma membrana semipermeável.

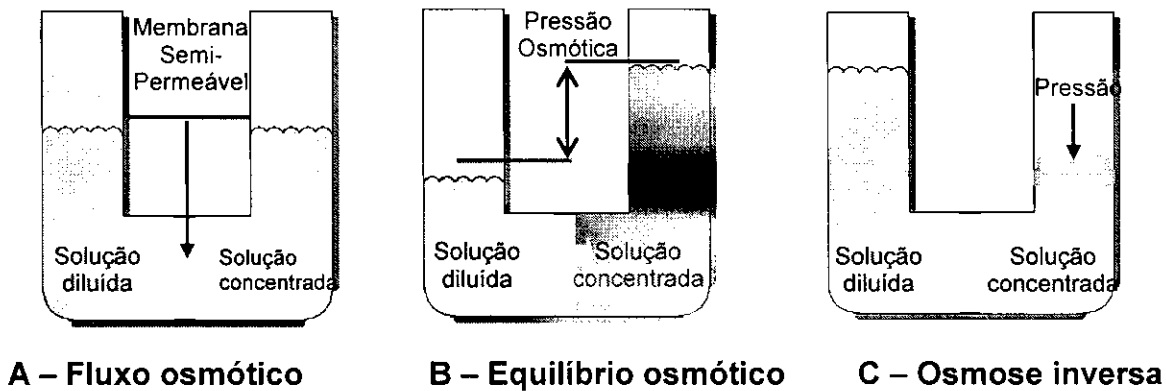


Figura 4: Na osmose (A), a água pura dilui a salina até que seja atingido o equilíbrio osmótico (B), enquanto na osmose inversa (C), a aplicação de uma pressão superior à diferença de pressão hidrostática inverte o processo.

2.5.1 VANTAGENS E APLICAÇÕES DO PROCESSO DE OSMOSE INVERSA

VANTAGENS:

- ✓ Possui baixo custo de investimento
- ✓ 75% de rendimento de água purificada
- ✓ 99 % de redução de sais minerais, bactérias, partículas
- ✓ Baixo consumo energético

"Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas"

- ✓ Facilidade na construção, operação e manutenção, devido à natureza modular do processo
- ✓ Necessidades de pequenos espaços
- ✓ Processo contínuo

APLICAÇÕES:

- ✓ Dessalinização de águas salobras
- ✓ Dessalinização de água do mar
- ✓ Produção de água ultrapura para indústrias eletrônicas
- ✓ Tratamento de efluentes industriais
- ✓ Aplicações médicas e/ou farmacêuticas, cosméticos
- ✓ Indústria de alimentos.

2.5.2 DESSALINIZAÇÃO DA ÁGUA DO MAR POR OSMOSE INVERSA.

A osmose inversa para dessalinizar a água do mar, que começou com pequenos sistemas em 1973, é usada agora nas plantas com capacidades até 56.781,17 m³/dia. Por causa da necessidade crescente do mundo para a água fresca e o envelhecimento de plantas térmicas de destilação no Oriente Médio, esta tendência deve continuar. Em sistemas de osmose inversa para água de mar, a alta pressão é necessária para superar a pressão osmótica elevada da água de mar (26,36 a 35,15 Kgf/cm²) e para assegurar níveis elevados de produtividade. As membranas para esta aplicação devem operar com pressões entre 56 e 84 Kgf/cm² e devem ter rejeições de sal de 99 % ou mais, a fim produzir água dentro dos padrões de potabilidade, exigidos pela Organização Mundial de Saúde (Brandt et al, 1992).

Normalmente, a recuperação para sistemas de osmose inversa para água do mar atinge valores até 40 %. Obviamente existem vários fatores que se relacionam com a recuperação como: área da membrana, pré-tratamento químico e qualidade de água bruta. Após a dessalinização o permeado pode passar por um pós-tratamento para um ajuste final.

"Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas"

Na Tabela 2 verificamos o baixo consumo de energia para o processo de osmose inversa em comparação com os outros processos de destilação, onde podemos comprovar a vantagem do processo.

Tabela 2: Consumo de energia para destilação e osmose inversa para dessalinização da água do mar. [Brandt et al, 1992]

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

2.6 EQUAÇÕES EMPÍRICAS DO PROCESSO DE OSMOSE INVERSA

2.6.1 FLUXO DO PERMEADO

O fluxo do permeado através de uma membrana de osmose inversa é inversamente proporcional a área da membrana e proporcional a variação de pressão osmótica e hidráulica, conforme é representado pela Equação 2.1 (Malleivable et al, 1996).

"Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas"

$$J_W = K_W \left(\Delta P - \Delta \pi \right) = \frac{Q_p}{A} \quad (2.1)$$

Sendo que,

$$\Delta P = \left[\left(\frac{P_a + P_c}{2} \right) - P_p \right] \quad e \quad (2.2)$$

$$\Delta \pi = \left[\left(\frac{STD_a + STD_c}{2} \right) - STD_p \right] \times 7 \times 10^{-4} \quad (2.3)$$

Onde: J_W = taxa de fluxo do permeado ($\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$)

K_W = coeficiente de transferência de massa para o solvente ($\text{cm}^3/\text{kgf} \cdot \text{min}$)

$\Delta \pi$ = média da pressão osmótica (kgf/cm^2)

ΔP = gradiente de pressão (kgf/cm^2)

A = área da membrana (cm^2)

Q_p = vazão do permeado (cm^3/min)

P_a = pressão de alimentação (kgf/cm^2)

P_c = pressão do concentrado (kgf/cm^2)

P_p = pressão do permeado (kgf/cm^2)

STD_a = sólidos totais dissolvidos da alimentação (mg/l)

STD_c = sólidos totais dissolvidos do concentrado (mg/l)

STD_p = sólidos totais dissolvidos do permeado (mg/l)

7×10^{-4} = é um fator aproximado de conversão de (mg/L) para (Kgf/cm^2) (Malleivable et al, 1996).

2.6.2 FLUXO DE PASSAGEM DE SAIS

O transporte de sais através da membrana é proporcional a diferença de concentração ou diferença de potencial químico, o qual pode ser representado pela seguinte Equação [Taylor & Jacobs, 1996].

$$J_s = K_s \Delta C = \frac{Q_p C_p}{A} \quad (2.4)$$

Sendo que,

$$\Delta C = \left[\left(\frac{C_a + C_c}{2} \right) - C_p \right] \quad (2.5)$$

Onde: J_s = fluxo mássico do soluto ($\text{g}/\text{cm}^2 \text{ min}$)

K_s = coeficiente de transferência de massa para o soluto (cm/min)

Q_p = vazão do permeado (cm^3/min)

A = área da membrana cm^2

ΔC = diferença de concentração de sais (mg/L)

C_a = concentração de alimentação (mg/L)

C_p = concentração de permeado (mg/L)

C_c = concentração de concentrado (mg/L)

Combinando as Equações 2.1 e 2.4, teremos:

$$K_s = \frac{J_s}{\Delta C} = \frac{\frac{Q_p C_p}{A}}{\Delta C} \Rightarrow \frac{K_s}{K_w} = \frac{(\Delta P - \Delta \pi) C_p}{\Delta C}$$

$$K_s = \frac{K_w (\Delta P - \Delta \pi) C_p}{\Delta C} \quad (2.4.1)$$

2.6.3 PRESSÃO OSMÓTICA

A pressão osmótica depende da concentração do soluto, temperatura da solução e das espécies de íons presentes. Quanto maior for a concentração da

"Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas"

solução, maior será o valor da pressão osmótica dessa solução (Brandt et al, 1992). A qual é dada pela seguinte equação:

$$\pi = \sum v_i c_i RT \quad (2.6)$$

Onde: π = pressão osmótica da solução iônica (kgf/cm²)

v = nº de íons formados na dissociação do soluto

c = concentração molar do soluto (mol/L)

R = constante dos gases (kgf L/cm² mol K)

T = temperatura (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, 1992).

2.6.4 TAXA DE REJEIÇÃO DE SAIS

A taxa de rejeição de sais (TRS %) fornece a capacidade da membrana de rejeitar os sais dissolvidos durante a permeação da água (Chen et al, 1997).

$$TRS\% = \frac{C_a - C_p}{C_a} \times 100 \quad (2.7)$$

Onde: TRS% = taxa de rejeição de sais

C_a = concentração de alimentação (mg/L)

C_p = concentração do permeado (mg/L)

A taxa de rejeição de sais indica a efetividade da remoção de sais e outras espécies químicas pela membrana, possuindo valores que variam de 90 a 99,8 %, dependendo do tipo de membrana utilizada (Dow Latin Química, 1996).

2.6.5 RECUPERAÇÃO

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

$$R\% = \frac{Q_p}{Q_a} = \frac{Q_p}{Q_p + Q_c} \times 100 \quad (2.8)$$

Onde: R % = Nível de recuperação do sistema

Q_p = vazão do permeado (cm^3/min),

Q_a = vazão de alimentação (cm^3/min),

Q_c = vazão do concentrado (cm^3/min).

2.7 BALANÇO DE MASSA PARA O SISTEMA I E II DE OSMOSE INVERSA

Conforme as configurações dos elementos de membranas utilizados neste trabalho, o primeiro sistema de osmose inversa é constituído de três permeadores em série, e o segundo com dois elementos de membranas em paralelo e em série com um terceiro, conforme se apresenta nas Figuras 5 e 6:

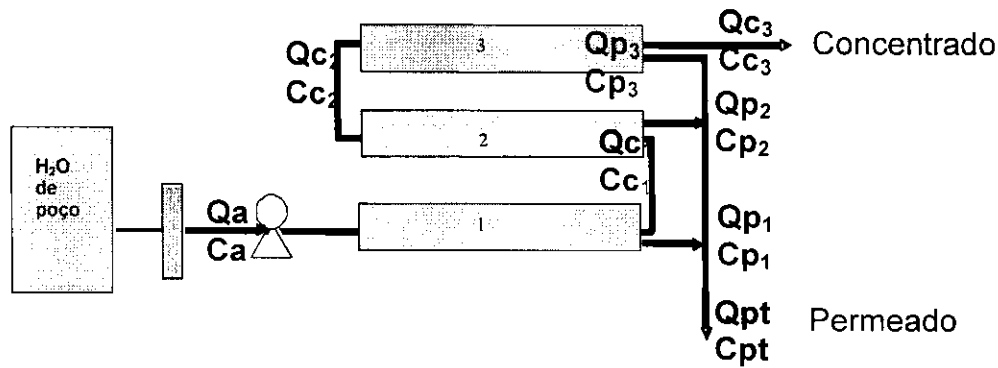


Figura 5: Sistema experimental constituído de três elementos de membrana em série (Sistema I).

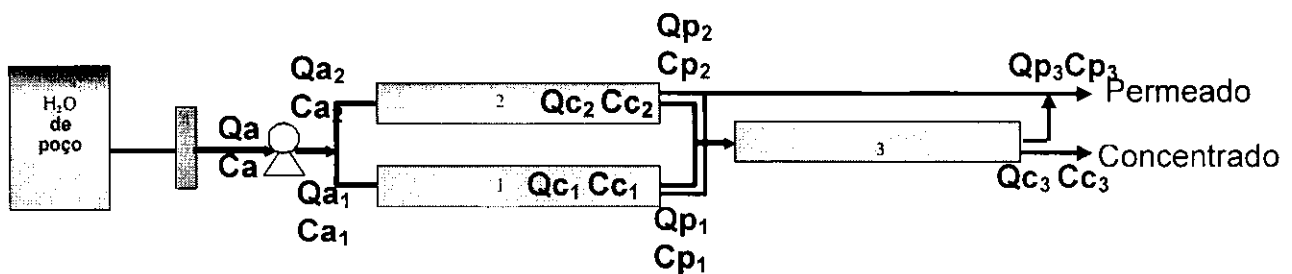


Figura 6: Sistema experimental constituído de dois elementos de membranas paralelo, em série com um terceiro (Sistema II).

Através de um balanço de massa para os sólidos dissolvidos na água de alimentação, as seguintes equações podem ser obtidas para o Sistema I:

Balanço parcial do sistema I

$$Q_a C_a = Q_{pt} C_{pt} + Q_{ct} C_{ct} \quad (2.9)$$

$$\text{Onde: } Q_{pt} = Q_{p1} + Q_{p2} + Q_{p3} \quad (2.10)$$

$$Q_{ct} = Q_{c3} \quad (2.11)$$

Balanço parcial para o 1º permeador

$$Q_a C_a = Q_{p1} C_{p1} + Q_{c1} C_{c1} \quad (2.12)$$

Balanço parcial para o 2º permeador

$$Q_{c1} C_{c1} = Q_{p2} C_{p2} + Q_{c2} C_{c2} \quad (2.13)$$

“Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas”

Balanço parcial para o 3º permeador

$$Q_{c_2}C_{c_2} = Q_{p_3}C_{p_3} + Q_{c_3}C_{c_3} \quad (2.14)$$

$$\text{Onde: } Q_{c_3}C_{c_3} = Q_{ct}C_{ct} \quad (2.15)$$

O nível de recuperação total do Sistema I pode ser definido de acordo com a seguinte equação:

$$R\% = \frac{Q_{p_i}}{Q_a} = \frac{Q_{p_i}}{Q_{p_i} + Q_{c_i}} \times 100 \quad (2.16)$$

A partir dos resultados obtidos das vazões de cada permeador nas Equações (2.12), (2.13) e (2.14), pode-se determinar a taxa de recuperação para cada permeador,

A taxa de recuperação para o 1º permeador é determinada por:

$$R_1 = \frac{Q_{p_1}}{Q_a} = \frac{Q_{p_1}}{Q_{p_1} + Q_{c_1}} \times 100 \quad (2.17)$$

A taxa de recuperação para o 2º permeador é determinada por:

$$R_2 = \frac{Q_{p_2}}{Q_{c_1}} = \frac{Q_{p_2}}{Q_{p_2} + (Q_{p_3} + Q_{c_1})} \times 100 \quad (2.18)$$

A taxa de recuperação para o 3º permeador é determinada por:

$$R_3 = \frac{Q_{p_3}}{Q_{c_2}} = \frac{Q_{p_3}}{Q_{p_3} + Q_{c_1}} \times 100 \quad (2.19)$$

Através de um balanço de massa para os sólidos dissolvidos na água e, a partir dos resultados obtidos das vazões e das concentrações de cada permeador nas Equações (2.9), (2.12) e (2.13), podemos então calcular a taxa de rejeição de sais para cada permeador, assim como segue:

A taxa de rejeição de sais para o primeiro permeador é determinada por:

$$TRS\% = \frac{C_a - C_{p1}}{C_a} \times 100 \quad (2.20)$$

A taxa de rejeição de sais para o segundo permeador é determinada por:

$$TRS\% = \frac{C_{c1} - C_{p2}}{C_{c1}} \times 100 \quad (2.21)$$

Sabe-se que:

$$Q_{c1} = Q_a - Q_{p1} \quad (2.22)$$

$$Q_{c2}C_{c2} = Q_{p3}C_{p3} + Q_{ct}C_{ct} \quad (2.23)$$

$$\text{Logo: } C_{c1} = \frac{Q_{p2}C_{p2} + Q_{c2}C_{c2}}{Q_a - Q_{p1}} \times 100 \quad (2.24)$$

$$C_{c1} = \frac{Q_{p2}C_{p2} + (Q_{p3}C_{p3} + Q_{ct}C_{ct})}{Q_a - Q_{p1}} \times 100 \quad (2.25)$$

A taxa de rejeição de sais para o terceiro permeador é determinada por:

$$TRS\% = \frac{C_{c2} - C_{p3}}{C_{c2}} \times 100 \quad (2.26)$$

Fazendo o mesmo para encontrar C_{c2} , tem-se que:

$$C_{c2} = \frac{Q_{p3}C_{p3} + Q_{ct}C_{ct}}{Q_{c2}} \times 100 \quad (2.27)$$

$$C_{c2} = \frac{Q_{p3}C_{p3} + Q_{ct}C_{ct}}{(Q_a - Q_{p1}) - Q_{p2}} \times 100 \quad (2.28)$$

Através de um balanço de massa para os sólidos dissolvidos na água de alimentação, as seguintes equações podem ser obtidas para o Sistema II:

$$Q_a C_a = Q_{a1} C_{a1} + Q_{a2} C_{a2} \quad (2.29)$$

$$\text{Onde: } C_a = C_{a1} = C_{a2} \quad (2.30)$$

$$Q_a = Q_{a1} + Q_{a2} \quad (2.31)$$

Balanço parcial do Sistema II:

$$Q_a C_a = Q_{pt} C_{pt} + Q_{ct} C_{ct} \quad (2.32)$$

$$\text{Onde: } Q_{pt} = Q_{p1} + Q_{p2} + Q_{p3} \quad (2.33)$$

$$Q_{ct} = Q_{c3} \quad (2.34)$$

$$Q_a C_a = Q_{a1} C_{a1} + Q_{a2} C_{a2} \quad (2.35)$$

$$Q_a = Q_{a1} + Q_{a2} \quad (2.36)$$

$$C_a = C_{a1} = C_{a2} \quad (2.37)$$

Balanço parcial para o 1º permeador:

$$Q_{a1} C_{a1} = Q_{p1} C_{p1} + Q_{c1} C_{c1} \quad (2.38)$$

Balanço parcial para o 2º permeador

$$Q_{a2} C_{a2} = Q_{p2} C_{p2} + Q_{c2} C_{c2} \quad (2.39)$$

Balanço parcial para o 3º permeador

$$Q_{c1} C_{c1} + Q_{c2} C_{c2} = Q_{c'} C_{c'} = Q_{p3} C_{p3} + Q_{c3} C_{c3} \quad (2.40)$$

$$\text{Onde: } Q_{c3} C_{c3} = Q_{ct} C_{ct} \quad (2.41)$$

$$Q_{c'} = Q_{p3} + Q_{c3} \quad (2.42)$$

$$Q_{c'} = Q_{c1} + Q_{c2} \quad (2.43)$$

A taxa de recuperação total do Sistema II pode ser definida de acordo com a seguinte expressão:

$$R\% = \frac{Q_{p_i}}{Q_a} = \frac{Q_{p_i}}{Q_{p_i} + Q_{c_i}} \times 100 \quad (2.44)$$

A partir dos resultados obtidos das vazões de cada permeador nas Equações (2.33), (2.38) e (2.39), pode-se determinar a taxa de recuperação para cada permeador.

A taxa de recuperação para o 1º permeador é determinada por:

$$R_1 = \frac{Q_{p1}}{Q_{a1}} = \frac{Q_{p1}}{Q_{p1} + Q_{c1}} \times 100 \quad (2.45)$$

$$\text{Sabendo-se que: } Q_{c1} = Q_{a1} + Q_{p2} \quad (2.46)$$

A taxa de recuperação para o 2º permeador é determinada por:

$$R_2 = \frac{Q_{p2}}{Q_{a2}} = \frac{Q_{p2}}{Q_{p2} + Q_{c2}} \times 100 \quad (2.47)$$

$$\text{Sabendo-se que: } Q_{c2} = Q_{a2} + Q_{p3} \quad (2.48)$$

A taxa de recuperação para o 3º permeador é determinada por:

$$R_3 = \frac{Q_{p3}}{(Q_{c1} + Q_{c2})} = \frac{Q_{p3}}{Q_{p3} + Q_{c1}} \times 100 \quad (2.49)$$

Através de um balanço de massa para os sólidos dissolvidos na água e, a partir dos resultados obtidos das vazões e das concentrações de cada permeador nas Equações (2.33), (2.38) e (2.39), podemos então calcular a taxa de rejeição de sais de cada permeador para o sistema II, assim como segue:

A taxa de rejeição de sais para o primeiro permeador é determinada por:

$$TRS_1 \% = \frac{C_{a1} - C_{p1}}{C_{a1}} \times 100 = \frac{C_a - C_{p2}}{C_a} \times 100 \quad (2.50)$$

A taxa de rejeição de sais para o segundo permeador é determinada por:

$$TRS_2 \% = \frac{C_{a2} - C_{p2}}{C_{a2}} \times 100 = \frac{C_a - C_{p2}}{C_a} \times 100 \quad (2.51)$$

A taxa de rejeição de sais para o terceiro permeador é determinada por:

$$TRS_3 \% = \frac{(C_{c1} + C_{c2}) - C_{p3}}{C_{c1} + C_{c2}} \times 100 = \frac{C_{c'} - C_{p3}}{C_{c'}} \times 100 \quad (2.52)$$

A partir da Equação (2.40), temos que:

$$Cc' = \frac{Q_{p3} C_{p3} + Q_{ct} C_{ct}}{Q_{c'}} \quad (2.53)$$

Substituindo a equação (2.8.33) na equação acima, temos:

$$Cc' = \frac{Q_{p3} C_{p3} + Q_{ct} C_{ct}}{(Q_{p3} - Q_{c3})} \quad (2.54)$$

2.8 POLARIZAÇÃO DE CONCENTRAÇÃO

A polarização de concentração resulta da formação de uma camada limite de alta concentração de soluto na superfície da membrana. Devido a uma alta taxa de fluxo, a membrana em espiral tem a tendência de aumentar a polarização de concentração e não danificá-la. Sabendo que na camada limite o comportamento é essencialmente laminar, o transporte do soluto a partir da camada limite para o seio da solução de alimentação ocorre por meio difusivo. Para que ocorra um balanço do processo difusivo do soluto na direção do seio da solução, $-D \left(\frac{dC}{dx} \right)$ e fluxo convectivo do soluto na direção da membrana (JC), a concentração de sais na superfície da membrana (Cs) deverá ser superior a concentrações de sais no seio da solução (Cb), conforme podemos observar na Figura 7.

Considerando que as membranas sempre apresentam imperfeições e que não existem incrustações na membrana/ interface alimentação, pode ocorrer uma difusão do soluto através da barreira semipermeável da membrana. No estado estacionário o transporte convectivo do soluto no sentido contrário,

"Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas"

incluindo o que passa através da membrana (JC_p). A partir das condições de contorno dada na Figura 7, o balanço de massa pode ser representado pela seguinte Equação (Taylor & Jacobs, 1996).

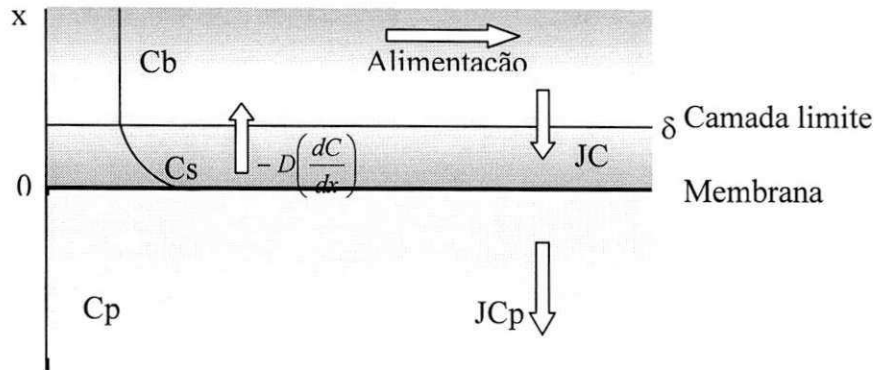


Figura 7: Condições da camada limite na membrana/ interface.

$$JC - \left(-D \frac{dC}{dx}\right) = JC_p \quad (2.55)$$

As condições de contorno são:

$$x = 0 \Rightarrow C = C_s$$

$$x = \delta \Rightarrow C = C_b$$

Integrando a Equação (2.55) e aplicando as condições limites, obtém-se:

$$JC - \left(-D \frac{dC}{dx}\right) = JC_p \quad \Rightarrow \quad JC - JC_p = D \frac{dC}{dx}$$

$$J(C - C_p) = D \frac{dC}{dx} \quad \Rightarrow \quad J \int_0^\delta dx = D \int_{C_s}^{C_b} \frac{dC}{(C - C_p)}$$

$$\frac{J\delta}{D} = \ln(C_s - C_p) - \ln(C_b - C_p)$$

$$\ln \frac{C_s - C_p}{C_b - C_p} = \frac{J\delta}{D} \quad (2.56)$$

e que também pode ser escrita como:

$$\frac{C_s - C_p}{C_b - C_p} = \exp\left[\frac{J\delta}{D}\right] \quad (2.57)$$

O coeficiente de transferência de massa K_s é definido como a razão entre o coeficiente de difusão D e a espessura da camada limite δ . Este coeficiente é função das propriedades físicas da alimentação, geometria do sistema e do fluxo do fluido. Altos valores de K_s indicam relativamente baixa polarização de concentração.

$$K_s = \frac{D}{\delta} \quad (2.58)$$

A rejeição do soluto na membrana pode ser expresso como:

$$TRS = \left(\frac{C_s - C_p}{C_s} \right) = \left(1 - \frac{C_p}{C_s} \right) \quad (2.59)$$

Substituindo as Equações (2.58) e (2.59) na Equação (2.57) obtém-se a expressão para a razão da polarização de concentração que é definida como (Taylor & Jacobs, 1996):

$$\frac{C_s}{C_b} = \frac{\exp(J/K_i)}{TRS + (1 - TRS)\exp(J/K_i)} = \beta \quad (2.60)$$

Para cada fabricante de elementos de membranas o β (coeficiente de polarização de concentração), pode variar numa faixa de 1,1 à 1,2.

A polarização de concentração aumenta a pressão osmótica na superfície da membrana, a qual causa uma redução no fluxo de água permeada (J_p) e um aumento no fluxo da passagem de sais (J_s) através da membrana (Brandt et al, 1992).

2.9 PRÉ-TRATAMENTO PARA ÁGUA DE POÇO TUBULAR

A atividade biológica em águas de poços é usualmente muito baixa. Na maioria dos casos, a água de poços não requer cloração para ser utilizada no processo de osmose inversa. Em alguns casos, a cloração é usada para oxidar o ferro e o manganês presentes na água antes da filtração. A água de poço

"Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas"

contendo sulfeto de hidrogênio não deve ser clorada ou exposta no ar. Na presença de oxidante o íon sulfeto pode oxidar para enxofre elementar que eventualmente pode aderir aos elementos de membranas, diminuindo o seu desempenho. A água de poço, usualmente contém baixas concentrações de partículas suspensas, devido ao efeito da filtração do aquífero. O pré-tratamento de água de poço é limitado a filtros de areia, adição de inibidores e filtros (Hydranautics, 1998).

2.10 INDICADORES DE INCRUSTAÇÕES

A tendência da água de alimentação de bloquear membranas é o que ocorre com mais freqüência em sistemas de membrana. Essa tendência pode ser avaliada em testes específicos de determinação de índices de fouling (incrustações), (Schneider & Tsutiya, 2001). Os índices mais utilizados são o IDS (Índice de Densidade de Sais) e o ISL (Índice de Langelier de Saturação). O IDS é calculado a partir de três intervalos de tempo: o primeiro intervalo (t_i) é o tempo necessário para a coleta dos primeiros 500 ml de permeado, o segundo intervalo (t_f) é tempo necessário para coletar os últimos 500 ml de permeado. O terceiro intervalo de tempo varia de 5, 10 ou 15 minutos e é o intervalo entre o término da coleta dos primeiros 500 ml de permeado e o início da coleta dos segundos 500 ml de permeado. O tempo padrão para o terceiro intervalo é 15 minutos, mas se a taxa de filtração for bastante reduzida podem ser utilizados intervalos mais curtos. A fórmula para o cálculo do índice IDS inclui o tempo total do teste (t_t):

$$IDS = 100 * \left[\frac{\left(1 - \frac{t_i}{t_f} \right)}{t_t} \right] \quad (2.61)$$

O Índice de Langelier de saturação (ISL), também chamado de índice de estabilidade de Langelier, o qual é usado para predizer a estabilidade de carbonato de cálcio na água, ou seja, se a água precipitará, dissolverá ou estará em equilíbrio com carbonato de cálcio. Langelier desenvolveu um método a partir

"Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas"

do pH, o qual a água se encontra saturada em carbonato de cálcio (chamado pHs). O ISL é definido pela diferença entre o pH atual e pH de saturação (pHs).

$$\text{ISL} = \text{pH} - \text{pHs} \quad (2.62)$$

Se o pH atual da água é abaixo do pHs, o ISL é negativo, isso implica que a água possui um potencial muito limitado de incrustação. Se o pH exceder o pHs, o ISL é positivo, esse fato condiz com uma água supersaturada com CaCO_3 , a qual possui tendência de formação de incrustação. À medida que o índice aumenta positivamente, o potencial de formação de incrustações também aumenta.

Cálculo do ISL

Para determinar o ISL é necessário saber a alcalinidade (mg/L como CaCO_3), a dureza em cálcio (mg/L Ca^{+2} como CaCO_3), sólidos totais dissolvidos (STD) e a temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$). Com estes dados e ajuda das seguintes equações pode-se obter o valor de ISL, (Mindler & Epstein, 1986).

$$\text{ISL} = \text{pH} - \text{pHs}$$

$$\text{pHs} = (9,3 + A + B) - (C + D)$$

onde:

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

$$B = -13,12 \times \text{Log} [^{\circ}\text{C} + 273] + 34,55$$

$$C = \text{Log} [\text{Ca}^{+2} \text{ como } \text{CaCO}_3] - 0,4$$

$$D = \text{Log} [\text{Alcalinidade como } \text{CaCO}_3]$$

2.11 INCRUSTAÇÕES

Os incrustantes são sais normalmente solúveis na água e que precipitam e se cristalizam na superfície das membranas. Isso é facilmente entendido quando verificamos que na área externa próxima à membrana a concentração de sais é bem superior à concentração do sal na água de entrada, podendo atingir o limite de solubilidade e assim precipitando. Uma maneira de evitar o problema é fazer com que mais água passe do lado externo das membranas, mas assim estaremos diminuindo a recuperação do sistema.

“Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas”

Os principais sais que promovem a incrustação são obviamente sais de cálcio e magnésio-(sulfato e carbonato), sílica como SiO_2 e hidróxido de ferro.

Uma das maneiras de contornar o problema é aumentar a temperatura da água e diminuir o pH, pois nesse caso aumentamos a solubilidade da sílica, incrustante mais difícil de remover.

Sujeira ou depósito orgânico - Podem ser entendidos como todo o material em suspensão na água e que se deposita na superfície da membrana. Podem ser classificados em três categorias: colóides, sólidos em suspensão e material biológico.

Os colóides podem ser de origem mineral ou orgânica, e tendem a coagular-se e se aglomerar na área próxima à superfície da membrana depositando-se nela. Os sólidos em suspensão são partículas maiores de origens diversas e que tem tendência a se depositar. O depósito orgânico de origem biológica é constituído por fungos e bactérias e apresenta maiores problemas porque estão presentes em praticamente todas as águas e normalmente se multiplicam em determinadas condições.

A sujeira ou depósito deve ser evitado com um pré-tratamento (filtração) adequado da água a ser tratada. Entretanto a oclusão das membranas causada por crescimento bacteriológico é mais difícil de combater, pois o emprego de biocida na água a ser tratada impede o seu consumo posterior.

As águas de subsolo apresentam baixo índice de microorganismos, mas as águas do mar, principalmente dentro de baías ou na proximidade de cidades contêm muitas matérias orgânicas e nutrientes para o desenvolvimento de bactérias tanto aeróbicas como anaeróbicas, que se desenvolvem no interior do equipamento enquanto este está fora de operação. A limpeza química recomendada neste caso é a limpeza alcalina, mais uma vez com a formulação indicada pelo fabricante (Sattamani, 2000).

2.12 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 passa 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 consumo humano (Taylor & Jacobs, 1996).

O pós-tratamento pode ser separado em duas diferentes unidades operacionais. A primeira é a estabilização do permeado e a segunda é a desinfecção. A escolha e a seqüência dessas unidades operacionais são funções do projeto e da qualidade da água.

2.12.1 ESTABILIZAÇÃO

O propósito da estabilização é produzir um permeado que não seja corrosivo e que tenha um pH entre 6,5 e 8,5. A estabilização é necessária porque o permeado geralmente contém baixo pH, resultado de uma baixa alcalinidade e um alto nível de dióxido de carbono. Quando a origem da água de alimentação para o processo de membranas é um poço, a água permeada pode ter uma quantidade significativa de hidrogênio sulfídrico (H_2S), gás tóxico corrosivo que deve ser removido durante o pós-tratamento (Beardsley & Minesota, 1998).

Três técnicas são geralmente usados para realizar a estabilização:

- ✓ Descarbonização ou degasificação para remover dióxido de carbono na qual irá aumentar o pH. Este tratamento também irá remover o gás hidrogênio sulfídrico se presente.
- ✓ Adição de produtos químicos tais como cal, carbonato de cálcio ou soda caústica para aumentar a alcalinidade .
- ✓ Mistura do permeado com uma certa quantidade da água de alimentação, para aumentar a alcalinidade e a quantidade de cálcio na água final.

"Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas"

2.12.2 DESINFECÇÃO

A desinfecção tem como objetivo assegurar que a água potável, antes de ser distribuída, esteja completamente isenta de microorganismos patogênicos.

Os dois procedimentos mais usados na desinfecção são: a radiação ultravioleta (UV) para aplicações industriais e a cloração, para águas de abastecimentos municipais (Silveira, 1999).

2.12.2.1 Radiação ultravioleta

A origem mais comum da luz ultravioleta (UV) é a lâmpada de vapor de mercúrio a baixa pressão, que emite comprimento de ondas de 253,7 nm. O grau de desinfecção é função direta da intensidade e do tempo de exposição (Dupont, 1996).

A dosagem de UV (expressa em mWs/cm^2) requerida para uma desinfecção eficaz, varia dependendo dos organismos (vírus, bactérias, protozoários, fungos, leveduras).

As principais vantagens da desinfecção de água por raios ultravioleta é que é um sistema compacto e fácil de operar, conectado na própria tubulação existente e tem as seguintes vantagens:

- ✓ Esterilização instantânea e segura dos microorganismos
- ✓ Esteriliza sem a utilização de produtos químicos
- ✓ Não altera o sabor e o odor da água
- ✓ Não forma composto tóxico
- ✓ Custo-benefício com segurança e eficiência

A principal desvantagem da ultravioleta é a pequena capacidade residual de desinfecção. A recontaminação biológica após o tratamento ultravioleta não pode ser tolerada, para isso se faz necessário manter o sistema de lentes do equipamento limpas, facilitando assim a passagem das ondas (Dupont, 1996).

"Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas"

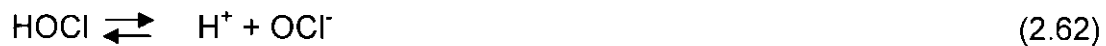
2.12.2.2 Cloração

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 (Cl_2) é adicionado à água e em pequenos sistemas, geralmente injeta-se soluções aquosas de hipoclorito de sódio (NaOCl) (Beardsley & Minnesota, 1998).

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. Frequentemente deve ser realizada a medição de cloro residual, embora somente a análise bacteriológica possa determinar a eficiência da desinfecção por cloro (Silveira, 1999).

2.13 LIMPEZA QUÍMICA DAS MEMBRANAS

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

"Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas"

tornar a água produto mais concentrada 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 (Sattamini, 2000).

Os principais produtos químicos para limpeza química de incrustantes são os produtos à base de ácido fosfórico ou ácido cítrico para a remoção de agentes incrustantes de natureza inorgânica e solução de hidróxido de sódio ou ácido etilenodiaminatetracético (EDTA) para a remoção de agentes incrustantes de natureza orgânica, partículas coloidais e materiais de origem biológica (Taylor & Jacobs, 1996).

No final da limpeza química, deve-se passar água desmineralizada pelos permeadores por aproximadamente uma hora e estes estarão aptos para operarem novamente, uma vez que foi observada uma estabilização do pH dos efluentes. Recomenda-se que a limpeza química seja realizada periodicamente após três meses de operação.

CAPITULO III**3 EXPERIMENTAL**

Neste capítulo são citados os materiais, equipamentos e a metodologia empregada para realizar esse trabalho.

3.1 ÁGUA PARA ESTUDO

✓ Foram usadas águas salobras provenientes de poços tubulares dos municipais de Nova Floresta, Riacho Santo Antônio, Catingueira e Campina Grande, na Paraíba.

3.2 PRODUTOS QUÍMICOS

- ✓ Cloreto de Sódio NaCl (Chemco P.A.)
- ✓ Ácido Sulfúrico (H₂SO₄) 0,02 N (Reagen P.A.)
- ✓ Ácido Cítrico C₆H₈O₇ (Chemco P.A.)
- ✓ Hidróxido de Amônia (NH₄OH), pH = 10
- ✓ Murexida
- ✓ Metilorange 0,4 %
- ✓ Fenolftaleína
- ✓ Cromato de Potássio 5,0 % (Reagen P.A.)
- ✓ Negro de Eriocromo
- ✓ Ácido Etilenodiaminotetracético (EDTA) 0,025 N (Vetec P.A.)
- ✓ Nitrato de Prata (AgNO₃) 0,05 N
- ✓ Hidróxido de Sódio 1N
- ✓ Kits da PoliControl para análises de: Ferro, Nitrato, Nitrito, Sulfato e

Sílica.

3.3 EQUIPAMENTOS

- ✓ pHmetro digital da HANNA INSTRUMENTS

- ✓ Condutivímetro – 600 ANALYSER
- ✓ Colorímetro digital da SMART
- ✓ Turbidímetro da HANNA INSTRUMENTS
- ✓ Fotômetro de Chama da ANALYSER

3.4 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

O procedimento experimental para análises físico-químicas dos sais presentes em cada amostra de água se encontra descritos assim como segue:

- **Cálcio (Ca^{++})**

Foi tomada 25 ml da amostra a ser analisada e colocou-se dentro de um Erlenmeyer. A esta amostra adicionou-se 2ml de NaOH 1N para alcalinizar a solução e uma pitada do indicador murexida.

A bureta foi zerada com o reagente EDTA 0,025 N. Iniciou-se a titulação até o ponto final de virada que foi indicado por uma mudança de coloração de rosa para lilás.

- **Magnésio (Mg^{++})**

Primeiramente tomou-se cerca de 25 ml da amostra a ser analisada e colocou-se dentro de um Erlenmeyer. A esta amostra adicionou-se 1 ou 2ml da solução tampão de amônia pH 10 e 1 pitada do indicador negro de eriocromo-T. A bureta foi zerada com o reagente EDTA 0,025N. Iniciou-se a titulação até o ponto de virada que foi indicado por uma mudança de coloração para azul.

- **Cloreto(Cl^-)**

Primeiramente pipetou-se uma alíquota de 25 ml da amostra a ser analisada e transferiu-se para um erlenmeyer de 250 ml. Adicionou-se 2 gotas do indicador cromato de potássio a 5%. A bureta foi zerada com o reagente AgNO_3 0,05N. Iniciou-se a titulação até o ponto de virada que foi indicado por uma mudança de coloração de laranja para vermelho — alaranjado.

- **Alcalinidade.**

Pipetou-se 25 ml da amostra a analisar e transferiu-se para um erlenmeyer de 250 ml. Adicionou-se 2 gotas de fenolftaleína. A bureta foi zerada com o reagente HCl 0,02N e iniciou-se a titulação até o ponto de virada, que foi indicado

por um descoramento do indicador. Este procedimento indica a presença do carbonato, mas em todas as amostras coletadas o carbonato estava ausente. Ainda neste mesmo erlenmeyer, adicionou-se 2 gotas do indicador alaranjado de metila e continuou-se a titulação até o ponto final de virada que foi indicado por uma mudança de coloração de laranja para laranja avermelhado. Este procedimento indica a presença do bicarbonato na amostra.

- **Silica (SiO₂)**

Colocou-se cerca de 1 Oml da amostra na cubeta e adicionou-se 20 gotas do reagente S1-S 1, agitou-se e aguardou-se 5 minutos. Após este tempo, adicionou-se 4 gotas do reagente SI-S2, agitou-se e aguardou-se 1 minuto. Foi colocado a cubeta com a reação no equipamento e realizou-se a leitura.

- **Ferro Total**

Colocou-se na cubeta do colorímetro 10 ml da amostra e adicionou-se 2 gotas do reagente FE-S 1. Agitou-se levemente, esperou-se 5 minutos e efetuou-se a leitura.

- **Sulfato (SO₄²⁻)**

Colocou-se na cubeta do colorímetro 10 ml da amostra e adicionou-se 5 gotas do reagente STF-S 1 e agitou-se. Posteriormente adicionou-se 5 gotas do reagente STF-S2 e agitou-se. Adicionou-se 1 medida do reagente STF-S3 (cloreto de bário, cristais), fechou-se a cubeta e agitou-se por inversão até total dissolução dos cristais. Deixou-se a cubeta em repouso por 5 minutos, colocou-a com a reação no equipamento e realizou-se a leitura.

- **Nitrato (NO₃⁻)**

Colocou-se na cubeta do colorímetro 10 ml da amostra e adicionou-se 4 gotas do reagente NTA-S 1 e agitou-se. Posteriormente adicionou-se 2 gotas do reagente NTA-S2 e agitou-se e aguardou-se 5 minutos. Adicionou-se depois, 5 gotas do reagente NTA-S3, agitou-se e aguardou-se mais 5 minutos. Adicionou-se novamente 4 gotas do reagente NTA-S4, agitou-se vigorosamente e aguardou-se 15 minutos. A cubeta foi colocada no equipamento e efetuou-se a leitura.

- **Nitrito (NO₂⁻)**

Colocou-se 10 ml da amostra na cubeta do colorímetro e adicionou-se 4 gotas do reagente NTI-S 1. Agitou-se e aguardou-se 5 minutos. Adicionou-se 4 gotas do reagente NTI-S2, agitou-se e aguardou-se 10 minutos (até que se dê

desenvolvimento completo da reação). A cubeta foi colocada no equipamento e efetuou-se a leitura.

- **Sódio e Potássio (Na^+ e K^+)**

Após o aparelho estar ligado e ajustado, mergulhou-se o cateter do fotômetro de chama no becker contendo água destilada e ajustou-se o zero para sódio e potássio (que são os elementos analisados neste aparelho), utilizando para isto o controle do zero. Em seguida, mergulhou-se o cateter em um becker contendo o padrão de calibração e ajustou-se com o controle de padrão, para o valor do devido padrão. Mergulhou-se o cateter em um becker contendo a amostra desejada e efetuou-se a leitura diretamente no display.

3.5 CARACTERÍSTICAS E COMPOSIÇÃO DAS MEMBRANAS UTILIZADAS

1) Fluid System - TFC®HF

Tipo :

Configuração: Espiral

Composição da membrana: Poliamida

Capacidade:

Fluxo do permeado: 1,08 m³/dia

Rejeição de sais: 98,2 %

Área nominal: 0,576 m²

Aplicação:

pH padrão da água de alimentação: 4,0-11,0

pH padrão: 7,5

Capacidade de limpeza pH padrão: 2,5-11,0

Operação máxima de temperatura: 45°C

Operação normal de temperatura: 25°C

Operação de pressão: 14,05 kgf/cm²

2) Fluid System - TFC®ULP

“Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas”

Tipo:

Configuração: Espiral

Composição da membrana: Poliamida

Capacidade:

Fluxo do permeado: 0,68 m³/dia

Rejeição de sais: 99,0 %

Área nominal: 0,576 m²

Aplicação:

pH padrão da água de alimentação: 4,0-11,0

pH padrão: 7,5

Capacidade de limpeza pH padrão: 2,5-11,0

Operação máxima de temperatura: 45°C

Operação normal de temperatura: 25°C

Operação de pressão: 7,7 kgf/cm²

3) Fluid System - TFC®HR

Tipo:

Configuração: Espiral

Composição da membrana: Poliamida

Capacidade:

Fluxo do permeado: 0,68 m³/dia

Rejeição de sais: 99,4%

Área nominal: 0,576 m²

Aplicação:

pH padrão da água de alimentação: 4,0-11,0

pH padrão: 7,5

Capacidade de limpeza pH padrão: 2,5-11,0

Operação máxima de temperatura: 45°C

Operação normal de temperatura: 25°C

Operação de pressão: 14,05 kgf/cm²

3.6 SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE INVERSA

O sistema de dessalinização piloto é constituído de três elementos de membranas para produção de água potável a partir de água salobra. O sistema consta das seguintes unidades: uma bomba de alta pressão de 1/4 CV modelo B48 0596 da Procon, operando com pressão máxima de 20 kgf/cm², um filtro de acetato de celulose (F) com resina melamínica de 5 μm para prevenir incrustações nas membranas e três tanques para armazenar a água de alimentação(TA), produto(TP) e concentrado(TC), três permeadores que operam com três tipos de membranas de poliamida aromática com 6,35 cm de diâmetro por 35,56 cm de comprimento cada, adquiridas da Kock Membrane Systems para osmose inversa, assim como segue:

- ✓ Membrana de alta filtração (HF)
- ✓ Membrana de ultrabaixa pressão (ULP)
- ✓ Membrana de alta rejeição (HR)

As membranas foram inseridas nos permeadores de alta pressão e conectadas em série em uma estrutura de PVC obedecendo a seguinte ordem: HF, ULP, HR. Cujas características estão apresentadas no item 3.4. Consta ainda com dois manômetros (M) para medirmos a pressão de alimentação e saída, e dois rotâmetros (R) para medirmos a vazão do permeado e concentrado, conforme está apresentado na Figura 8.

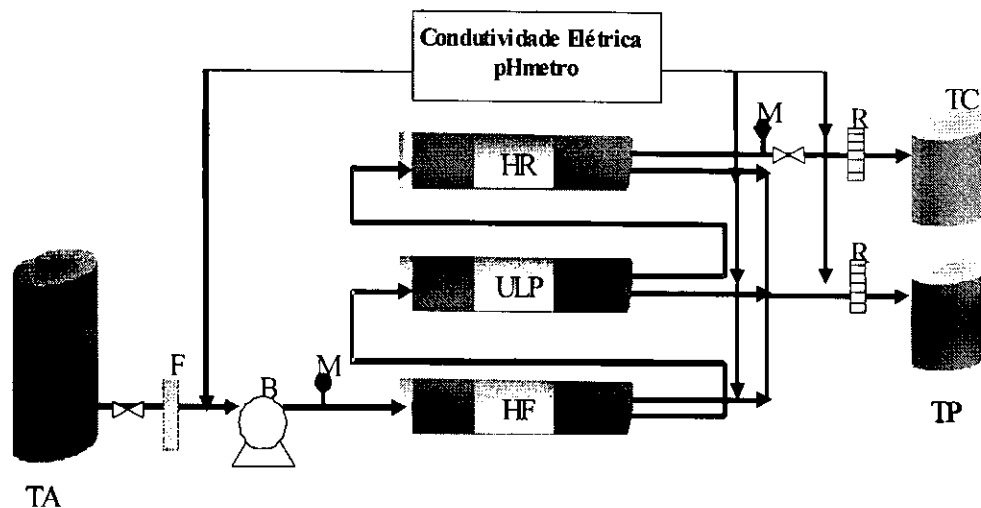


Figura 8: Sistema de dessalinização via osmose inversa.

3.6.1 Processo experimental

PARTE I - O Sistema I foi denominado aquele contendo três elementos de membranas em série conforme esquema apresentado na Figura 5 do Capítulo II, o qual realizamos as bateladas variando a pressão aplicada as membranas na seguinte faixa de pressão de 8 Kgf/cm² à 14 Kgf/cm². O Sistema II foi denominado aquele contendo dois elementos de membranas em paralelo e em série com um terceiro conforme esquema apresentado na Figura 6 do Capítulo II, a faixa de pressão a qual operamos foi de 3 kgf/cm² à 7 kgf/cm².

Durante as bateladas foram analisados a condutividade elétrica e o pH da água de alimentação, da água de cada elemento de membrana, do concentrado e permeado total, conforme estão apresentados nas Tabelas de A1 a A20, em Anexo I. Após as bateladas foram realizadas análises físico-químicas da água de alimentação, do permeado, do concentrado e de cada elemento de membrana, como também estão nas Tabelas de A21 a A32, em anexo I.

Neste trabalho introduzimos a etapa de lavagem química dos elementos de membranas com o objetivo de estudar o efeito de manutenção, com o ácido cítrico, ácido clorídrico e hidróxido de sódio.

Para dar início ao processo de dessalinização foi necessário obter os seguintes dados da água em estudo: pH e condutividade elétrica da solução de alimentação do sistema.

A outra fase foi observar se as válvulas do sistema estavam totalmente abertas e, então ligar o dessalinizador.

Após este ajuste inicial, a água do poço foi bombeada para o dessalinizador durante um período de 3 minutos, sem aplicação da força motriz (pressão), para expulsar a solução remanescente nas membranas. Em seguida, foi coletada uma amostra de 25 ml da água de alimentação e obtida a sua condutividade elétrica e potencial hidrogeniônico. A partir desse instante, a válvula de controle de pressão da saída do concentrado foi regulada para uma determinada pressão.

Os dados obtidos, da condutividade elétrica e do potencial hidrogeniônico dos efluentes do permeado e do concentrado, foram tomados em intervalo de 2 a 5 minutos para cada leitura. Em função do volume disponível, as bateladas foram de 20 a 30 minutos.

A capacidade de produção da água potável e concentrado do dessalinizador foi observada através de dois rotâmetros. Já para os permeadores, determinamos a vazão, medindo a quantidade de tempo necessária para atingir 50 ml (em uma proveta).

Para realizar o levantamento de dados da condutividade elétrica do permeado de cada permeador, foram coletadas amostras de 25 ml desses efluentes nos mesmos intervalos de tempo.

Com a finalidade de realizar as análises físico-químicas, colhemos amostras de 500 ml da água de alimentação, do permeado e concentrado total e de cada elemento de membrana.

Após o término das bateladas, as membranas passaram por um processo de lavagem durante 5 minutos, com água destilada, com o objetivo de expulsar toda a solução remanescente nas membranas, evitando, assim, a precipitação dos sais na sua superfície e possíveis fontes de proliferação de microorganismos.

PARTE II - Para a conclusão do trabalho utilizamos ainda a água de mais dois poços tubulares, a do município de Catingueira-PB, onde coletamos dados do dessalinizador que opera com uma pressão de $7,0 \text{ kgf/cm}^2$ e produz $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$ de água. Dados coletados no período de dois meses, conforme é apresentado na Tabela B5 em Anexo II, das vazões do concentrado e do permeado dia a dia, e também mês a mês, conforme apresentado na Tabela B6 em Anexo II. Foram coletadas amostras da água de alimentação, permeado e concentrado antes e após a limpeza química para verificar a qualidade da água através de análises físico-químicas.

“Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas”

Também coletamos água do poço do Shopping Luiza Motta em Campina Grande-PB que possui um TSD=2829,34 mg/L, na qual foram feitas bateladas com as pressões de 6,0 e 8,0 kgf/cm², antes e após limpeza química. Com esta mesma água foram feitas bateladas com a pressão de 8,0 kgf/cm² com reciclo total dos efluentes por 24 horas, com intervalos, medindo as vazões do concentrado e do permeado de 10 em 10 minutos, para observarmos a redução do fluxo do permeado e o aumento do fluxo do concentrado com o tempo de operação do equipamento.

3.7 PROCESSO DE LIMPEZA DOS ELEMENTOS DE MEMBRANAS

A limpeza química dos elementos de membranas deve-se fazer periodicamente com o propósito de manter o desempenho dos elementos de acordo com as normas técnicas dos fabricantes de membranas.

O processo de limpeza também funciona para os dois sistemas estudados nas duas etapas, pois apenas o arranjo das membranas que foram modificados.

Para dar início a limpeza química foi preparada uma solução de ácido cítrico (0,27 g/L), de pH = 3,0 (conforme orientação do fabricante de membrana), num tanque de capacidade volumétrica de 40 litros.

O volume necessário para embeber as membranas foi calculado a partir do volume de cada vaso de alta pressão juntamente com o volume de toda tubulação contida no sistema. O volume calculado foi de aproximadamente 4,0 litros de solução.

A solução que passou durante um período de cinco minutos pelas membranas foi totalmente descartada. Após este procedimento os elementos de membrana ficaram embebidos na solução durante dois minutos.

Descartou-se novamente a solução, e durante um intervalo de tempo de duas horas lavou-se os elementos de membrana com reciclo constante da solução ácida.

A rinsagem das membranas foi efetuada com água desmineralizada com o objetivo de retirar a solução ácida nos elementos de membranas visando neutralizar o pH. Para essa etapa levou-se um tempo de duas horas.

"Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas"

CAPÍTULO IV**4 RESULTADOS E DISCUSSÕES PRELIMINARES**

Os resultados apresentados neste capítulo são pertinentes aos seguintes sistemas: Sistema I – Três elementos de membranas em série

Sistema II – Dois elementos de membranas em paralelo e em série com um terceiro.

4.1 AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE DESSALINIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA PRESSÃO, VAZÃO E RECUPERAÇÃO.

O Capítulo II descreve os modelos I e II do sistema de dessalinização. A partir deste estudo, foram analisados os melhores desempenhos em relação à produção de permeado.

As Tabelas 4.1 e 4.2, apresentam dados do comportamento das vazões dos efluentes e recuperação, de acordo com as pressões aplicadas ao sistema. Para calcular a taxa de recuperação do sistema, utilizamos a Equação (2.8) do Capítulo II.

Tabela 4.1: Variação da produção do permeado, concentrado e recuperação da água do poço de Nova Floresta-PB de STD = 2163,00 mg/L T=26°C, para o sistema I.

P (Kgf/cm ²)	Q _p (L/min)	Q _c (L/min)	R (%)
8,0	0,68	1,00	40,5
10,0	0,80	0,70	53,3
12,0	1,05	0,40	72,6
14,0	1,19	0,20	92,2

Tabela 4.2: Variação da produção do permeado, concentrado e recuperação para água do poço de Nova Floresta-PB de STD = 1820,12 mg/L T=26°C, para o sistema II.

P (Kgf/cm ²)	Q _p (L/min)	Q _c (L/min)	R (%)
3,0	0,20	1,90	9,52
5,0	0,39	1,21	24,37
7,0	0,50	0,50	50,00

Nas Tabelas 4.1 e 4.2, observou-se que a recuperação dos dois sistemas estudados aumenta em função da pressão de operação. O sistema I apresentou melhor rendimento comparado com o sistema II, só que em condições diferentes de pressões, visto que o sistema II se limitou com a pressão de 7,0 kgf/cm². A recuperação máxima obtida no sistema II foi de 50% sob o efeito de 7,0 Kgf/cm², superando a recuperação de 40,5 % obtido no sistema I sob o efeito da pressão de 8,0 Kgf/cm².

Todavia o sistema I apresentou melhor rendimento devido o arranjo oferecer condições de operar sob o efeito de pressões acima de 7,0 Kgf/cm². Esse fato ocorre devido à uniformidade da pressão ao longo dos elementos de membranas, quando estes se encontram em série. No caso do sistema de membranas em paralelo, a perda de pressão se dá em relação a pressão de entrada nos elementos, devido a sua distribuição, acarretando assim menor taxa de permeação.

Porém as membranas arranjadas em paralelo mostram que a taxa de incrustação durante o processo é inferior ao do sistema de membranas em série.

4.2 COMPORTAMENTO DO POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH), ANTES E APÓS A LIMPEZA QUÍMICA.

As variações do pH dos efluentes do permeado, concentrado e permeado de cada elemento de membrana em função do tempo antes e após a limpeza química dos elementos de membranas para a água salobra do poço do Convento

das Clarissas, são representadas nas Figuras de 9 a 12, referentes às tabelas A15, A16, A17 e A18 as quais se encontram no Apêndice I. Observou-se que os valores do pH do permeado para todos os casos estudados foram inferiores ao concentrado. Esse fato ocorre devido à extração de sais na solução de alimentação, isto é, a ausência de carbonatos e bicarbonatos no permeado faz por onde o pH diminua e a presença destes no concentrado faz por onde o pH aumente. Observou-se também, que houve uma diminuição do pH do permeado e concentrado após a limpeza química para todos os casos estudados. Esse fato ocorre porque a membrana após a sua limpeza consegue extrair ainda mais os sais dissolvidos da solução de alimentação, que com o tempo de operação ficam aderidos às paredes das membranas.

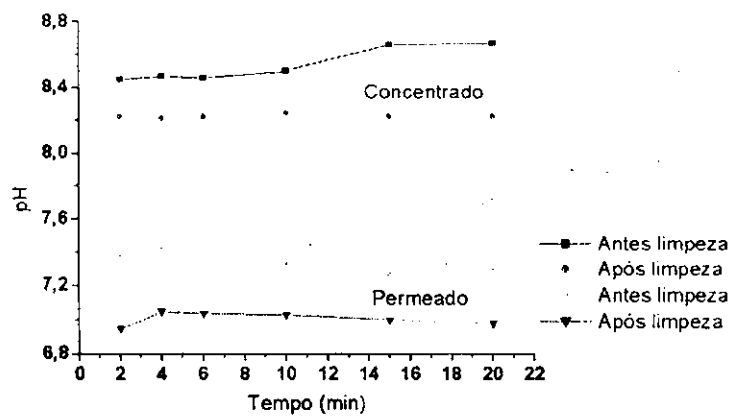


Figura 9: Variação do pH do permeado e concentrado, sob o efeito da pressão de 10 kgf/cm^2 , da água do poço do Convento das Clarissas, antes e após a limpeza química, (Sistema I).

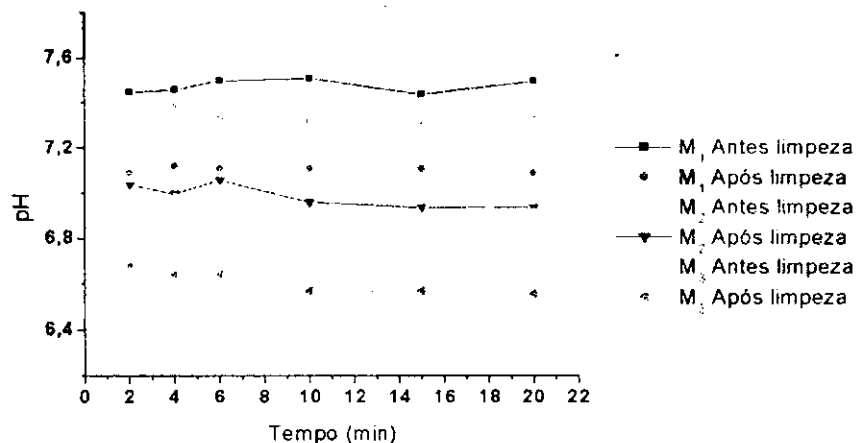


Figura 10: Variação do pH da água permeada de cada elemento de membrana, antes e após a limpeza química sob o efeito da pressão de 10 kgf/cm^2 , da água do Convento das Clarissas, (Sistema I).

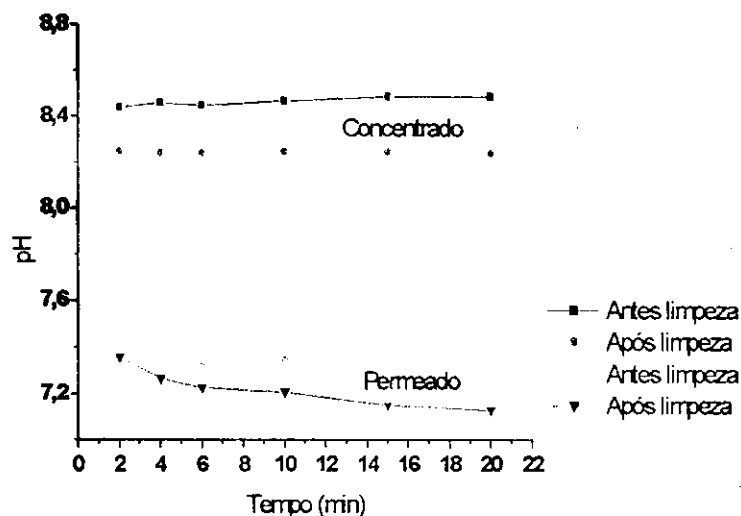


Figura 11: Variação do pH do concentrado e permeado sob pressão de 12 kgf/cm², da água do poço do Convento das Clarissas, C. Grande – PB, Sistema I.

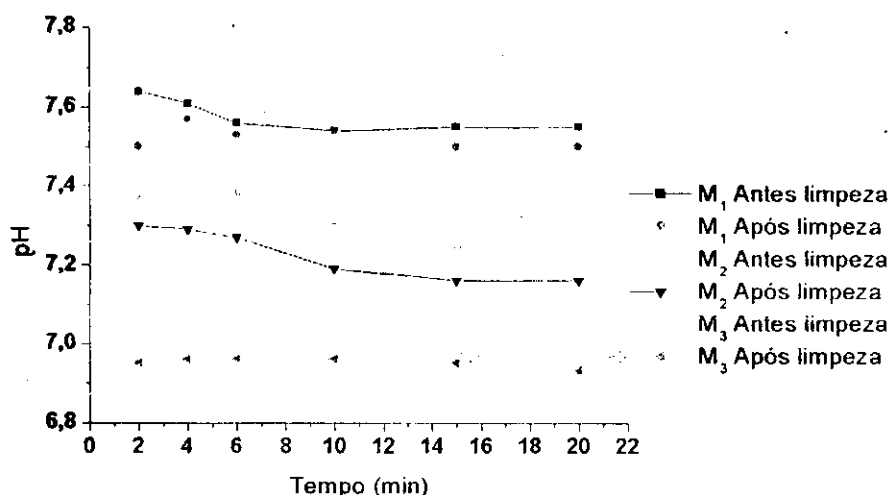


Figura 12: Variação do pH da água de cada elemento de membrana sob pressão de 12 kgf/cm², da água do poço do Convento das Clarissas, C. Grande-PB Sistema I.

4.3 VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA ANTES E APÓS LIMPEZA QUÍMICA.

A variação da condutividade elétrica dos efluentes do permeado, concentrado e permeado de cada elemento de membrana em função do tempo antes e após a limpeza química dos elementos de membranas para a água do

poço do Convento das Clarissas estão representadas nas Figuras 13 e 14 referentes as Tabelas A15 e A16 as quais se encontram no Apêndice I.

Podemos observar que as curvas apresentam um comportamento constante para todos os casos. A curva do permeado total que está representada na Figura 13 se aproxima de zero, com pouca variação após a limpeza química, mostrando assim que a qualidade da água é excelente e torna-se viável para o consumo humano. Observou-se que a condutividade elétrica do concentrado diminuiu também com pequena variação após a limpeza, mas significativa pelo fato de mostrar a eficiência da limpeza. A Figura 14 apresenta a condutividade elétrica do permeado de cada elemento de membrana em função do tempo, as curvas do primeiro elemento de membrana foram superiores aos demais, a condutividade elétrica vai diminuindo de um elemento para outro, antes e após a limpeza, devido ao fato das membranas apresentarem características diferentes, quer dizer, a taxa de permeação da $M_3 > M_2 > M_1$.

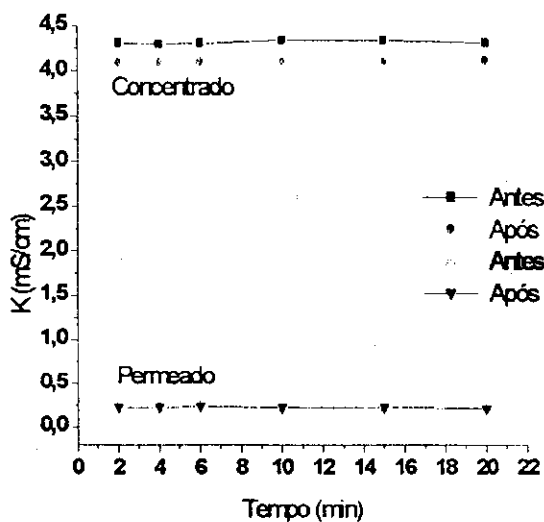


Figura 13: Variação da condutividade elétrica do concentrado e permeado antes e após limpeza, sob $P = 8,0 \text{ kgf/cm}^2$, água das Clarissas, Sistema I.

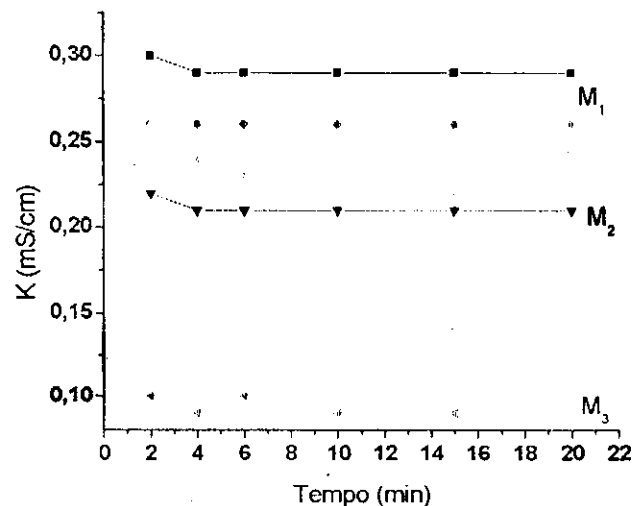


Figura 14: Variação da condutividade elétrica da água de cada elemento de membrana antes e após limpeza, sob $P = 8,0 \text{ kgf/cm}^2$, água das Clarissas, Sistema I.

Observa-se também que na Figura 13 a condutividade elétrica do concentrado é superior a do permeado, isto significa que os sais presentes na água de alimentação não estão atravessando a membrana de osmose inversa,

ficando retido na corrente do concentrado. Comportamento semelhante foi observado por Oliveira (2002).

4.4 COMPORTAMENTO DO COEFICIENTE DE TRANFERÊNCIA DE MASSA

Para calcular o coeficiente de transferência de massa do solvente (água permeada) K_w , foi feito com o auxílio da Equação (2.1) e o coeficiente de transferência de massa do soluto (concentrado) K_s , foi feito combinando as Equações 2.1 e 2.4, resultando na Equação (2.4.1), apresentadas no Capítulo II.

De acordo com a Equação (2.1), observa-se que o fluxo de água através da membrana depende da diferença entre o gradiente de pressão que atua no elemento de membrana durante o processo, e o gradiente de pressão osmótica da solução, bem como do coeficiente de transferência de massa da água. Este coeficiente é um parâmetro que depende da característica de cada membrana. A grandeza deste coeficiente depende de outros segmentos que são: o potencial iônico da solução, pressão de operação e os outros interferentes que possam diminuir a permeação.

As Figuras 15 a 18, ilustram os resultados dos coeficientes de transferência de massa do solvente e do soluto antes e após a limpeza química, que encontramos estes resultados nas Tabelas 33 e 34 no Apêndice I.

Nas Figuras 15 e 17, observa-se que o coeficiente de transferência de massa do solvente a água, diminui à medida que o gradiente de pressão aumenta para uma dada concentração, como foi verificado por Voros et al (1996). Vimos também que houve uma diminuição no coeficiente de transferência de massa do solvente (K_w) após a limpeza química para os dois sistemas. Em relação ao coeficiente de transferência de massa do soluto apresentado nas Figuras 16 e 18, aumentam à medida que aumentamos a pressão, também para os dois sistemas, ocorrendo uma diminuição dos coeficientes após a limpeza química. Podemos verificar que, de acordo com a Equação (2.4.1) resultante, comprovamos que ao aumentarmos a pressão sem variar a concentração da solução, vai haver o aumento do coeficiente de transferência de massa do soluto, K_s .

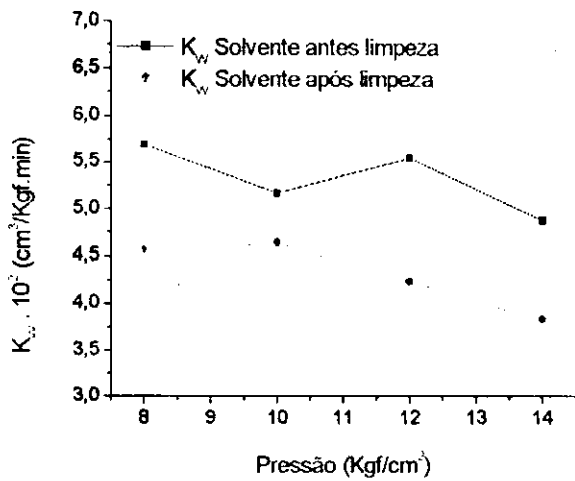


Figura 15: Variação do coeficiente de transferência de massa do solvente com a pressão aplicada, para o Sistema I, antes e após a limpeza química.

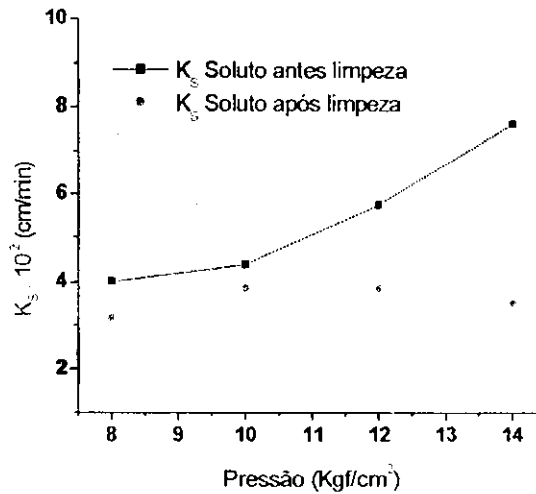


Figura 16: Variação do coeficiente de transferência de massa do soluto com a pressão aplicada, para o Sistema I, antes e após a limpeza química.

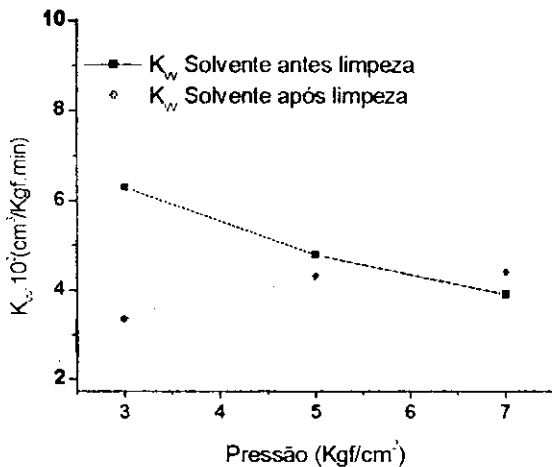


Figura 17: Variação do coeficiente de transferência de massa do solvente com a pressão aplicada, para o Sistema II, antes e após a limpeza química.

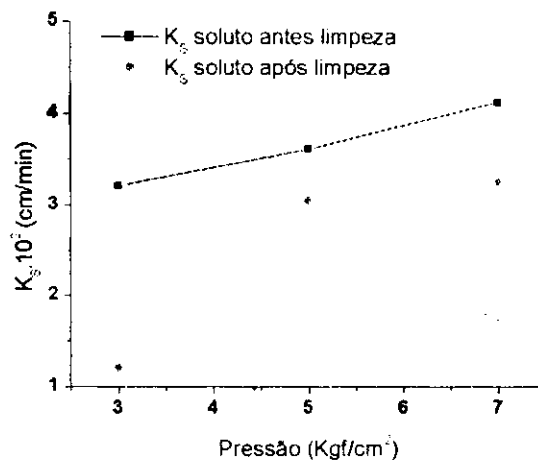


Figura 18: Variação do coeficiente de transferência de massa do soluto com a pressão aplicada, para o Sistema II, antes e após a limpeza química.

4.5 COMPORTAMENTO DA QUANTIDADE DE STD (SÓLIDOS TOTAIS DISSOLVIDOS) PARA O SISTEMA I E II.

Nas Figuras 19 e 20 estão apresentados os resultados das quantidades de sólidos totais dissolvidos do concentrado e permeado respectivamente, antes e após a limpeza química para o sistema I. Obtemos estas quantidades de STD através das análises físico-químicas da água, que encontramos nas Tabelas 33 e 34 no Apêndice I. Nas Figuras 19 e 21 podemos observar que: a quantidade de sólidos totais dissolvidos do concentrado (STD_C) aumenta à medida que aumentamos a pressão de operação e também aumenta após a limpeza química para os dois sistemas. Isso ocorre porque ao limparmos as membranas vai ocorrer uma maior retirada de sais, ficando o concentrado com maior concentração de sais e o permeado com menor concentração. Já na Figura 20 observa-se que a quantidade de sólidos totais dissolvidos do permeado (STD_W) aumenta com o aumento da pressão, mas diminui após a limpeza química. Isso ocorre porque com o processo de limpeza houve uma eliminação maior de sais, e conseqüentemente melhorando a qualidade do produto, o permeado.

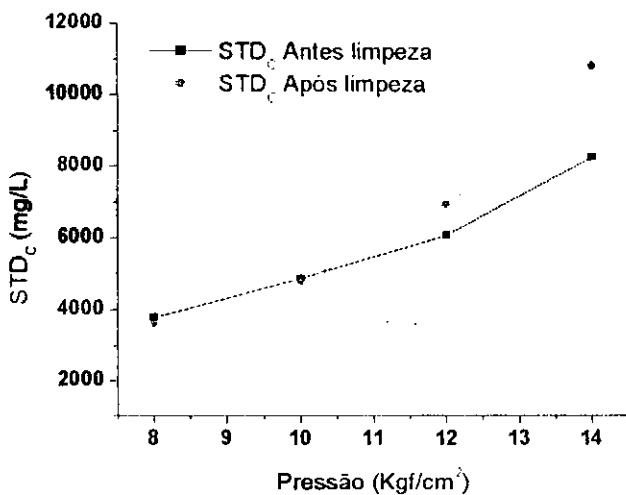


Figura 19: Variação dos STD com a pressão aplicada do concentrado, antes e após a limpeza química, Sistema I.

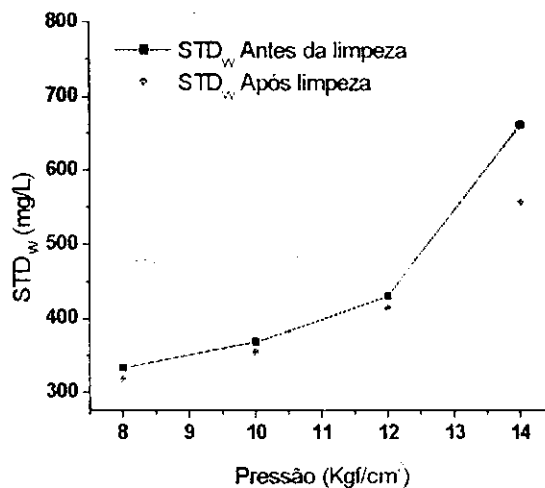


Figura 20: Variação dos STD com a pressão aplicada do permeado, antes e após a limpeza química, Sistema I.

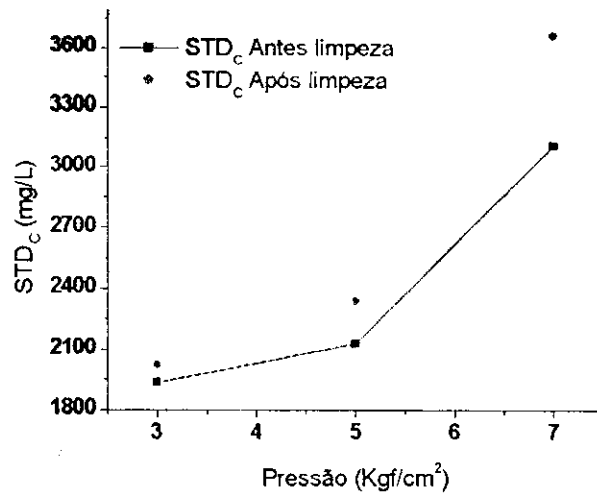


Figura 21: Variação dos STD com a pressão aplicada do concentrado, antes e após a limpeza química, Sistema II.

4.6 COMPORTAMENTO DO FLUXO DA PASSAGEM DE SAIS PARA O SISTEMA I E II.

Nas Figuras 22 e 23, apresentam as variações dos fluxos das passagens de sais com a pressão aplicada, para o Sistema I e II. O fluxo da passagem de sais foi determinado através das Equações (2.4) e (2.5), encontradas no Capítulo II.

Podemos observar que estes fluxos de sais diminuíram com a limpeza química com os dois sistemas, como era de se esperar, pois foram retirados os excessos de sais depositados na membrana que contribuía para o aumento desse fluxo, e conseqüente diminuindo o fluxo de sais (J_s) e aumentando o fluxo do permeado (J_w).

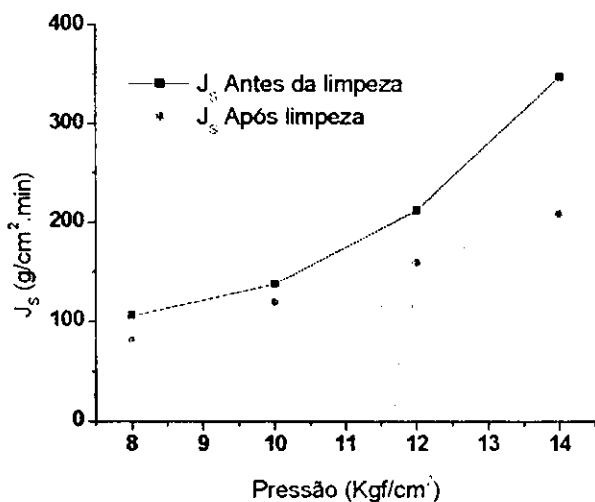


Figura 22: Variação do fluxo da passagem de sais com a pressão aplicada, para o Sistema I.

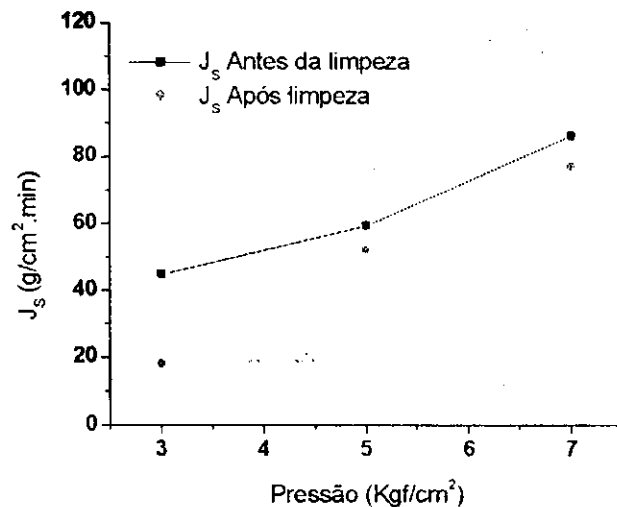


Figura 23: Variação do fluxo da passagem de sais com a pressão aplicada, para o Sistema II.

4.7 COMPORTAMENTO DO FLUXO DO PERMEADO

Nas Figuras 24 e 25, apresentam as variações dos fluxos do permeado com a variação da pressão aplicada, para o sistema I e II. O fluxo do permeado foi determinado através das Equações (2.1) e (2.2), encontradas no Capítulo II.

Nas Figuras 24 e 25 podemos verificar que os fluxos do permeado, encontrados nas Tabelas 33 e 34 no Apêndice I, aumentam com o aumento da pressão para o sistema I e II, verificamos ainda que, para o sistema I esta produção foi 50% maior que para o sistema II, só que para um ΔP do sistema I > ΔP sistema II. Isso ocorreu também devido o sistema I oferecer condições de operar sob o efeito de pressões acima de $7,0 \text{ kgf/cm}^2$.

Segundo Schneider e Tsutiya (2001), a operação econômica para sistemas de membranas, depende da capacidade de garantir um fluxo alto (J_w) na pressão de operação mais baixa possível, durante longos períodos de tempo sem perda de eficiência.

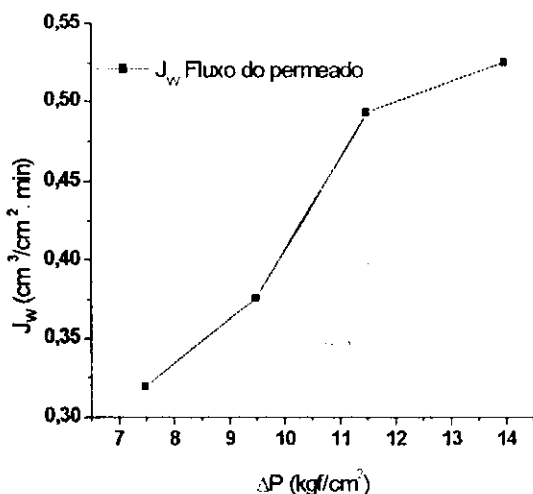


Figura 24: Variação do fluxo do permeado com a diferença de pressão aplicada, para o Sistema I.

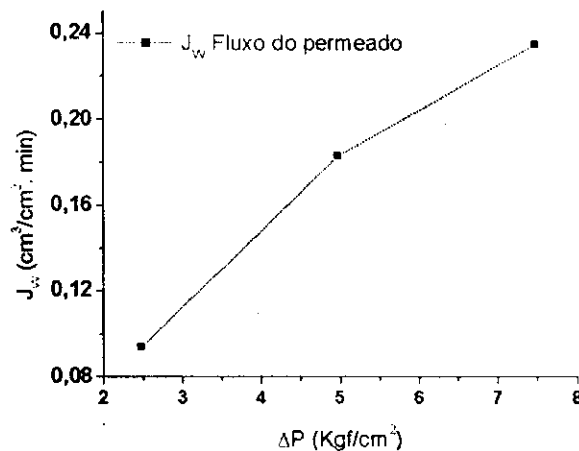


Figura 25: Variação do fluxo do permeado com a diferença de pressão aplicada, para o Sistema II.

4.8 VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SAIS PRESENTES NA ÁGUA ANTES E APÓS A LIMPEZA QUÍMICA

Nas Figuras 26 e 27, estão apresentadas as concentrações de sais antes e após a limpeza química com o sistema I, as quais encontramos nas Tabelas B8 e B9 no Apêndice II, fazendo uso da água do poço do Shopping Luiza Motta no

“Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas”

município de Campina Grande-PB. Podemos verificar em ambas que a qualidade da água produzida, teve uma redução na concentração de sais do permeado, e um aumento na concentração de sais do concentrado, isto ocorre porque após a limpeza química as membranas oferecem melhor taxa de permeação. Conseqüentemente a taxa de rejeição de sais aumenta.

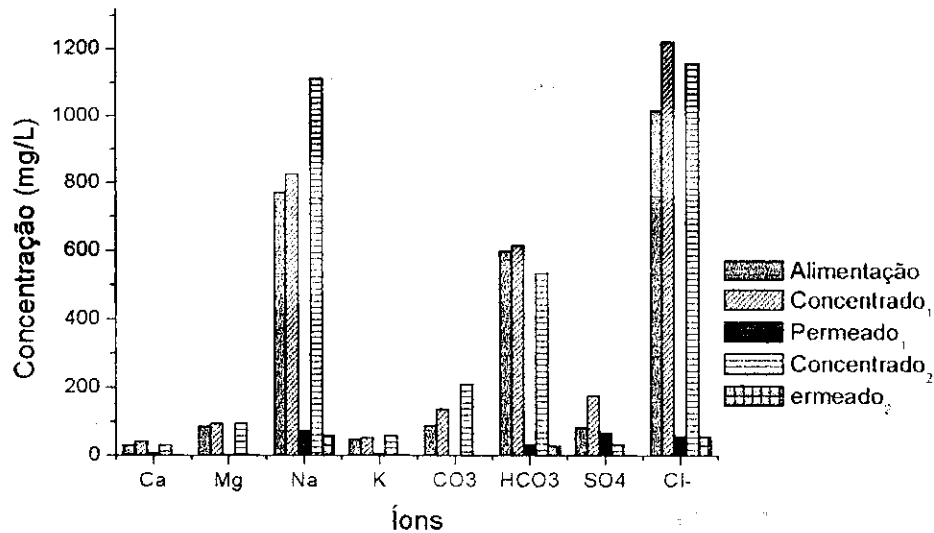


Figura 26: Perfil da concentração de sais presentes na água, antes e após a limpeza química, fazendo uso do Sistema I com a água do poço do Luiza Motta, sob pressão de 6,0 kgf/cm²,

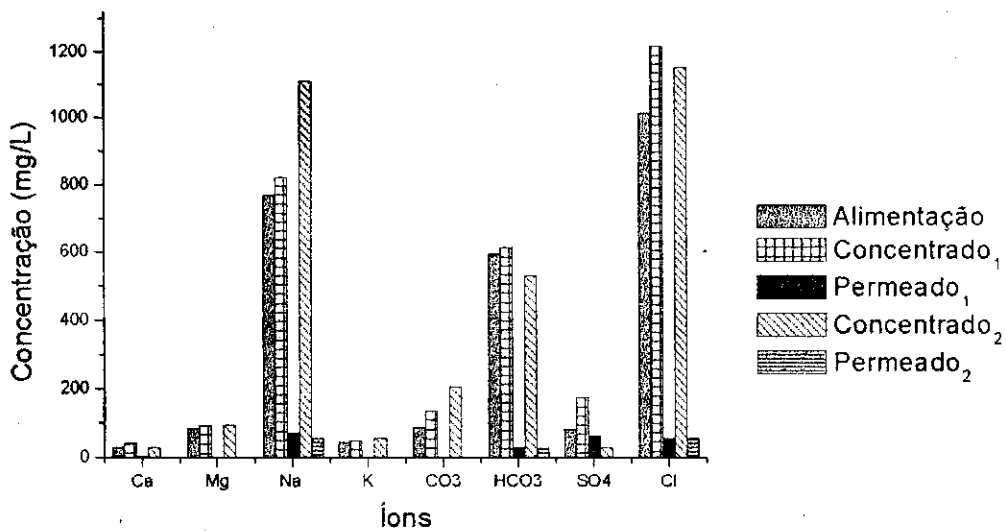


Figura 27: Perfil da concentração de sais presentes na água, antes e após a limpeza química, fazendo uso do Sistema I com a água do poço do Luiza Motta, sob pressão de 8,0 kgf/cm²,

4.9 COMPORTAMENTO DA VAZÃO DO PERMEADO E CONCENTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO

Com o objetivo de estudar o comportamento do desempenho do sistema I, os afluentes, permeado e concentrado foram reciclados durante o período de 300 minutos para o tanque de alimentação, fazendo uso da água do poço do Luiza Motta. Considerando que a recuperação média atingida foi de 13,24 %, os dados apresentados na Figura 28, mostra com clareza a representação do efeito de mistura no tanque de alimentação, a qual está sob o efeito de uma razão acima de 5:1 (Q_C/Q_P). Verificamos que houve uma tendência de queda da vazão do permeado de 5,1 %, e um aumento da vazão do concentrado em 3,4 %. Esse mecanismo utilizado foi para mostrar o aumento da concentração de sais dos afluentes, concentrado e permeado. A limpeza química, normalmente dar-se-á em função do aumento da pressão, entre a pressão de entrada e saída do sistema que varia em função do fabricante das membranas. Na prática torna-se como referência um diferencial de 15 % para aumento da pressão, e 10 % para redução da vazão do permeado, (Schneider e Tsutiya, 2001).

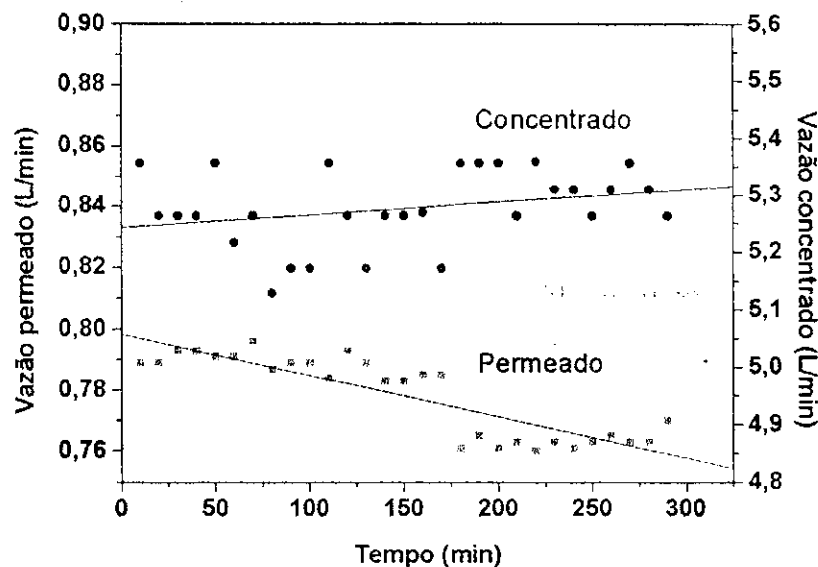


Figura 28: Vazão do permeado e concentrado em função do tempo, sob pressão de 8,0 kgf/cm², fazendo uso da água do poço do Luiza Motta.

Na Figura 29 está representada o acompanhamento da variação da vazão do concentrado e permeado do poço do município de Catingueira-PB, desde o

período de sua implantação que foi de 15/11/2001 até 17/01/2003, onde podemos encontrar na Tabela B5 e B6 em Anexo II. Podemos verificar que seu comportamento foi bastante estável em termos de vazão, e a limpeza química dos elementos de membranas só foi realizada após o período de dois anos devido sua água de alimentação ser de boa qualidade com 946,50 mg/L de STD como vemos no laudo de análise apresentado na Tabela 11 em Anexo II, e quando houve uma queda da vazão do permeado de 10%.

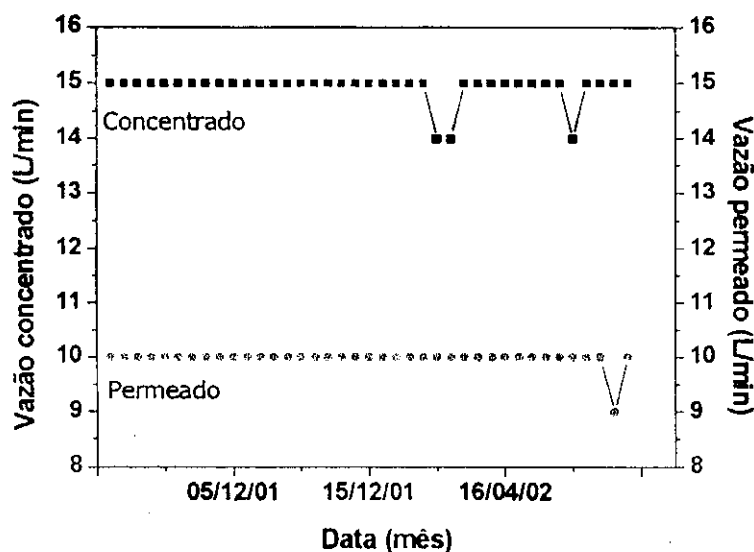


Figura 29: Vazão do permeado e concentrado em função do tempo, sob pressão de 7,0 kgf/cm², água do poço de Catingueira-PB.

4.10 – COMPORTAMENTO DO ÍNDICE DE SATURAÇÃO DE LANGELIER (ISL)

Conforme apresentado no Capítulo II, item 2.10, o ISL prediz o grau de incrustação da água de alimentação do sistema, o qual está apresentado na Tabela 4.3, onde calculamos estes índices para as diversas águas utilizadas no nosso trabalho. Podemos verificar que a água que obteve o maior tendência de formação de incrustação foi a água do poço do município de Catingueira-PB, pelo seu valor ser maior e positivo, esse fato condiz com uma água supersaturada com CaCO₃, apesar de ser uma água com baixa concentração de Sólidos Totais Dissolvidos (946,50 mg/L), possui esta característica; daí necessitando de um pré-tratamento, como exemplo um anti-incrustante, para que não ocorra

incrustações freqüentes as suas membranas. Verificamos ainda que a água do poço do município de Nova Floresta-PB obteve um valor negativo, implicando que a água possui um potencial muito limitado de incrustação.

Tabela 4.3 – Comportamento do Índice de Saturação de Langelier para as diversas águas estudadas no nosso trabalho.

Poço	T°C	A	B	C	D	pH	pHs	ISL
N. Floresta	26,0	0,23	2,07	1,85	1,00	4,24	8,75	-4,51
L. Motta	26,4	0,25	2,06	1,48	2,84	7,57	7,29	0,28
Catingueira	26,0	0,19	2,07	1,84	2,55	7,68	7,17	0,51
Clarissas	26,0	0,23	2,07	1,68	2,57	7,64	7,36	0,28

CAPÍTULO V**5 CONCLUSÕES**

1. O resultado do trabalho desenvolvido nos permite concluir que: o sistema com membranas em série (Sistema I) apresentou melhor desempenho do que o sistema em paralelo (Sistema II), dentro da faixa de pressão utilizada para cada sistema. Observou-se que o sistema em série apresentou uma taxa de permeação superior ao sistema em paralelo, devido o arranjo oferecer condições de trabalhar com pressões superiores a $7,0 \text{ kgf/cm}^2$.
2. No sistema II não foi possível trabalhar com pressões acima de $7,0 \text{ kgf/cm}^2$.
3. Para os dois sistemas o efeito da limpeza química dos elementos de membranas foi satisfatório em termos de qualidade e quantidade de água produzida.
4. As membranas arranjadas em paralelo produzem uma taxa de concentrações de sais, isto é, taxa de incrustação inferior a taxa reproduzida nos elementos de membranas em série.
5. O pH e a condutividade variam em função das pressões e das concentrações das águas salobras de alimentação do sistema. Também podemos concluir que, com a limpeza química dos elementos de membranas o pH do permeado diminui e a condutividade aumenta.
6. O cálculo do ISL nos deu a oportunidade de escolher o tipo de pré-tratamento para ser utilizado de acordo com cada tipo de água.

CAPITULO VI

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Sugerimos que os experimentos fossem realizados in-loco, pois não estaríamos limitados a quantidades de água. Existe um problema que é a evaporação da água com o tempo, mesmo ela ficando em recipientes fechados como no nosso caso, houve evaporação e as concentrações se modificaram, modificando todos os dados da água nova retirada do poço, isto quando passamos intervalos de tempo parados para dá seqüência a uma nova batelada.
2. Monitoramento normalizado dos equipamentos instalados nas diversas comunidades.
3. Introduzir o equipamento do IDS (Índice de Densidade de Sais) no Sistema experimental, que é um teste específico para determinação de índices de incrustações.

CAPÍTULO VII**7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. AMJAD, Z. Reverse Osmose: Membrane Tecnology, water Chemistry & Industrial Applications, Van Nostrand-Reinhold, New York, 1992.
2. BARROS, J.G.C., Ciência e Tecnologia – Radiobras, ano V, 1997.
3. BEARDSLEY, S.S & MINNESOTA, E., Potable water posttreatment In AWWA Seminar on Membrane Processes Principle and Practices, American Water Works Association, 27-29, New York, June. 1998.
4. BRANDT, D.C., LEITNER, G.F & LEITNER,W.E., Reverse osmosis membrane *states of the art*, In Zahid Amjad (ed.), Reverse Osmosis – Membrane Tecnology, Water Chemistry and Industrial Applications, Van Nostrand-Reinhold, New York, 1992.
5. CHEN, S.S., TAYLOR, MORRIS. C.D. & HOFMAN, J.A.M.H., flat sheet testing for pesticide removal by varying RO/NF membrane, Desalination, 843-848, 1997.
6. DIAS, A.B.S., Estudo e desempenho de um protótipo de um reator para dessalinização de soluções salinas via osmose inversa. Campina Grande-PB. Dissertação (Mestrado em engenharia química), UFPB, 1999.
7. DUPONT, Bolletins 507,508, 509,510. Permasep® engineering manual. Wilmington, Del. Polymer Products Department, Permasep Products, 1982.
8. DOW LATIM AMERICAN, A Tecnologia de Membrana de Osmose Inversa, boletim técnico, 1996.

9. FILHO, J. FERREIRA, Cartilha da Água, São Paulo, 1992.
10. HABERT, A.C., BORGES, C.P. & NÓBREGA, R., Processos de separação com membranas, Escola Piloto em Engenharia Química, COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Química, 1997.
11. Hydranautics. RO System Design Software. Version 64©, 1998.
12. IDEA – Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Manuales de Energías Renovables, v.6. Energia solar fotovoltaica. Edição especial Cinco dias. Gráfica Internacional, S. A. Espanha, 1995.
13. LONSDALE, H.K., The growth of membrane technology, Journal of Membrane Science, 81-181, 1982.
14. MALLEVIABLE, J., ODENDAAL, P.E. & WIESNER, M.R., Water Treatment Membrane Processes. American Water Works Association Research Foundation; Lyonnaise des Eaux; Water Research Comission of South Africa. McGraw-Hill. Washington, DC, USA, 1996.
15. MINDLER, A. B. & EPSTEIN, A. C., Measurements and Control in reverse osmosis desalination. Desalination, 59, 343-379, 1986.
16. OLIVEIRA, A.R., Desempenho de um sistema de dessalinização via osmose inversa, em escala piloto, alimentados por painéis fotovoltaicos. Campina Grande-PB. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFCG, 2002.
17. PERRY, R.H. & CHILTON, C. H., Manual do Engenheiro Químico, 5ª ed. , sec. 17; p 36-45, 5ª ed, Ed. Guanabara, Rio de Janeiro-RJ, 1986.

18. PRICE, M., Water from the ground, *New Scientist*, 42, 1-4, Fev.1991.
19. SATTAMINI LUIZ E LUCIO, Sistemas de osmose inversa, AQUANET-Engenharia de aplicações em dessalinização – Manual técnico, 1999.
20. SILVEIRA, M.C., Avaliação de sistema híbrido para dessalinização de águas salinas pelo processo de osmose inversa. Campina Grande-PB. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, 1999.
21. SCHNEIDER, R. P., & TSUTIYA, M. T., Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso, ABES, 1ª ed, São Paulo, 2001.
22. TAYLOR, J.P. & JACOBS, E.P., Reverse osmosis and nanofiltration, In Joel Mallevalle et al (eds), *water Treatment membrane process*, Mc Graw-Hill, New York, 1996.
23. TSIOURTIS, N. X., Desalination and the environment, *Desalination*, 141, 223-236, 2001.
24. VAN GAUWBERGEN, D. & J. BAEYENS, Macroscopic fluid flow conditions in spiral-wound membrane elements, *Desalination*, 110, 287-299, 1997.
25. VOROS, N.G.; MAROULIS, Z.B. & MARINOS-KOURIS, D.; Salt and water permeability in reverse osmosis membranes. *Desalination*, 104, 141-154, 1996.

APÊNDICE I

TABELAS

PARTE I – DADOS EXPERIMENTAIS

Tabelas de dados experimentais do sistema de dessalinização com três elementos de membranas em série (Sistema I), com a água do poço tubular do município de Nova Floresta-PB, antes da limpeza química.

Tabela A1: Dados experimentais do dessalinizador em série; $K_a = 3,92 \text{ mS/cm}$, $\text{pH}_a = 4,60$, $P_s = 8 \text{ kgf/cm}^2$, $P_a = 9 \text{ kgf/cm}^2$, $Q_p = 1,0 \text{ LPM}$, $Q_c = 0,68 \text{ LPM}$.

t (min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
5	5,94	3,89	0,78	4,47	0,81	4,67	0,67	4,59	0,71	3,96
10	6,08	3,88	0,74	4,32	0,83	4,46	0,69	4,57	0,65	3,66
15	6,15	3,88	0,75	4,40	0,81	4,61	0,69	4,37	0,67	3,76
20	6,08	3,88	0,74	4,30	0,79	4,61	0,66	4,53	0,64	3,68
25	6,15	3,87	0,74	4,34	0,82	4,67	0,67	4,60	0,67	3,80
30	6,13	3,86	0,73	4,32	0,81	4,58	0,66	4,20	0,64	3,66

Tabela A2: Dados experimentais do dessalinizador em série; $K_a = 3,87 \text{ mS/cm}$, $\text{pH}_a = 4,60$, $P_s = 10 \text{ kgf/cm}^2$, $P_a = 11 \text{ kgf/cm}^2$, $Q_p = 0,7 \text{ LPM}$, $Q_c = 0,8 \text{ LPM}$.

min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
5	7,53	3,83	0,84	4,48	0,86	4,62	0,81	4,55	0,76	3,66
10	7,66	3,80	0,84	4,63	0,87	4,62	0,80	4,56	0,77	3,67
15	7,69	3,80	0,82	4,28	0,85	4,61	0,80	4,55	0,77	3,60
20	7,75	3,79	0,82	4,37	0,86	4,61	0,79	4,56	0,78	3,73
25	7,75	3,80	0,85	4,60	0,85	4,61	0,80	4,22	0,78	3,57
30	7,80	3,79	0,82	4,30	0,85	4,61	0,81	4,54	0,77	3,57

Tabela A3: Dados experimentais do dessalinizador em série; $K_a = 3,87 \text{ mS/cm}$, $\text{pH}_a = 4,60$, $P_s = 12 \text{ kgf/cm}^2$, $P_a = 13 \text{ kgf/cm}^2$, $Q_p = 0,4 \text{ LPM}$, $Q_c = 1,05 \text{ LPM}$.

min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
5	11,04	3,82	0,99	4,23	0,93	4,80	1,08	4,42	1,07	3,53
10	10,97	3,81	0,91	4,42	0,88	4,70	1,00	4,52	1,02	3,50
15	10,09	3,83	0,91	4,08	0,87	4,24	0,96	4,52	0,95	3,50
20	9,98	3,81	0,91	4,08	0,86	4,67	0,95	4,52	0,95	3,50
25	10,08	3,80	0,88	4,46	0,87	4,68	0,95	4,52	0,95	3,51
30	10,11	3,80	0,92	4,17	0,88	4,58	0,95	4,53	0,95	3,48

Tabela A4: Dados experimentais do dessalinizador em série; $K_a = 3,58$ mS/cm, $pH_a = 4,60$, $P_s = 14$ kgf/cm², $P_a = 16$ kgf/cm², $Q_p = 0,2$ LPM, $Q_c = 1,19$ LPM.

min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
5	12,72	4,07	1,10	4,33	0,90	4,80	1,24	4,52	1,21	3,69
10	12,95	4,00	0,98	4,81	0,97	4,66	1,20	4,51	1,12	3,91
15	12,93	4,69	0,96	3,94	0,96	4,66	1,16	4,52	1,19	3,50
20	13,08	3,90	0,97	4,29	0,95	4,63	1,16	4,47	1,19	3,52
25	13,18	4,32	0,97	3,87	0,95	4,62	1,14	4,45	1,19	3,56
30	13,18	4,32	0,97	3,87	0,95	4,62	1,14	4,45	1,19	3,56

Tabelas de dados experimentais do sistema de dessalinização com três elementos de membranas em série (Sistema I), com a água do poço tubular do município de Nova Floresta-PB, após a limpeza química.

Tabela A5: Dados experimentais do dessalinizador em série; $K_a = 3,74$ mS/cm, $pH_a = 3,96$, $P_s = 8$ kgf/cm², $P_a = 9$ kgf/cm², $Q_p = 0,9$ LPM, $Q_c = 0,55$ LPM.

min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
5	5,67	3,76	0,61	4,22	0,69	4,37	0,61	4,29	0,53	3,42
10	5,67	3,73	0,61	4,27	0,68	4,47	0,60	4,35	0,53	3,35
15	5,69	3,71	0,60	4,03	0,67	4,48	0,59	4,34	0,53	3,35
20	5,71	3,70	0,60	4,03	0,67	4,49	0,59	4,36	0,53	3,35
25	5,75	3,69	0,62	4,30	0,67	4,49	0,59	4,35	0,54	3,37
30	5,76	3,69	0,62	4,42	0,66	4,49	0,59	4,37	0,53	3,39

Tabela A6 : Dados experimentais do dessalinizador em série; $K_a = 3,84$ mS/cm, $pH_a = 3,80$, $P_s = 10$ kgf/cm², $P_a = 11$ kgf/cm², $Q_p = 0,6$ LPM, $Q_c = 0,72$ LPM.

min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
5	7,39	3,69	0,71	4,06	0,73	4,62	0,74	4,41	0,62	3,54
10	7,38	3,70	0,70	4,06	0,72	4,59	0,73	4,41	0,63	3,50
15	7,37	3,70	0,70	4,08	0,72	4,58	0,72	4,42	0,62	3,48
20	7,36	3,70	0,69	4,08	0,71	4,55	0,72	4,42	0,62	3,48
25	7,36	3,70	0,69	4,08	0,71	4,54	0,71	4,42	0,63	3,47
30	7,36	3,70	0,68	4,03	0,70	4,56	0,71	4,42	0,62	3,49

Tabela A7: Dados experimentais do dessalinizador em série; $K_a = 3,78$ mS/cm, $pH_a = 3,88$, $P_s = 12$ kgf/cm², $P_a = 14$ kgf/cm², $Q_p = 0,3$ LPM, $Q_c = 0,82$ LPM.

min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
5	10,67	3,78	0,85	4,37	0,77	4,66	0,98	4,44	0,86	3,58
10	10,69	3,75	0,81	4,09	0,75	4,64	0,93	4,42	0,86	3,54
15	10,69	3,74	0,81	4,29	0,75	4,69	0,82	4,43	0,82	3,52
20	10,64	3,73	0,81	4,61	0,73	4,63	0,91	4,44	0,86	3,53
25	10,64	3,74	0,82	4,26	0,73	4,64	0,90	4,44	0,86	3,51
30	10,69	3,73	0,81	4,13	0,72	4,65	0,89	4,48	0,85	3,51

Tabela A8: Dados experimentais do dessalinizador em série; $K_a = 3,65$ mS/cm, $pH_a = 3,95$, $P_s = 14$ kgf/cm², $P_a = 16$ kgf/cm², $Q_p = 0,1$ LPM, $Q_c = 0,8$ LPM.

min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
5	15,58	3,77	1,12	4,27	0,88	4,54	1,11	4,39	1,35	3,51
10	16,40	3,72	0,99	4,27	0,80	4,63	1,19	4,32	1,38	3,45
15	16,51	3,70	0,96	4,39	0,79	4,63	1,17	4,33	1,38	3,45
20	16,53	3,71	0,93	4,48	0,78	4,62	1,16	4,32	1,38	3,41
25	16,58	3,70	0,86	4,57	0,77	4,62	1,14	4,33	1,37	3,41
30	16,58	3,70	0,86	4,57	0,77	4,62	1,14	4,32	1,37	3,41

Tabelas de dados experimentais do sistema de dessalinização com dois elementos de membranas em paralelo em série com um terceiro (Sistema II), com a água do poço tubular do município de Nova Floresta-PB, antes da limpeza química.

Tabela A9: Dados experimentais do Sistema II; $K_a = 3,36$ mS/cm, $pH_a = 3,92$, $P_s = 3$ kgf/cm², $P_a = 4$ kgf/cm², $Q_p = 1,9$ LPM, $Q_c = 0,2$ LPM.

min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
5	3,61	4,33	0,95	5,55	1,01	5,32	0,75	5,45	0,88	-
10	3,60	4,29	0,95	5,13	1,02	5,09	0,80	5,07	0,82	-
15	3,59	4,27	0,95	4,98	1,16	4,98	0,94	5,00	0,90	4,84
20	3,58	4,23	0,94	4,87	1,01	4,86	0,74	5,04	0,92	4,72
25	3,64	4,22	0,94	4,79	1,04	4,82	0,76	4,82	0,83	4,66
30	3,62	4,21	0,95	4,76	1,03	4,82	0,83	4,80	0,81	4,66

Tabela A10: Dados experimentais do Sistema II; $K_a = 3,26$ mS/cm, $pH_a = 4,61$, $P_s = 5$ kgf/cm², $P_a = 7$ kgf/cm², $Q_p = 1,21$ LPM, $Q_c = 0,39$ LPM.

min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
5	3,98	4,82	0,76	5,73	0,81	5,68	0,52	5,70	0,41	5,75
10	3,98	4,80	0,57	5,66	0,71	5,49	0,44	5,49	0,38	5,68
15	3,99	4,79	0,56	5,58	0,68	5,47	0,44	5,46	0,38	5,62
20	4,00	4,78	0,55	5,48	0,65	5,42	0,44	5,38	0,38	5,59
25	4,00	4,76	0,54	5,47	0,72	5,40	0,44	4,36	0,37	5,54
30	4,02	4,75	0,55	5,61	0,69	5,32	0,44	4,36	0,38	5,53

Tabela A11: Dados experimentais do Sistema II; $K_a = 3,26$ mS/cm, $pH_a = 4,54$, $P_s = 7$ kgf/cm², $P_a = 10$ kgf/cm², $Q_p = 0,5$ LPM, $Q_c = 0,5$ LPM.

min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
5	5,61	4,67	0,71	5,63	0,88	5,49	0,51	5,54	0,50	5,68
10	5,66	4,71	0,73	5,48	0,85	5,39	0,50	5,34	0,50	5,51
15	5,65	4,71	0,69	5,37	0,86	5,37	0,50	5,25	0,48	5,40
20	5,63	4,63	0,71	5,36	0,85	5,34	0,50	5,19	0,48	5,29
25	5,63	4,65	0,75	5,27	0,93	5,33	0,49	5,22	0,48	5,25
30	5,64	4,64	0,64	5,25	0,93	5,33	0,49	5,19	0,47	5,21

Tabelas de dados experimentais do sistema de dessalinização com dois elementos de membranas em paralelo e em série com um terceiro (Sistema II), com a água do poço tubular do município de Nova Floresta-PB, após limpeza química.

Tabela A12: Dados experimentais do Sistema II; $K_a = 3,36$ mS/cm, $pH_a = 4,54$, $P_s = 3$ kgf/cm², $P_a = 4$ kgf/cm², $Q_p = 1,9$ LPM, $Q_c = 0,1$ LPM.

min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
5	3,51	4,70	0,81	5,27	0,80	4,89	0,72	4,99	0,58	4,77
10	3,51	4,71	0,79	5,26	0,79	4,94	0,65	5,23	0,60	5,08
15	3,50	4,72	0,79	5,19	0,79	5,20	0,66	5,26	0,61	5,15
20	3,50	4,71	0,81	5,28	0,83	5,22	0,66	5,22	0,64	5,18
25	3,50	4,70	0,81	5,29	0,81	5,22	0,66	5,21	0,64	5,15
30	3,51	4,75	0,80	5,33	0,84	5,21	0,66	5,24	0,65	5,10

Tabela A13: : Dados experimentais do Sistema II; $K_a = 3,49 \text{ mS/cm}$, $\text{pH}_a = 4,56$,
 $P_s = 5 \text{ kgf/cm}^2$, $P_a = 6 \text{ kgf/cm}^2$, $Q_p = 1,1 \text{ LPM}$, $Q_c = 0,3 \text{ LPM}$.

iin)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
5	4,19	4,75	0,72	5,67	0,78	5,69	0,56	5,75	0,39	5,39
0	4,26	4,77	0,71	5,55	0,75	5,54	0,56	5,60	0,39	5,34
5	4,23	4,77	0,62	5,49	0,73	5,43	0,56	5,45	0,39	5,26
0	4,25	4,77	0,72	5,45	0,74	5,38	0,54	5,38	0,38	5,22
5	4,29	4,76	0,73	5,44	0,74	5,40	0,54	5,31	0,39	5,22
0	4,28	4,76	0,68	5,47	0,73	5,38	0,52	5,33	0,44	5,21

Tabela A14: Dados experimentais do Sistema II; $K_a = 3,49 \text{ mS/cm}$, $\text{pH}_a = 4,56$, P_s
 $= 7 \text{ kgf/cm}^2$, $P_a = 8 \text{ kgf/cm}^2$, $Q_p = 0,5 \text{ LPM}$, $Q_c = 0,45 \text{ LPM}$.

iin)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
5	5,62	4,80	0,74	5,61	0,75	5,30	0,59	5,22	0,44	5,12
0	5,65	4,81	0,67	5,47	0,81	5,31	0,57	5,20	0,43	5,13
5	5,66	4,82	0,72	5,44	0,71	5,30	0,55	5,18	0,42	5,15
0	5,67	4,82	0,69	5,47	0,72	5,28	0,65	5,21	0,42	5,15
5	5,70	4,82	0,66	5,41	0,85	5,31	0,56	5,22	0,42	5,12
0	5,75	4,82	0,66	5,43	0,72	5,28	0,53	5,23	0,42	5,08

Tabelas de dados experimentais do sistema de dessalinização com três elementos de membranas em série (Sistema I), com a água do poço tubular do Convento das Clarissas.

Tabela A15: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,16 \text{ mS/cm}$, $\text{pH}_a = 7,60$, P_s
 $= 8,0 \text{ kgf/cm}^2$, $P_a = 9,0 \text{ kgf/cm}^2$, $Q_p = 0,7 \text{ LPM}$, $Q_c = 2,3 \text{ LPM}$. antes da limpeza.

iin)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
5	4,31	7,77	0,25	6,16	0,30	6,52	0,26	6,34	0,11	5,97
0	4,30	7,83	0,28	6,12	0,29	6,47	0,24	6,32	0,10	5,92
5	4,31	7,83	0,26	6,13	0,29	6,43	0,23	6,31	0,10	5,93
0	4,31	7,83	0,23	6,05	0,29	6,45	0,24	6,31	0,10	5,91
5	4,34	7,85	0,20	5,96	0,29	6,40	0,22	6,31	0,10	5,82
0	4,32	7,85	0,23	6,09	0,29	6,38	0,20	6,22	0,09	5,79

Tabela A16: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,08$ mS/cm, $pH_a = 7,62$, $P_s = 8,0$ kgf/cm², $P_a = 9,0$ kgf/cm², $Q_p = 0,82$ LPM, $Q_c = 1,53$ LPM, após limpeza

min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
5	4,09	8,07	0,22	6,26	0,26	6,46	0,22	6,62	0,10	6,25
10	4,09	8,13	0,22	6,35	0,26	6,52	0,21	6,59	0,09	6,19
15	4,10	8,12	0,23	6,39	0,26	6,52	0,21	6,54	0,10	6,18
20	4,11	8,14	0,22	6,46	0,26	6,64	0,21	6,60	0,10	6,16
25	4,11	8,17	0,22	6,44	0,26	6,60	0,21	6,52	0,09	6,13
30	4,12	8,14	0,21	6,44	0,26	6,62	0,21	6,51	0,09	6,15

Tabela A17: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,16$ mS/cm, $pH_a = 8,12$, $P_s = 10,0$ kgf/cm², $P_a = 11,0$ kgf/cm², $Q_p = 0,9$ LPM, $Q_c = 1,6$ LPM, antes da limpeza química.

min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
2	4,69	8,45	0,21	7,38	0,29	7,45	0,23	7,53	0,11	7,00
4	4,71	8,47	0,21	7,41	0,28	7,46	0,22	7,39	0,10	6,99
6	4,71	8,46	0,20	7,34	0,28	7,50	0,21	7,34	0,09	7,00
10	4,74	8,50	0,20	7,33	0,27	7,51	0,21	7,32	0,09	6,99
15	4,74	8,66	0,20	7,27	0,27	7,44	0,20	7,31	0,09	6,97
20	4,74	8,67	0,20	7,30	0,26	7,50	0,19	7,34	0,08	6,92

Tabela A18: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,11$ mS/cm, $pH_a = 8,10$, $P_s = 10,0$ kgf/cm², $P_a = 11,0$ kgf/cm², $Q_p = 1,045$ LPM, $Q_c = 1,176$ LPM, após a limpeza química.

min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
2	5,42	8,22	0,26	6,95	0,32	7,09	0,26	7,04	0,13	6,68
4	5,41	8,21	0,28	7,05	0,31	7,12	0,25	7,00	0,13	6,64
6	5,41	8,22	0,27	7,04	0,31	7,11	0,25	7,06	0,12	6,64
10	5,43	8,24	0,24	7,03	0,30	7,11	0,25	6,96	0,12	6,57
15	5,43	8,22	0,26	7,00	0,30	7,11	0,23	6,94	0,12	6,57
20	5,43	8,22	0,24	6,98	0,30	7,09	0,23	6,94	0,12	6,56

Tabela A19: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,30$ mS/cm, $pH_a = 8,31$, $P_s = 12,0$ kgf/cm², $P_a = 13,5$ kgf/cm², $Q_p = 1,4$ LPM, $Q_c = 1,3$ LPM, antes da limpeza.

min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
2	5,50	8,44	0,23	7,40	0,30	7,64	0,22	7,30	0,11	7,14
4	5,54	8,46	0,22	7,39	0,29	7,61	0,23	7,29	0,11	7,11
6	5,57	8,45	0,21	7,33	0,28	7,56	0,21	7,27	0,11	7,07
10	5,58	8,47	0,20	7,35	0,27	7,54	0,19	7,19	0,10	7,01
15	5,60	8,49	0,20	7,35	0,26	7,55	0,18	7,16	0,10	6,99
20	5,60	8,49	0,20	7,35	0,25	7,55	0,18	7,16	0,10	6,99

Tabela A20: Dados experimentais do Sistema I; $K_a = 3,24$ mS/cm, $pH_a = 8,34$, $P_s = 12,0$ kgf/cm², $P_a = 14,0$ kgf/cm², $Q_p = 1,25$ LPM, $Q_c = 0,81$ LPM, após limpeza.

min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
2	6,65	8,25	0,29	7,36	0,32	7,50	0,29	7,37	0,17	6,95
4	6,48	8,24	0,28	7,27	0,32	7,57	0,27	7,33	0,16	6,96
6	6,45	8,24	0,27	7,23	0,31	7,53	0,26	7,38	0,16	6,96
10	6,46	8,25	0,26	7,21	0,30	7,54	0,25	7,30	0,16	6,96
15	6,47	8,25	0,25	7,15	0,30	7,50	0,24	7,25	0,15	6,95
20	6,49	8,24	0,25	7,13	0,29	7,50	0,23	7,22	0,15	6,93

Dados referentes às análises físico-químicas para o Sistema I da água de Nova floresta, para diferentes pressões.

Tabela A21: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço de Nova Floresta - PB, antes da limpeza química, sob $P = 8$ kgf/cm².

Íons	Pressão de 8,0 kgf/cm ² antes da limpeza química									
	Alim.	Conc.	Perm.	TRS (%)	M1	TRS ₁	M2	TRS ₂	M3	TRS ₃
Ca ⁺⁺ (mg/L)	70,80	106,50	3,40	95,20	4,40	93,78	3,20	96,36	1,80	98,37
Mg ⁺⁺ (mg/L)	98,04	163,50	6,24	93,63	5,28	94,61	5,64	94,24	3,12	98,86
Na ⁺ (mg/L)	698,25	1093,70	107,61	84,60	132,26	81,06	103,00	85,25	77,50	95,90
K ⁺ (mg/L)	49,00	80,61	10,12	79,35	10,70	78,16	8,64	82,35	12,73	90,31
SO ₄ ⁻ (mg/L)	61,00	450,00	48,00	21,31	46,00	24,59	46,00	29,09	54,00	59,94
Cl ⁻ (mg/L)	1157,3	1874,40	142,00	87,73	163,30	85,89	134,90	88,34	106,50	96,64

Tabela A22: Dados referentes às análises físico-químicas da água de N. floresta-PB após a limpeza química dos elementos de membranas, sob $P = 8 \text{ kgf/cm}^2$.

Íons	Alim.	Pressão de $8,0 \text{ kgf/cm}^2$ após limpeza química								
		Conc.	Perm.	TRS (%)	M1	TRS ₁	M2	TRS ₂	M3	TRS ₃
Ca ⁺⁺ (mg/L)	70,80	111,50	3,60	94,91	3,00	95,76	3,40	95,20	2,20	98,85
Mg ⁺⁺ (mg/L)	98,04	226,44	5,52	94,36	5,52	94,37	7,68	92,17	4,44	98,32
Na ⁺ (mg/L)	698,25	809,74	90,84	86,99	110,55	84,16	94,62	86,45	74,57	95,95
K ⁺ (mg/L)	49,09	65,67	9,07	81,43	9,43	80,79	8,70	82,28	11,97	90,66
SO ₄ ⁻ (mg/L)	61,00	460,00	47,00	22,95	48,00	21,31	49,00	19,67	52,00	60,44
Cl ⁻ (mg/L)	1157,30	1917,00	142,00	87,73	159,75	86,19	149,10	87,11	120,70	96,06

Tabela A23: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço de Nova Floresta-PB antes e após a limpeza, sistema I, sob $P = 10,0 \text{ kgf/cm}^2$.

Íons	Alim.	Pressão de $10,0 \text{ kgf/cm}^2$ antes da limpeza química			Pressão de $10,0 \text{ kgf/cm}^2$ após a limpeza química		
		Concentrado	Permeado	TRS (%)	Concentrado	Permeado	TRS (%)
Ca ⁺⁺ (mg/L)	70,80	145,00	3,80	94,63	148,00	3,40	95,19
Mg ⁺⁺ (mg/L)	98,04	213,00	5,76	94,12	277,68	6,84	93,02
Na ⁺ (mg/L)	698,25	1453,00	120,85	82,70	1140,02	103,56	85,17
K ⁺ (mg/L)	49,09	99,14	11,83	75,92	83,47	10,50	78,59
SO ₄ ⁻ (mg/L)	61,00	470,00	49,00	19,70	510,00	51,00	16,39
Cl ⁻ (mg/L)	1157,30	2449,50	163,30	85,89	2520,50	163,30	85,89

Tabela A24: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço de Nova Floresta-PB, antes e após a limpeza química, sob $P = 12,0 \text{ kgf/cm}^2$.

Íons	Alim.	Pressão de 12 kgf/cm^2 antes da limpeza química			Pressão de 12 kgf/cm^2 após a limpeza química		
		Concentrado	Permeado	TRS (%)	Concentrado	Permeado	TRS (%)
$\text{Ca}^{++}(\text{mg/L})$	70,80	204,00	4,20	94,07	227,00	3,60	94,91
$\text{Mg}^{++}(\text{mg/L})$	98,04	305,40	6,96	92,9	429,12	8,64	91,18
$\text{Na}^+(\text{mg/L})$	698,25	1481,70	165,00	76,37	1639,70	131,40	81,18
$\text{K}^+(\text{mg/L})$	49,09	111,80	12,61	74,28	127,11	11,40	76,85
$\text{SO}_4(\text{mg/L})$	61,00	600,00	46,00	24,59	550,00	51,00	16,39
$\text{Cl}^-(\text{mg/L})$	1157,30	3351,20	177,50	84,66	3834,00	191,70	83,43

Tabela A25: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço de Nova Floresta-PB, antes da limpeza química, sob $P = 14,0 \text{ kgf/cm}^2$.

Íons	Pressão de $14,0 \text{ kgf/cm}^2$ antes da limpeza química									
	Alim.	Conc.	Perm.	TRS (%)	Perm ₁	TRS ₁	Perm ₂	TRS ₂	Perm ₃	TRS ₃
$\text{Ca}^{++}(\text{mg/L})$	70,80	298,80	6,60	90,68	3,00	95,76	9,20	87,00	5,80	97,50
$\text{Mg}^{++}(\text{mg/L})$	98,04	465,12	11,28	88,49	9,72	90,08	16,80	82,86	7,56	97,59
$\text{Na}^+(\text{mg/L})$	698,25	2025,80	246,23	64,73	213,40	69,43	248,90	69,35	248,87	87,87
$\text{K}^+(\text{mg/L})$	49,09	168,20	18,72	61,86	15,01	69,42	19,07	61,15	29,91	79,16
$\text{SO}_4(\text{mg/L})$	61,00	550,00	49,00	19,67	49,00	19,67	49,00	19,67	48,00	65,36
$\text{Cl}^-(\text{mg/L})$	1157,30	4721,50	269,80	76,69	205,90	82,21	291,10	74,84	298,20	91,70

Tabela A26: Dados referentes às análises físico-químicas da uma água salobra após a limpeza química dos elementos de membranas, sob $P = 14,0 \text{ kgf/cm}^2$.

Pressão de 14 kgf/cm^2 após limpeza química				
Íons	Alimentação	Concentrado	Permermeado	TRS (%)
Ca^{++} (mg/L)	70,80	379,00	6,20	91,24
Mg^{++} (mg/L)	98,04	722,64	11,04	88,74
Na^+ (mg/L)	698,25	2529,80	199,18	71,48
K^+ (mg/L)	49,09	211,40	16,70	65,98
SO_4^- (mg/L)	61,00	620,00	53,00	13,11
Cl^- (mg/L)	1157,30	6177,00	255,60	77,91

Dados referentes às análises físico-químicas para o sistema de dessalinização com dois elementos de membranas em paralelo e em série com um terceiro (Sistema II), com a água do poço tubular do município de Nova Floresta-PB, antes e após a limpeza química.

Tabela A27: Dados referentes as análises físico-químicas da água do poço de Nova Floresta, antes da limpeza química, sob $P = 3 \text{ kgf/cm}^2$.

Pressão de 3 kgf/cm^2 antes da limpeza química										
Íons	Alim.	Conc.	Perm.	TRS(%)	M1	TRS ₁	M2	TRS ₂	M3	TRS ₃
Ca^{++} (mg/L)	59,40	63,00	5,40	90,91	2,80	95,28	3,20	94,61	1,20	99,03
Mg^{++} (mg/L)	89,04	101,88	2,76	96,90	6,72	92,45	8,28	90,70	3,60	98,12
Na^+ (mg/L)	442,19	458,92	149,00	66,30	165,30	62,62	117,16	73,50	115,33	87,67
K^+ (mg/L)	41,50	44,37	17,81	57,08	19,31	53,47	12,17	70,67	16,70	80,87
SO_4^- (mg/L)	128,00	120,00	56,00	56,25	59,00	53,91	58,00	54,68	58,00	78,35
Cl^- (mg/L)	1022,40	1104,05	234,30	77,08	269,80	73,61	170,40	83,33	163,30	92,52

Tabela A28: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço tubular de Nova Floresta, após a limpeza química, sob $P = 3 \text{ kgf/cm}^2$.

Ions	Pressão de 3 kgf/cm^2 após limpeza química									
	Alim.	Conc.	Perm.	TRS(%)	M1	TRS	M2	TRS ₂	M3	TRS ₃
Ca ⁺⁺ (mg/L)	59,40	68,40	4,00	93,27	3,60	93,94	2,20	96,27	1,20	99,05
Mg ⁺⁺ (mg/L)	89,04	179,40	4,20	95,28	6,24	92,99	4,92	94,47	3,72	98,04
Na ⁺ (mg/L)	442,19	446,94	118,38	73,23	129,04	70,82	107,03	75,79	134,87	85,48
K ⁺ (mg/L)	41,50	43,84	11,97	71,16	13,87	66,58	10,50	74,70	13,22	84,80
SO ₄ ⁻ (mg/L)	128,00	142,00	57,00	55,47	66,00	48,44	58,00	54,69	57,00	78,49
Cl ⁻ (mg/L)	1022,40	1089,85	177,50	82,64	198,80	80,55	163,30	84,03	156,20	92,77

Tabela A29: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço tubular de Nova Floresta, antes da limpeza química, sob $P = 5 \text{ kgf/cm}^2$.

Ions	Pressão de 5 kgf/cm^2 antes da limpeza química									
	Alim.	Conc.	Perm.	TRS(%)	M1	TRS ₁	M2	TRS ₂	M3	TRS ₃
Ca ⁺⁺ (mg/L)	59,40	76,00	2,20	96,30	3,60	93,94	0,80	98,65	0,80	99,40
Mg ⁺⁺ (mg/L)	89,04	116,04	2,76	96,90	2,04	97,71	2,52	97,17	3,00	98,50
Na ⁺ (mg/L)	442,19	508,49	98,48	77,73	113,53	74,32	74,57	83,13	67,97	93,01
K ⁺ (mg/L)	41,50	52,61	8,88	78,60	10,50	74,70	6,10	85,30	7,38	91,93
SO ₄ ⁻ (mg/L)	128,00	132,00	57,00	55,47	58,00	54,69	56,00	56,25	58,00	78,82
Cl ⁻ (mg/L)	1022,40	1214,1	142,00	86,11	156,20	84,72	106,50	89,58	85,20	96,25

Tabela A30: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço tubular de Nova Floresta, após a limpeza química, sob $P = 5 \text{ kgf/cm}^2$.

Ions	Pressão de 5 kgf/cm^2 após limpeza química									
	Alim.	Conc.	Perm.	TRS(%)	M1	TRS ₁	M2	TRS ₂	M3	TRS ₃
Ca ⁺⁺ (mg/L)	59,40	84,00	5,20	91,25	3,60	93,94	2,60	95,62	3,20	97,67
Mg ⁺⁺ (mg/L)	89,04	207,48	4,44	95,01	5,04	94,34	6,72	92,45	3,48	98,30
Na ⁺ (mg/L)	442,19	536,87	114,13	74,19	96,81	78,10	97,37	77,98	97,37	90,24
K ⁺ (mg/L)	41,50	51,19	10,70	74,22	8,64	79,18	9,56	76,96	9,68	88,67
SO ₄ ⁻ (mg/L)	128,00	132,00	60,00	53,13	59,00	53,91	46,00	64,06	31,00	88,95
Cl ⁻ (mg/L)	1022,40	1292,20	156,20	84,72	163,30	84,03	142,00	86,11	142,00	93,90

Tabela A31: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço tubular de Nova Floresta, antes da limpeza química, sob $P = 7 \text{ kgf/cm}^2$.

Ions	Pressão de 7 kgf/cm ² antes da limpeza química									
	Alim.	Conc.	Perm.	TRS(%)	M1	TRS ₁	M2	TRS ₂	M3	TRS ₃
Ca ⁺⁺ (mg/L)	59,40	128,20	3,20	94,61	3,80	93,60	2,00	96,63	0,60	99,60
Mg ⁺⁺ (mg/L)	89,04	174,00	3,36	96,23	3,12	96,49	3,24	96,36	2,04	99,73
Na ⁺ (mg/L)	442,19	702,59	109,96	75,13	135,53	69,35	75,53	82,92	78,97	92,67
K ⁺ (mg/L)	41,50	78,27	10,31	75,16	12,80	69,16	6,41	84,55	9,74	90,38
SO ₄ ⁻ (mg/L)	128,00	144,00	57,00	55,47	59,00	53,91	58,00	54,69	59,00	80,07
Cl ⁻ (mg/L)	1022,40	1824,70	156,20	84,72	198,80	80,55	113,60	88,89	99,40	96,09

Tabela A32: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço tubular de Nova Floresta, após a limpeza química dos elementos de membranas, sob $P = 7 \text{ kgf/cm}^2$.

Ions	Pressão de 7 kgf/cm ² após limpeza química									
	Alim.	Conc.	Perm.	TRS(%)	M1	TRS ₁	M2	TRS ₂	M3	TRS ₃
Ca ⁺⁺ (mg/L)	59,40	125,40	6,00	89,90	4,00	93,26	3,40	94,27	2,00	98,63
Mg ⁺⁺ (mg/L)	89,04	192,84	6,36	92,86	5,76	93,53	10,08	88,68	4,44	97,97
Na ⁺ (mg/L)	442,19	784,76	111,14	74,87	112,33	74,60	90,30	79,58	69,36	93,42
K ⁺ (mg/L)	41,50	68,88	10,18	75,47	10,50	75,78	7,89	80,99	8,77	91,16
SO ₄ ⁻ (mg/L)	128,00	640,00	54,00	57,81	54,00	57,81	56,00	56,25	56,00	80,85
Cl ⁻ (mg/L)	1022,40	1810,50	163,30	84,03	163,30	84,03	134,90	86,80	92,30	96,28

Tabela A33: Tabela de dados referentes ao sistema I, fluxos; coeficientes de transferência de massa, pressão osmótica e STD.

Pressão	8 kgf/cm ²	10kgf/cm ²	12kgf/cm ²	14kgf/cm ²	Após limpeza	8kgf/cm ²	10kgf/cm ²	12kgf/cm ²	14kgf/cm ²
Jp(cm ³ /cm ² .min)	0,3195	0,3759	0,4934	0,5258	*	0,2585	0,3383	0,3853	0,3759
Ksolv(cm ³ /kgf.min)	0,0569	0,0517	0,0555	0,0488	*	0,0456	0,0464	0,0424	0,0383
Ksoluto (cm/min)	0,0403	0,0441	0,0577	0,0765	*	0,0319	0,0386	0,0387	0,0352
Qp(cm ³ /min)	680	800	1050	1119	*	550	720	820	800
A(cm ²)	2128	2128	2128	2128	*	2128	2128	2128	2128
ΔP(kgf/cm ²)	7,47	9,47	11,47	13,97	*	7,47	9,47	11,97	13,97
Δπ(kgf/cm ²)	1,8511	2,1979	2,5822	3,1848	*	1,7998	2,1737	2,8876	4,1546
STDa(mg/l)	2163,00	2163,00	2163,00	2163,00	*	2163,00	2163,00	2163,00	2163,00
STDp(mg/l)	333,26	368,55	431,09	661,64	*	317,06	354,17	414,03	556,29
STDc(mg/l)	3792,26	4853,76	6076,90	8259,80	*	3613,28	4755,83	6915,21	10819,96
ΔC(mg/l)	2644,37	3139,83	3688,86	4549,76	*	2571,08	3105,25	4125,08	5935,19
ΔP - Δπ(kgf/cm ²)	5,62	7,27	8,89	10,79	*	5,67	7,30	9,08	9,82
Js (g/cm ² .min)	106,49	138,55	212,71	347,92	*	81,95	119,83	159,54	209,13

Tabela A34: Tabela de dados referentes ao sistema II, fluxos, coeficientes de transferência de massa, pressão osmótica e STD.

Pressão	3 kgf/cm ²	5 kgf/cm ²	7 kgf/cm ²	Após limpeza	3kgf/cm ²	5kgf/cm ²	7 kgf/cm ²
Jp(cm ³ /cm ² .min)	0,0940	0,1833	0,2350	*	0,0470	0,1410	0,2115
Ksolv(cm ³ /kgf.min)	0,0631	0,0480	0,0391	*	0,0336	0,0431	0,0440
Ksoluto(cm/min)	0,0321	0,0361	0,0412	*	0,0120	0,0305	0,0325
Qp(cm ³ /min)	200	390	500	*	100	300	450
A(cm ²)	2128	2128	2128	*	2128	2128	2128
ΔP (kgf/cm ²)	2,47	4,97	7,47	*	2,47	4,47	6,47
$\Delta \pi$ (kgf/cm ²)	0,9794	1,1540	1,4683	*	1,0713	1,1974	1,6645
STDa(mg/l)	1820,12	1820,12	1820,12	*	1820,12	1820,12	1820,12
STDp(mg/l)	478,14	324,90	367,65	*	389,88	369,63	364,96
STDc(mg/l)	1934,38	2126,74	3110,38	*	2020,43	2340,20	3665,64
ΔC (mg/l)	1399,11	1648,53	2097,60	*	1530,40	1710,53	2377,92
$\Delta P - \Delta \pi$ (kgf/cm ²)	1,49	3,82	6,00	*	1,40	3,27	4,81
Js (g/cm ² .min)	44,94	59,54	86,38	*	18,32	52,11	77,18

APÊNDICE II

TABELAS

PARTE II – DADOS EXPERIMENTAIS

Tabelas de dados experimentais do sistema de dessalinização com três elementos de membranas em série (Sistema I), com a água do poço do Shopping Luiza Motta, Campina Grande-PB, antes da limpeza química.

Tabela B1: Dados experimentais do dessalinizador em série; $K_a = 3,62$ mS/cm, $pH_a = 7,75$, $P_s = 6$ kgf/cm², $P_a = 6$ kgf/cm², $Q_p = 0,35$ L/min, $Q_c = 5,45$ L/min.

t(min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
5	3,81	7,92	0,24	6,52	0,34	6,51	0,20	6,43	0,16	6,52
10	3,80	7,94	0,24	6,58	0,32	6,50	0,19	6,36	0,15	6,28
15	3,76	7,94	0,24	6,52	0,33	6,50	0,19	6,35	0,13	6,28
20	3,64	7,92	0,23	6,49	0,25	6,43	0,18	6,31	0,17	6,32
25	3,65	7,97	0,23	6,51	0,31	6,50	0,19	6,32	0,11	6,25
30	3,64	7,96	0,22	6,49	0,25	6,44	0,18	6,34	0,11	6,49

Tabela B2: Dados experimentais do dessalinizador em série; $K_a = 3,57$ mS/cm, $pH_a = 8,08$, $P_s = 8$ kgf/cm², $P_a = 8$ kgf/cm², $Q_p = 0,64$ L/min, $Q_c = 5,45$ L/min.

t(min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
5	4,00	8,12	0,19	6,70	0,27	6,78	0,17	6,55	0,11	6,40
10	4,00	8,20	0,19	6,65	0,27	6,76	0,15	6,50	0,11	6,36
15	3,97	8,19	0,18	6,69	0,24	6,73	0,15	6,47	0,08	6,28
20	3,92	8,19	0,19	6,70	0,26	6,76	0,15	6,49	0,11	6,38
25	4,05	8,27	0,19	6,70	0,27	6,84	0,15	6,58	0,13	6,41
30	4,05	8,25	0,19	6,70	0,29	6,84	0,17	6,58	0,13	6,41

Tabelas de dados experimentais do sistema de dessalinização com três elementos de membranas em série (Sistema I), com a água do poço do Shopping Luiza Motta, Campina Grande-PB, após a limpeza química.

Tabela B3: Dados experimentais do dessalinizador em série; $K_a = 3,54$ mS/cm, $pH_a = 8,49$ $P_s = 6$ kgf/cm², $P_a = 6$ kgf/cm², $Q_p = 0,38$ L/min, $Q_c = 5,45$ L/min.

t(min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
5	3,81	8,72	0,22	7,89	0,25	8,00	0,20	7,73	0,12	7,44
10	3,79	8,73	0,23	7,87	0,27	8,22	0,22	7,72	0,14	7,44
15	3,81	8,73	0,23	7,87	0,27	8,20	0,23	7,75	0,13	7,37
20	3,82	8,73	0,23	7,85	0,24	8,11	0,22	7,75	0,19	7,50
25	3,82	8,74	0,23	7,85	0,30	8,19	0,23	7,73	0,18	7,50
30	3,82	8,74	0,23	7,85	0,30	8,19	0,23	7,73	0,18	7,50

Tabela B4: Dados experimentais do dessalinizador em série; $K_a = 3,56$ mS/cm, $pH_a = 8,73$ $P_s = 8$ kgf/cm², $P_a = 8$ kgf/cm², $Q_p = 0,69$ L/min, $Q_c = 5,45$ L/min.

t(min)	Concentrado		Permeado		Membrana ₁		Membrana ₂		Membrana ₃	
	K_c (mS/cm)	pH_c	K_p (mS/cm)	pH_p	K_p (mS/cm)	pH_{p1}	K_p (mS/cm)	pH_{p2}	K_p (mS/cm)	pH_{p3}
5	4,03	8,76	0,21	8,01	0,25	8,10	0,19	7,68	0,09	7,31
10	3,99	8,76	0,20	7,82	0,22	8,04	0,19	7,76	0,15	7,61
15	4,03	8,77	0,20	7,93	0,25	8,11	0,19	7,68	0,08	7,20
20	3,96	8,75	0,20	8,05	0,25	8,11	0,19	7,68	0,08	7,20
25	3,96	8,75	0,20	8,05	0,25	8,11	0,19	7,68	0,08	7,20
30	3,96	8,75	0,20	8,05	0,25	8,11	0,19	7,68	0,08	7,20

Tabela B5: Monitoramento do desempenho do sistema de dessalinização Catingueira-PB, fase de implantação do sistema.

Data	P (kgf/cm ²)	Q _C (L/min)	Q _P (L/min)
15/11/2001	7,0	15	10
17/11/01	7,0	15	10
19/11/01	7,0	15	10
21/11/01	7,0	15	10
23/11/01	7,0	15	10
26/11/01	7,0	15	10
28/11/01	7,0	15	10
30/11/01	7,0	15	10
03/12/01	7,0	15	10
05/12/01	7,0	15	10
06/12/01	7,0	15	10
07/12/01	7,0	15	10
08/12/01	7,0	15	10
09/12/01	7,0	15	10
10/12/01	7,0	15	10
11/12/01	7,0	15	10
12/12/01	7,0	15	10
13/12/01	7,0	15	10
14/12/01	7,0	15	10
15/12/01	7,0	15	10
17/12/01	7,0	15	10
18/12/01	7,0	15	10
19/12/01	7,0	15	10
20/12/01	7,0	15	10

Tabela B6: Monitoramento do desempenho do sistema de dessalinização Catingueira-PB, fase em operação.

Data	P (kgf/cm ²)	Q _C (L/min)	Q _P (L/min)
31/10/2001	6,5	14	10
24/11/01	6,5	14	10
10/01/2002	6,5	15	10
18/02/02	7,0	15	10
16/04/02	6,0	15	10
14/05/02	7,0	15	10
13/06/02	7,0	15	10
11/07/02	7,0	15	10
12/08/02	7,0	15	10
11/11/02	7,0	14	10
11/12/02	7,0	15	10
13/01/03	7,0	15	10
17/01/03	7,0	15	9
Limpeza química			
17/01/03	7,0	15	10

Tabela B7: Monitoramento do sistema experimental de dessalinização via osmose inversa, Sistema I, com a água do poço do Shopping Luiza Motta.

Tempo (min)	P (kgf/cm ²)	Q _C (L/min)	Q _P (L/min)
10	8,0	0,804	5,172
20	8,0	0,796	5,357
30	8,0	0,791	5,263
40	8,0	0,800	5,357
50	8,0	0,802	5,263
60	8,0	0,793	5,357
70	8,0	0,793	5,263

Apêndice II

80	8,0	0,798	5,263
90	8,0	0,793	5,357
100	8,0	0,793	5,357
110	8,0	0,793	5,357
120	8,0	0,791	5,357
130	8,0	0,798	5,454
140	8,0	0,793	5,263
150	8,0	0,798	5,357
160	8,0	0,789	5,263
-	-	-	-
10	8,0	0,789	5,357
20	8,0	0,789	5,263
30	8,0	0,793	5,263
40	8,0	0,793	5,263
50	8,0	0,791	5,357
60	8,0	0,791	5,217
70	8,0	0,796	5,263
80	8,0	0,787	5,128
90	8,0	0,789	5,172
100	8,0	0,789	5,172
110	8,0	0,784	5,357
120	8,0	0,793	5,263
130	8,0	0,789	5,172
140	8,0	0,783	5,263
150	8,0	0,783	5,263
160	8,0	0,785	5,263
170	8,0	0,785	5,172
-	-	-	-
10	8,0	0,761	5,357
20	8,0	0,765	5,357

30	8,0	0,761	5,357
40	8,0	0,763	5,263
50	8,0	0,760	5,360
60	8,0	0,763	5,310
70	8,0	0,761	5,310
80	8,0	0,763	5,263
90	8,0	0,765	5,310
100	8,0	0,763	5,357
110	8,0	0,763	5,310
120	8,0	0,770	5,263

Dados referentes às análises físico-químicas para o Sistema I da água do poço do Shopping Luiza Motta.

Tabela B8: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço do Shopping Luiza Motta, antes e após limpeza química, sob $P = 6,0 \text{ kgf/cm}^2$.

Íons	Alim.	Pressão de $6,0 \text{ kgf/cm}^2$ antes da limpeza química			Alim.	Pressão de $6,0 \text{ kgf/cm}^2$ após a limpeza química		
		Concentrado	Permeado	TRS (%)		Concentrado	Permeado	TRS (%)
pH	7,57	7,71	6,53		8,72	8,81	781	
Ca ⁺⁺ (mg/L)	30,20	42,20	2,80	90,73	35,00	34,60	1,20	96,57
Mg ⁺⁺ (mg/L)	84,84	84,96	1,20	98,59	78,84	86,52	2,04	97,41
Na ⁺ (mg/L)	769,98	804,71	81,98	89,35	940,73	1041,37	66,60	92,92
K ⁺ (mg/L)	45,82	46,28	4,40	90,40	47,21	54,90	3,11	93,41
CO ₃ ⁻ (mg/L)	88,00	96,00	0,00	100,00	224,00	192,00	4,00	98,21
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	596,00	692,00	28,00	95,30	376,00	488,00	36,00	90,43
Cl ⁻ (mg/L)	1015,30	1065,00	78,10	92,31	1022,40	1107,60	71,00	93,06

Tabela B9: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço do Shopping Luiza Motta, antes e após limpeza química, sob $P = 8,0 \text{ kgf/cm}^2$.

Íons	Alim.	Pressão de $8,0 \text{ kgf/cm}^2$ antes da limpeza química			Alim.	Pressão de $8,0 \text{ kgf/cm}^2$ após a limpeza química		
		Concentrado	Permeado	TRS (%)		Concentrado	Permeado	TRS (%)
pH	7,57	8,07	6,63		8,72	8,79	8,06	
$\text{Ca}^{++}(\text{mg/L})$	30,20	42,80	5,40	82,12	35,00	30,80	1,60	95,43
$\text{Mg}^{++}(\text{mg/L})$	84,84	93,72	1,32	98,44	78,84	95,52	2,04	97,41
$\text{Na}^+(\text{mg/L})$	769,98	824,92	72,18	90,63	940,73	1111,41	57,84	93,85
$\text{K}^+(\text{mg/L})$	45,82	51,00	3,78	91,75	47,21	58,41	2,56	94,58
$\text{CO}_3^-(\text{mg/L})$	88,00	136,00	0,00	100,00	224,00	208,00	0,00	100,00
$\text{HCO}_3^-(\text{mg/L})$	596,00	614,00	32,00	94,63	376,00	532,00	28,00	92,55
$\text{Cl}^-(\text{mg/L})$	1015,30	1221,20	56,80	94,41	1022,40	1157,30	56,80	94,44

Tabela B10: Dados referentes às análises físico-químicas da água do poço do município de Catingueira-PB, antes e após limpeza química, sob $P = 7,0 \text{ kgf/cm}^2$.

Íons	Pressão de $7,0 \text{ kgf/cm}^2$ antes da limpeza química				Pressão de $7,0 \text{ kgf/cm}^2$ após a limpeza química		
	Alimentação	Concentrado	Permeado	TRS (%)	Concentrado	Permeado	TRS (%)
pH	7,68	7,85	6,14		7,78	6,00	
$\text{Ca}^{++}(\text{mg/L})$	70,20	108,20	0,60	99,15	74	0,60	99,39
$\text{Mg}^{++}(\text{mg/L})$	21,24	69,72	4,08	80,79	96,96	1,50	98,14
$\text{Na}^+(\text{mg/L})$	85,05	157,92	9,35	89,01	177,78	9,21	89,65
$\text{K}^+(\text{mg/L})$	6,25	10,56	0,79	87,36	11,01	0,79	99,10
$\text{HCO}_3^-(\text{mg/L})$	352,00	536,00	12,00	96,59	588	16,00	83,44
$\text{Cl}^-(\text{mg/L})$	99,4	142,00	3,55	96,43	156,2	7,10	92,64

Tabela B11: Laudo de análises do poço do município de Catingueira-PB.

Laudo N ^o : 02/2003	Data da Coleta: 12/08/2001	
Interessado: Edivan Leite	Resp. pela Coleta: Edivan Leite	
Município: Catingueira	Data da Entrega da Amostra: 12082001	
Localidade: Itajubatiba – Mina do Ouro	Tipo de Recipiente: Gafarra plástica	
Procedência: Poço	Data da Análise: 17/08/2001	
PARÂMETROS	RESULTADOS	VMP (*)
Condutividade Elétrica, µmho/cm a 25 °C	1188	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7.21	6,5 a 8,5
Turbidez, (uT)	0.5	1,0 a 5,0
Cor	Não objetável	Não objetável
Odor	Não objetável	Não objetável
Sabor	objetável	Não objetável
Dureza em Cálcio, mg/L Ca ⁺⁺	96.00	---
Dureza em Magnésio, mg/L Mg ⁺⁺	32.40	---
Dureza Total, mg/L CaCO ₃	375.00	500,0
Sódio, mg/L Na ⁺	109.30	---
Potássio, mg/L K ⁺	6.45	---
Estrôncio, mg/L Sr ⁺⁺	-----	---
Bário, mg/L Ba ⁺⁺	-----	1,0
Ferro Total, mg/L	0.01	0,3
Manganês, mg/L Mn ⁺⁺	0.014	0,05
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L CaCO ₃	0.00	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L CaCO ₃	0.00	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L CaCO ₃	368.00	---
Alcalinidade Total, mg/L CaCO ₃	368.00	---
Sulfato, mg/L SO ₄ ⁻	66.00	400,0
Cloreto, mg/L Cl ⁻	127.80	250,0
Nitrato, mg/L NO ₃ ⁻	0.044	10,0
Nitrito, mg/L NO ₂ ⁻	0.007	1,0
Silica, mg/L SiO ₂	59.50	---
Total de Sólidos Dissolvidos, mg/L	946.50	1.000,0

(*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 36/90 MS)