



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA HÍBRIDO PARA DESSALINIZAÇÃO
DE ÁGUAS SALINAS PELO PROCESSO DE OSMOSE INVERSA**

MICHELINE CRISPIM DA SILVEIRA

Campina Grande - Paraíba
Agosto de 1999

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA HÍBRIDO PARA DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUAS SALINAS PELO PROCESSO DE OSMOSE INVERSA

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Engenharia Química da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: **Operações e Processos**

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

Campina Grande - Paraíba

Agosto de 1999



S587a Silveira, Micheline Crispim da.
Avaliação de um sistema híbrido para dessalinização de águas salinas pelo processo de osmose inversa / Micheline Crispim da Silveira. - Campina Grande, 1999.
113 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1999.
"Orientação : Prof. Dr. Kepler Borges França".
Referências.

1. Dessalinização - Osmose Inversa. 2. Dessalinização de Águas Salinas. 3. Osmose Inversa - Processo. 4. Dissertação - Engenharia Química. I. França, Kepler Borges. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

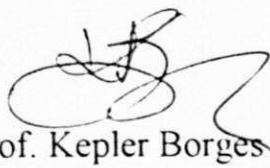
CDU 544.725.7:628.165(043)

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA HÍBRIDO PARA DESSALINIZAÇÃO
DE ÁGUAS SALINAS PELO PROCESSO DE OSMOSE INVERSA**

MICHELINE CRISPIM DA SILVEIRA

Dissertação aprovada em: 11 / 08 / 1999

Banca examinadora:



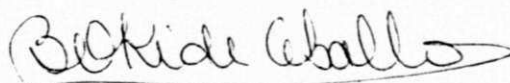
Prof. Kepler Borges França (Ph.D)

ORIENTADOR



Prof. Dr. Hervé Michel Laborde

COMPONENTE DA BANCA



Prof.ª Dr.ª Beatriz S.O. Ceballos

COMPONENTE DA BANCA

DEDICATÓRIA

*Aos meus queridos pais,
irmãos e familiares*

AGRADECIMENTOS

Em especial a Deus por ter me dado força, coragem e o dom do saber para chegar ao fim desta longa caminhada.

Aos meus pais cuja dedicação e incentivo foram o maior sustentáculo do meu êxito.

Aos meus irmão pelo apoio e amizade.

A Emersom por sua atenção, companheirismo e apoio nos momentos oportunos.

Ao amigo e orientador Kepler Borges França pelo constante incentivo e empenho ao desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os amigos pós – graduandos pelo companheirismo, apoio e amizade. Em especial a Gianna, Normanda, Veruska, Josy e Tania.

Ao amigo Raniere pela colaboração durante o levantamento dos dados experimentais.

Ao professor José Raimundo e a professora Beatriz Ceballos pela colaboração nas análises laboratoriais.

A todos os professores do mestrado em Engenharia Química.

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

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

Ao apoio da Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio ambiente, em nome do Coordenador Geral de Articulação e Implementação de Planos e Programas e Coordenador do programa Água Boa, Dr. Herbert Êugenio de Araújo Cardoso.

RESUMO

O presente trabalho visa estudar o desempenho de um sistema de dessalinização pelo processo de osmose inversa, composto de membranas semipermeáveis do tipo alta filtração (HF), ultra baixa pressão (ULP) e alta rejeição (HR). O sistema foi testado com soluções de cloreto de sódio para uma faixa de concentração de 1022 a 3940 mg/L, e águas salobras de dois poços tubulares de concentrações de 1075 e 2240 mg/L, localizados no semi-árido do Estado da Paraíba. A partir da variação da condutividade elétrica do permeado sob o efeito de vários gradientes de pressão foram determinados os seguintes parâmetros: fluxo de água que atravessa a membrana, coeficiente de transferência de massa para água, consumo energético e o custo. Observou-se que o consumo de energia e o custo diminuíram em função da produção do permeado e que os resultados encontrados R\$ (0,14 - 0,68)/m³ foram satisfatórios de acordo com a literatura.

ABSTRACT

The objective of the present work is to outline the performance of a small desalination system, made from the following semipemeable reverse osmosis (RO) membranes: high filtration (HF), ultra low pressure (ULP) and high rejection (HR). The system has been tested for solutions of sodium chloride, with concentrations ranging from 1020 to 3938 mg/L. It also includes the use of brackish water from two wells of the arid region of Paraíba state, with concentrations ranging from 1075 to 2240 mg/L. It has been found that the electric conductivity of the permeate solutions during the RO process changed, as a function of applied pressure. From this finding the following critical process parameters have been identified: water flux crossing the RO-membrane, water mass transfer coefficient, energy consumption and water cost. It was found that the energy consumption and the cost ranging from R\$ (0,14 – 0,68)/m³, decreased as a function of the permeate production. The experimental results are in agreement with data provided in literature.

ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
2.1 - OSMOSE INVERSA	6
2.2.1 - <i>Princípio Operacional do Processo de Osmose Inversa</i>	7
2.2 - FLUXO DO PERMEADO	10
2.3 - FLUXO DE PASSAGEM DE SAIS	10
2.4 - PRESSÃO OSMÓTICA	11
2.5 - TAXA DE REJEIÇÃO DE SAIS	12
2.6 - RECUPERAÇÃO	12
2.7 - CONSUMO DE ENERGIA	13
2.8 - BALANÇO DE MASSA PARA O SISTEMA DE OSMOSE INVERSA	13
2.9 - MEMBRANAS POLIMÉRICAS	15
2.10 - MÓDULOS COMERCIAIS	17
2.11 - CONCENTRAÇÃO DE POLARIZAÇÃO	19
2.12 - INCRUSTAÇÕES (FOULING E SCALING)	21
2.13 - PRÉ-TRATAMENTO	22
2.13.1 - <i>Sistema de Pré-Tratamento Para Água de Poço Tubular</i>	24
2.13.2 - <i>Sistema de Pré-Tratamento Para Água Superficial</i>	25
2.14 - PÓS-TRATAMENTO	26
2.14.1 - <i>Estabilização</i>	26
2.14.1 - <i>Desinfecção</i>	27
2.14.1.1 - <i>Radiação Ultra Violeta</i>	27
2.14.1.2 - <i>Cloração</i>	28
2.15 - LIMPEZA DAS MEMBRANAS	29
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 - INTRODUÇÃO	31
3.2 - MATERIAL UTILIZADO	31

3.2.1 - <i>Produtos Químicos e Indicadores</i>	31
3.2.2 - <i>Água para Estudo</i>	31
3.3 - SISTEMA DE OSMOSE INVERSA.....	32
3.3.1 - <i>Unidade de Osmose Inversa</i>	32
3.3.2 - <i>Sistema Hidráulico</i>	33
3.3.3 - <i>Unidade de Registro</i>	34
3.4 - CARACTERÍSTICAS E COMPOSIÇÃO DAS MEMBRANAS UTILIZADAS.....	35
3.5 - CALIBRAÇÃO DAS UNIDADES DE MEDIDAS.....	36
3.5.1 - <i>pHmetro e Condutivímetro</i>	36
3.5.2 - <i>Conversão da Condutividade Elétrica para Concentração</i>	37
3.6 - <i>Metodologia</i>	38
3.6.1 - <i>Processo de Dessalinização</i>	38
3.7 - <i>Limpeza Das Membranas</i>	40
3.8 - <i>Fluxo do Permeado</i>	40
3.9 - <i>Taxa de Rejeição de Sais</i>	40
3.10 - <i>Recuperação</i>	40
3.11 - <i>Consumo de Energia</i>	40
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1 - VARIACÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.....	41
4.2 - ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DO SISTEMA COM ÁGUA SALOBRA VERSUS SOLUÇÃO DE CLORETO DE SÓDIO	45
4.3 - DESEMPENHO DE CADA MEMBRANA DURANTE O PROCESSO.....	48
4.4 - RECUPERAÇÃO DE CADA ELEMENTO DE MEMBRANA.....	53
4.5 - DESEMPENHO DO SISTEMA COM E SEM RECICLO DO CONCENTRADO E PERMEADO.....	54
4.6 - EFEITO DA RECUPERAÇÃO DO SISTEMA	56
4.7 - PARAMÊTROS TECNICOS	57
4.7.1 - <i>Fluxo de água, Pressão e Taxa de Rejeição de Sais</i>	57
4.7.2 - <i>Variacão do Potencial Hidrôgenionico dos Efluentes</i>	61
4.8 - CONSUMO DE ENERGIA E CUSTO	65
4.9 - ANÁLISE FÍSICO- QUÍMICA.....	69

4.10 - ANÁLISE BACTERIÓLOGICA	71
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES	74
CAPÍTULO VI - PERSPECTIVAS	75
CAPÍTULO VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
APÊNDICE I.....	79
APÊNDICE II.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Principais características dos processos com membranas que utilizam a diferença de pressão como força motriz.....	5
Figura 2.2: Representação esquemática do processo de osmose e osmose inversa.....	9
Figura 2.3: Sistema de osmose inversa constituído de três permeadores em série.....	14
Figura 2.4: Elemento de membrana em espiral para o processo de osmose inversa.....	18
Figura 2.5: Condições da camada limite na membrana/ interface.....	20
Figura 3.1: Sistema de osmose inversa.....	33
Figura 4.1: Variação da condutividade elétrica de uma solução de NaCl ($K_i = 2,10 \text{ mS/cm}$) em função do tempo para diferentes pressões de alimentação.....	43
Figura 4.2: Variação da condutividade elétrica de uma solução de NaCl ($K_i = 3,0 \text{ mS/cm}$) em função do tempo para diferentes pressões de alimentação.....	43
Figura 4.3: Variação da condutividade elétrica de uma solução de NaCl ($K_i = 4,0 \text{ mS/cm}$) em função do tempo para diferentes pressões de alimentação.....	44
Figura 4.4: Variação da condutividade elétrica de uma solução de NaCl ($K_i = 5,5 \text{ mS/cm}$) em função do tempo para diferentes pressões de alimentação.....	44
Figura 4.5: Variação da condutividade elétrica de uma solução de NaCl ($K_i = 7,0 \text{ mS/cm}$) em função do tempo para diferentes pressões de alimentação.....	45
Figura 4.6: Variação da condutividade elétrica de uma solução de NaCl ($K_i = 2,10 \text{ mS/cm}$) em função do tempo para diferentes pressões de alimentação.....	46
Figura 4.7: Variação da condutividade elétrica da água salobra do poço do Município de Queimadas ($K_i = 2,20 \text{ mS/cm}$) em função do tempo para diferentes pressões de alimentação.....	47
Figura 4.8: Variação da condutividade elétrica de uma solução de NaCl ($K_i = 4,0 \text{ mS/cm}$) em função do tempo para pressões de alimentação.....	47
Figura 4.9: Variação da condutividade elétrica da água do poço do Município de Caturité ($K_i = 4,0 \text{ mS/cm}$) em função do tempo para diferentes pressões de alimentação.....	48
Figura 4.10: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo para os três tipos de membranas sob as seguintes condições: $K_i = 2,10 \text{ mS/cm}$; $P_e = 8,4 \text{ kgf/cm}^2$; $P_s = 8,0 \text{ kgf/cm}^2$; $Q_p = 0,97 \text{ L/min}$; $Q_c = 2,30 \text{ L/min}$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	50

Figura 4.11: Condutividade elétrica da água salobra do poço do Município de Queimadas em função do tempo para os três tipos de membranas sob as seguintes condições: $K_i = 2,20$ mS/cm (1075 mg/L); $P_e = 8,4$ kgf/cm ² ; $P_s = 8,0$ kgf/cm ² ; $Q_p = 0,77$ L/min; $Q_c = 2,50$ L/min; $T = 26 \pm 2$ °C	50
Figura 4.12: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo para os três tipos de membranas sob as seguintes condições: $K_i = 2,20$ mS/cm; $P_e = 10,4$ kgf/cm ² ; $P_s = 10,0$ kgf/cm ² ; $Q_p = 1,10$ L/min; $Q_c = 2,20$ L/min; $T = 26 \pm 2$ °C.....	51
Figura 4.13: Condutividade elétrica da água salobra do poço do Município de Queimadas em função do tempo para os três tipos de membranas sob as seguintes condições: $K_i = 2,20$ mS/cm (1075 mg/L); $P_e = 10,4$ kgf/cm ² ; $P_s = 10,0$ kgf/cm ² ; $Q_p = 0,98$ L/min; $Q_c = 2,20$ L/min; $T = 26 \pm 2$ °C	51
Figura 4.14: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo para os três tipos de membranas sob as seguintes condições: $K_i = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); $P_e = 7,4$ kgf/cm ² ; $P_s = 7,0$ kgf/cm ² ; $Q_p = 0,50$ L/min; $Q_c = 2,60$ L/min; $T = 26 \pm 2$ °C	52
Figura 4.15: Condutividade elétrica do poço do Município de Caturité em função do tempo para os três tipos de membranas sob as seguintes condições: $K_i = 4,30$ mS/cm; $P_e = 7,4$ kgf/cm ² ; $P_s = 7,0$ kgf/cm ² ; $Q_p = 0,39$ L/min; $Q_c = 2,80$ L/min; $T = 26 \pm 2$ °C	52
Figura 4.16: Variação da condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo utilizando o reciclo total ($K_i = 3,0$ mS/cm) para uma pressão de alimentação de $P_e = 4,4$ kgf/cm ²	55
Figura 4.17: Variação da condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo utilizando o reciclo total ($K_i = 5,50$ mS/cm) para uma pressão de alimentação de $P_e = 7,4$ kgf/cm ²	55
Figura 4.18: Recuperação em função da pressão de alimentação para soluções de NaCl a diferentes condutividade elétricas.....	57
Figura 4.19: Fluxo do permeado e média da taxa de rejeição de sais em função do gradiente de pressão para uma solução de NaCl a uma condutividade elétrica inicial de $K_i = 2,10$ mS/cm (1020 mg/L).....	58
Figura 4.20: Fluxo do permeado e média da taxa de rejeição de sais em função dos gradientes de pressões para uma solução de NaCl a uma condutividade elétrica inicial de $K_i = 3,0$ mS/cm (1510 mg/L)	59

Figura 4.21: Fluxo do permeado e média da taxa de rejeição de sais em função dos gradientes de pressões para uma solução de NaCl a uma condutividade elétrica inicial de $K_i = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L).....	59
Figura 4.22: Fluxo do permeado e média da taxa de rejeição de sais em função dos gradientes de pressões para uma solução de NaCl a uma condutividade elétrica inicial de $K_i = 5,5$ mS/cm (2930 mg/L).....	60
Figura 4.23: Fluxo do permeado e média da taxa de rejeição de sais em função dos gradientes de pressões para uma solução de NaCl a uma condutividade elétrica inicial de $K_i = 7,2$ mS/cm (3938 mg/L).....	60
Figura 4.24: Potencial hidrogênionico de uma solução de NaCl em função do tempo sob as seguintes condições : $K_i = 2,10$ mS/cm (1020 mg/L); $P_e = 8,4$ kgf/cm ² ; $P_s = 8,0$ kgf/cm ² ; $Q_p = 0,97$ L/min; $Q_c = 2,3$ L/min; $T = 26 \pm 2$ °C.....	62
Figura 4.25: Potencial hidrogênionico da água salobra do poço do Município de Queimadas função do tempo sob as seguintes condições : $K_i = 2,20$ mS/cm (1075 mg/L); $P_e = 8,4$ kgf/cm ² ; $P_s = 8,0$ kgf/cm ² ; $Q_p = 0,77$ L/min; $Q_c = 2,50$ L/min; $T = 26 \pm 2$ °C.....	62
Figura 4.26: Potencial hidrogênionico de uma solução de NaCl em função do tempo sob as seguintes condições : $K_i = 2,10$ mS/cm (1020 mg/L); $pH_i = 6,15$; $P_e = 10,4$ kgf/cm ² ; $P_s = 10,0$ kgf/cm ² ; $Q_p = 1,10$ L/min; $Q_c = 2,20$ L/min; $T = 26 \pm 2$ °C.....	63
Figura 4.27: Potencial hidrogênionico da água salobra do poço de Queimadas em função do tempo sob as seguintes condições : $K_i = 2,20$ mS/cm (1075 mg/L); $pH_i = 6,9$; $P_e = 10,4$ kgf/cm ² ; $P_s = 10,0$ kgf/cm ² ; $Q_p = 0,98$ L/min; $Q_c = 2,20$ L/min; $T = 26 \pm 2$ °C.....	63
Figura 4.28: Potencial hidrogênionico de uma solução de NaCl em função do tempo sob as seguintes condições : $K_i = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); $pH_i = 6,7$; $P_e = 7,4$ kgf/cm ² ; $P_s = 7,0$ kgf/cm ² ; $Q_p = 0,50$ L/min; $Q_c = 2,60$ L/min; $T = 26 \pm 2$ °C.....	64
Figura 4.29: Potencial hidrogênionico da água salobra do poço do Município de Caturité em função do tempo sob as seguintes condições : $K_i = 4,30$ mS/cm (2240 mg/L); $P_e = 7,4$ kgf/cm ² ; $P_s = 7,0$ kgf/cm ² ; $Q_p = 0,39$ L/min; $Q_c = 2,80$ L/min; $T = 26 \pm 2$ °C.....	64
Figura 4.30: Resultados das análises físico-químicas de uma água salobra proveniente de um poço tubular situado no Município de Caturité a uma condutividade elétrica inicial de 4,30 ms/cm (2240 mg/L) e pressão de operação de 7,4 kgf/cm ²	70

Figura 4.31: Resultados experimentais e simulados das análises físico-química de uma água salobra proveniente de um poço tubular situado no Município de Queimadas a uma condutividade elétrica inicial de 2,20 ms/cm (1075 mg/L) e pressão de operação de 10,4 kgf/cm².....71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1: Unidades de registro do sistema.....	34
Tabela 3.2: Parâmetros de ajustes para as curvas de calibração dos condutivímetros.....	37
Tabela 4.1: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 2,10$ mS/cm (1020mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,14$ L/min; $Q_c^* = 3,3$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,22$ L/min; $Q_c^{\#} = 3,14$ L/min; $R^* = 4,07$ %; $R^{\#} = 6,55$ %, $T = 26 \pm 2$ °C.....	84
Tabela 4.2: Condutividade elétrica da solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 2,10$ mS/cm (1020 mg/L); $K_i^{\#} = 2,25$ mS/cm; $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,37$ L/min; $Q_c^* = 2,9$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,44$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,80$ L/min; $R^* = 11,31$ %; $R^{\#} = 13,60$ %, $T = 26 \pm 2$ °C.....	84
Tabela 4.3: Condutividade elétrica da solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 2,10$ mS/cm (1020 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,97$ L/min; $Q_c^* = 2,30$ L/min; $Q_p^{\#} = 1,1$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,20$ L/min; $R^* = 29,67$ %; $R^{\#} = 33,33$ %, $T = 26 \pm 2$ °C.....	85
Tabela 4.4: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 3,0$ mS/cm (1510 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,11$ L/min; $Q_c^* = 2,40$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,21$ L/min; $Q_c^{\#} = 3,20$ L/min; $R^* = 3,07$ %; $R^{\#} = 6,19$ %, $T = 26 \pm 2$ °C.....	85
Tabela 4.5: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 3,0$ mS/cm (1510 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,31$ L/min; $Q_c^* = 3,0$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,38$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,90$ L/min; $R^* = 9,5$ %; $R^{\#} = 11,58$ %, $T = 26 \pm 2$ °C.....	86
Tabela 4.6: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 3,0$ mS/cm (1510 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,48$ L/min; $Q_c^* = 2,75$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,59$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,50$ L/min; $R^* = 15,0$ %; $R^{\#} = 19,09$ %, $T = 26 \pm 2$ °C.....	86
Tabela 4.7: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 3,0$ mS/cm (1510 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p = 0,7$ L/min; $Q_c = 2,40$ L/min ; $P_e = 8,4$ kgf/cm ² ; $P_s = 8,0$ kgf/cm ² ; $R = 22,58$ %; $T = 27 \pm 2$ °C.....	87
Tabela 4.8: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,18$ L/min; $Q_c^* = 3,3$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,28$ L/min; $Q_c^{\#} = 3,0$ L/min; $R^* = 5,31$ %; $R^{\#} = 8,54$ %, $T = 26 \pm 2$ °C.....	87
Tabela 4.9: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,36$ L/min; $Q_c^* = 2,9$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,46$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,76$ L/min; $R^* = 11,04$ %; $R^{\#} = 14,28$ %, $T = 26 \pm 2$ °C.....	88

Tabela 4.10: Condutividade elétrica da solução de NaCl em função do tempo: $K_i^{\bullet} = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^{\bullet} = 0,50$ L/min; $Q_c^{\bullet} = 2,6$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,59$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,50$ L/min; $R^{\bullet} = 16,13$ %; $R^{\#} = 19,03$ %, $T = 26 \pm 2$ °C	88
Tabela 4.11: Condutividade elétrica da solução de NaCl em função do tempo: $K_i^{\bullet} = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^{\bullet} = 0,97$ L/min; $Q_c^{\bullet} = 2,3$ L/min; $Q_p^{\#} = 1,1$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,1$ L/min; $R^{\bullet} = 29,67$ %; $R^{\#} = 34,57$ %, $T = 26 \pm 2$ °C	89
Tabela 4.12: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 5,50$ mS/cm (2932 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^{\bullet} = 0,13$ L/min; $Q_c^{\bullet} = 3,2$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,22$ L/min; $Q_c^{\#} = 3,1$ L/min; $R^{\bullet} = 3,90$ %; $R^{\#} = 6,77$ %, $T = 26 \pm 2$ °C	89
Tabela 4.13: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 5,50$ mS/cm (2932 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^{\bullet} = 0,34$ L/min; $Q_c^{\bullet} = 2,8$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,41$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,8$ L/min; $R^{\bullet} = 10,83$ %; $R^{\#} = 12,77$ %, $T = 26 \pm 2$ °C	90
Tabela 4.14: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo; $K_i = 5,50$ mS/cm (2932 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p = 0,42$ L/min; $Q_c = 2,60$ L/min ; $Pe = 8,4$ kgf/cm ² ; $Ps = 8,0$ kgf/cm ² ; $R = 13,91$ %; $T = 26 \pm 2$ °C	90
Tabela 4.15: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 7,20$ mS/cm (3938 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^{\bullet} = 0,11$ L/min; $Q_c^{\bullet} = 3,3$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,22$ L/min; $Q_c^{\#} = 3,1$ L/min; $R^{\bullet} = 3,2$ %; $R^{\#} = 6,63$ %, $T = 26 \pm 2$ °C	91
Tabela 4.16: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 7,20$ mS/cm (3938 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^{\bullet} = 0,25$ L/min; $Q_c^{\bullet} = 3,0$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,30$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,8$ L/min; $R^{\bullet} = 7,70$ %; $R^{\#} = 9,68$ %; $T = 26 \pm 2$ °C	91
Tabela 4.17: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo; $K_i = 7,20$ mS/cm (3938 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p = 0,37$ L/min; $Q_c = 2,70$ L/min ; $Pe = 8,4$ kgf/cm ² ; $Ps = 8,0$ kgf/cm ² ; $R = 12,05$ %; $T = 26 \pm 2$ °C	92
Tabela 4.18: Condutividade elétrica da água salobra do poço do Município de Queimadas em função do tempo: $K_i = 2,20$ mS/cm (1075 mg/L); $Pe = 5,1$ kgf/cm ² ; $Ps = 5,0$ kgf/cm ² ; $V_t = 45$ L; $Q_p = 0,36$ L/min; $Q_c = 2,80$ L/min; $R = 11,39$; $T = 26 \pm 2$ °C	92
Tabela 4.19: Condutividade elétrica da água salobra do poço do Município de Queimadas em função do tempo: $K_i = 2,20$ mS/cm (1075 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^{\bullet} = 0,97$ L/min; $Q_c^{\bullet} = 2,30$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,98$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,20$ L/min; $R^{\bullet} = 29,67$ %; $R^{\#} = 30,82$ %; $T = 26 \pm 2$ °C	93

Tabela 4.20: Condutividade elétrica da água salobra do poço do Município de Caturité em função do tempo; $K_i = 4,30 \text{ mS/cm (2240 mg/L)}$; $P_e = 7,4 \text{ kgf/cm}^2$; $P_s = 7,0 \text{ kgf/cm}^2$; $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p = 0,39 \text{ L/min}$; $Q_c = 2,8 \text{ L/min}$; $R = 12,22 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$93

Tabela 4.21: Condutividade elétrica da água salobra do poço do Município de Caturité em função do tempo: $K_i = 4,30 \text{ mS/cm (2240 mg/L)}$; $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 0,83 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 2,5 \text{ L/min}$; $Q_p^\# = 0,95 \text{ L/min}$; $Q_c^\# = 2,2 \text{ L/min}$; $R^* = 24,62 \%$; $R^\# = 30,16 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$94

Tabela 4.22: Condutividade elétrica da solução de NaCl e água salobra do poço de Queimadas em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i = 2,20 \text{ mS/cm (1075 mg/L)}$; $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 0,97 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 2,30 \text{ L/min}$; $Q_p^\# = 0,77 \text{ L/min}$; $Q_c^\# = 2,50 \text{ L/min}$; $R^* = 29,67 \%$; $R^\# = 23,55 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$94

Tabela 4.23: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl e água salobra do poço de Queimadas em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i = 2,20 \text{ mS/cm (1075mg/L)}$; $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 1,1 \text{ L/min}$; $Q_p^\# = 0,98 \text{ L/min}$; $Q_c = 2,20 \text{ L/min}$; $R^* = 33,33 \%$; $R^\# = 30,82 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$95

Tabela 4.24: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i = 3,0 \text{ mS/cm (1510 mg/L)}$; $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 0,59 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 2,50 \text{ L/min}$; $Q_p^\# = 0,70 \text{ L/min}$; $Q_c^\# = 2,40 \text{ L/min}$; $R^* = 19,09 \%$; $R^\# = 22,58 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$95

Tabela 4.25: Condutividade elétrica da solução de NaCl e água salobra do poço do Município de Caturité em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i^* = 4,0 \text{ mS/cm (2069 mg/L)}$; $K_i^\# = 4,30 \text{ mS/cm (2240 mg/L)}$; $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 0,50 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 2,6 \text{ L/min}$; $Q_p^\# = 0,39 \text{ L/min}$; $Q_c^\# = 2,8 \text{ L/min}$; $R^* = 16,13 \%$; $R^\# = 12,22 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$96

Tabela 4.26: Condutividade elétrica da solução de NaCl e água salobra do poço do Município de Caturité em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i^* = 4,0 \text{ mS/cm (2069 mg/L)}$; $K_i^\# = 4,30 \text{ mS/cm (2240 mg/L)}$; $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 0,97 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 2,3 \text{ L/min}$; $Q_p^\# = 0,83 \text{ L/min}$; $Q_c^\# = 2,5 \text{ L/min}$; $R^* = 29,67 \%$; $R^\# = 24,92 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$96

Tabela 4.27: Condutividade elétrica da solução de NaCl e água salobra do poço do município de Caturité em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i^* = 4,0 \text{ mS/cm (2069 mg/L)}$; $K_i^\# = 4,30 \text{ mS/cm (2240 mg/L)}$; $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 1,1 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 2,1 \text{ L/min}$; $Q_p^\# = 0,95 \text{ L/min}$; $Q_c^\# = 2,2 \text{ L/min}$; $R^* = 34,37 \%$; $R^\# = 30,16 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$97

Tabela 4.28: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i = 5,50 \text{ mS/cm (2932 mg/L)}$; $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 0,13 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 3,2 \text{ L/min}$; $Q_p^{\#} = 0,22 \text{ L/min}$; $Q_c^{\#} = 3,1 \text{ L/min}$; $R^* = 3,90 \%$; $R^{\#} = 6,77 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	97
Tabela 4.29: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i = 5,50 \text{ mS/cm (2932 mg/L)}$; $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 0,34 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 2,8 \text{ L/min}$; $Q_p^{\#} = 0,41 \text{ L/min}$; $Q_c^{\#} = 2,8 \text{ L/min}$; $R^* = 10,83 \%$; $R^{\#} = 12,77 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	98
Tabela 4.30: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i = 5,50 \text{ mS/cm (2932 mg/L)}$; $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p = 0,42 \text{ L/min}$; $Q_c = 2,60 \text{ L/min}$; $P_e = 8,4 \text{ kgf/cm}^2$; $P_s = 8,0 \text{ kgf/cm}^2$; $R = 13,91 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	98
Tabela 4.31: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i = 7,20 \text{ mS/cm (3938 mg/L)}$; $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 0,11 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 3,3 \text{ L/min}$; $Q_p^{\#} = 0,22 \text{ L/min}$; $Q_c^{\#} = 3,1 \text{ L/min}$; $R^* = 3,2 \%$; $R^{\#} = 6,63 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	99
Tabela 4.32: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i = 7,20 \text{ mS/cm (3938 mg/L)}$; $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 0,25 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 3,0 \text{ L/min}$; $Q_p^{\#} = 0,30 \text{ L/min}$; $Q_c^{\#} = 2,8 \text{ L/min}$; $R^* = 7,70 \%$; $R^{\#} = 9,68 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	99
Tabela 4.33: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i = 7,20 \text{ mS/cm (3938 mg/L)}$; $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p = 0,37 \text{ L/min}$; $Q_c = 2,70 \text{ L/min}$; $P_e = 8,4 \text{ kgf/cm}^2$; $P_s = 8,0 \text{ kgf/cm}^2$; $R = 12,05 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	100
Tabela 4.34: Média da taxa de rejeição de sais para cada elemento de membrana.....	49
Tabela 4.35: Taxa de recuperação para os três tipos de membranas a diferentes condutividade elétrica e pressões de alimentação.....	53
Tabela 4.36: Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo, utilizando o reciclo total sob as seguintes condições: $K_i^* = 3,0 \text{ mS/cm}$; $K_i^{\#} = 5,50 \text{ mS/cm}$; $Q_p^* = 0,28 \text{ L/min}$; $Q_{pr}^* = 0,25 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 3,0 \text{ mS/cm}$; $Q_p^{\#} = 0,41 \text{ L/min}$; $Q_{pr}^{\#} = 0,35 \text{ L/min}$; $Q_c^{\#} = 2,8 \text{ L/min}$	100
Tabela 4.37: Condutividade elétricas em função das pressões de alimentação e das recuperações do sistema para uma solução de NaCl e águas salobras de poços tubulares.....	101
Tabela 4.38: Fluxo do permeado e média da taxa de rejeição de sais em função do gradiente de pressão, para uma solução de NaCl a uma condutividade elétrica inicial média de $K_i = 2,10 \text{ mS/cm}$ e coeficiente de transferência de massa para água de $K_a = 0,002301 \text{ cm}^3/\text{kgf}\cdot\text{min}$	103

Tabela 4.39: Fluxo do permeado e média da taxa de rejeição de sais em função do gradiente de pressão para uma solução de NaCl, a uma condutividade elétrica inicial de $K_i = 3,0$ e $4,0$ mS/cm e coeficientes de transferências de massas para água de $0,01755$ e $0,01922$

cm³/kgf min..... 103

Tabela 4.40: Fluxo do permeado e média da taxa de rejeição de sais em função do gradiente de pressão para uma solução de NaCl, a uma condutividade elétrica inicial de $K_i = 5,5$ e $7,0$ mS/cm e coeficientes de transferências de massas de $0,01608$ e $0,00927$ cm³/kgf min 104

Tabela 4.41: Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 2,10$ mS/cm (1020 mg/L); $pH^i = 6,2$; $pH^f = 6,15$; $V_t = 45$ L; $Q_p^i = 0,97$ L/min; $Q_c^i = 2,30$ L/min; $Q_p^f = 1,1$ L/min; $Q_c^f = 2,20$ L/min; $R^i = 29,67$ %; $R^f = 33,33$ %, $T = 26 \pm 2$ °C..... 104

Tabela 4.42: Potencial hidrogeniônico da água salobra do poço do Município de Queimadas em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 2,20$ mS/cm (1075 mg/L); $pH = 6,9$; $V_t = 45$ L; $Q_p^i = 0,97$ L/min; $Q_c^i = 2,30$ L/min; $Q_p^f = 0,98$ L/min; $Q_c^f = 2,20$ L/min; $R^i = 29,67$ %; $R^f = 30,82$ %, $T = 26 \pm 2$ °C 105

Tabela 4.43: Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 3,0$ mS/cm (1510 mg/L); $pH^i = 6,50$; $pH^f = 6,54$; $V_t = 45$ L; $Q_p^i = 0,59$ L/min; $Q_c^i = 2,50$ L/min; $Q_p^f = 0,7$ L/min; $Q_c^f = 2,40$ L/min; $R^i = 19,09$ %; $R^f = 22,58$ %; $T = 27 \pm 2$ °C..... 105

Tabela 4.44: Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); $pH = 6,20$; $V_t = 45$ L; $Q_p^i = 0,18$ L/min; $Q_c^i = 3,3$ L/min; $Q_p^f = 0,28$ L/min; $Q_c^f = 3,0$ L/min; $R^i = 5,31$ %; $R^f = 8,54$ %, $T = 26 \pm 2$ °C..... 106

Tabela 4.45: Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); $pH^i = 6,8$; $pH^f = 6,5$; $V_t = 45$ L; $Q_p^i = 0,36$ L/min; $Q_c^i = 2,9$ L/min; $Q_p^f = 0,46$ L/min; $Q_c^f = 2,76$ L/min; $R^i = 11,04$ %; $R^f = 14,28$ %, $T = 26 \pm 2$ °C..... 106

Tabela 4.46: Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); $pH = 6,65$; $V_t = 45$ L; $Q_p^i = 0,50$ L/min; $Q_c^i = 2,6$ L/min; $Q_p^f = 0,59$; $Q_c^f = 2,50$ L/min; $R^i = 16,13$ %; $R^f = 19,03$ %, $T = 26 \pm 2$ °C..... 107

Tabela 4.47: Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); pH = 6,10; $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,97$ L/min; $Q_c^* = 2,3$ L/min; $Q_p^{\#} = 1,1$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,1$ L/min; $R^* = 29,67$ %; $R^{\#} = 34,57$ %, $T = 26 \pm 2$ °C.....	107
Tabela 4.48: Potencial hidrogeniônico da água salobra do poço do Município de Caturité em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 4,30$ mS/cm (2240 mg/L); pH = 7,2; $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,39$ L/min; $Q_c^* = 2,80$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,83$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,50$ L/min; $R^* = 12,22$ %; $R^{\#} = 24,92$ %, $T = 26 \pm 2$ °C.....	108
Tabela 4.49: Potencial hidrogeniônico da água salobra do poço do Município de Caturité em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 4,30$ mS/cm (2240 mg/L); pH = 7,2; $V_t = 45$ L; $Q_p = 0,95$ L/min; $Q_c^* = 2,20$ L/min; $R = 30,16$ %; $T = 26 \pm 2$ °C.....	108
Tabela 4.50: Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 5,50$ mS/cm (2932 mg/L); pH = 6,24; $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,13$ L/min; $Q_c^* = 3,2$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,22$ L/min; $Q_c^{\#} = 3,1$ L/min; $R^* = 3,90$ %; $R^{\#} = 6,77$ %, $T = 26 \pm 2$ °C.....	109
Tabela 4.51: Tabela 4 51 - Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 5,50$ mS/cm (2932 mg/L); pH = 6,13; $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,34$ L/min; $Q_c^* = 2,8$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,41$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,8$ L/min; $R^* = 10,83$ %; $R^{\#} = 12,77$ %, $T = 26 \pm 2$ °C.....	109
Tabela 4.52: Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 5,50$ mS/cm (2932 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p = 0,42$ L/min; $Q_c = 2,60$ L/min ; $P_e = 8,4$ kgf/cm ² ; $P_s = 8,0$ kgf/cm ² ; $R = 13,91$ %; $T = 26 \pm 2$ °C.....	110
Tabela 4.53: Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 7,20$ mS/cm (3968 mg/L); pH = 6,87; $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,11$ L/min; $Q_c^* = 3,3$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,22$ L/min; $Q_c^{\#} = 3,1$ L/min; $R^* = 3,2$ %; $R^{\#} = 6,63$ %, $T = 26 \pm 2$ °C.....	110
Tabela 4.54: Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 7,20$ mS/cm (3938 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,25$ L/min; $Q_c^* = 3,0$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,30$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,8$ L/min; $R^* = 7,70$ %; $R^{\#} = 9,68$ %; $T = 26 \pm 2$ °C.....	111

Tabela 4.55: Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 7,20 \text{ mS/cm}$ (3938 mg/L); $\text{pH} = 6,74$; $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p = 0,37 \text{ L/min}$; $Q_c = 2,70 \text{ L/min}$; $P_e = 8,4 \text{ kgf/cm}^2$; $P_s = 8,0 \text{ kgf/cm}^2$; $R = 12,05 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	111
Tabela 4.56: Consumo de energia e Custo para uma solução de NaCl em função da pressão de operação e recuperação a uma condutividade elétrica inicial de $2,10 \text{ mS/cm}$ (1020 mg/L)	66
Tabela 4.57: Consumo de energia e custo de uma solução de NaCl em função da pressão de - operação e recuperação a uma condutividade elétrica inicial de $3,0 \text{ mS/cm}$ (1510 mg/L).....	66
Tabela 4.58: Consumo de energia e custo de uma solução de NaCl em função da pressão de - operação e recuperação a uma condutividade elétrica inicial de $4,0 \text{ mS/cm}$ (2069 mg/L).....	67
Tabela 4.59: Consumo de energia e custo de uma solução de NaCl em função da pressão de operação e recuperação a uma condutividade elétrica inicial de $5,5 \text{ mS/cm}$ (2932 mg/L).....	67
Tabela 4.60: Consumo de energia e custo de uma solução de NaCl em função da pressão de operação e recuperação a uma condutividade elétrica inicial de $7,2 \text{ mS/cm}$ (3938 mg/L).....	68
Tabela 4.61: Consumo de energia e custo para água salobra do poço do Município de Queimadas em função da pressão de operação e recuperação a uma condutividade elétrica inicial de $2,20 \text{ mS/cm}$ (1075 mg/L).....	69
Tabela 4.62: Consumo de energia e custo para água salobra do poço do Município de Caturité em função da pressão de operação e recuperação a uma condutividade elétrica inicial de $4,30 \text{ mS/cm}$ (2240 mg/L).....	69
Tabela 4.63: Resultados das análises físico-química para o sistema de osmose inversa utilizando água salobra proveniente do poço do Município de Caturité a uma condutividade elétrica inicial de $4,30 \text{ mS/cm}$ e pressão de ooperação de $7,4 \text{ kgf/cm}^2$	112
Tabela 4.64: Resultado experimental e simulado do permeado, utilizando água salobra proveniente do poço do Município de Queimadas para o sistema de osmose inversa a uma condutividade elétrica inicial de $2,20 \text{ mS/cm}$ a uma pressão de operação de $10,4 \text{ kgf/cm}^2$...	113
Tabela 4.65: Resultados Bacteriológicos da água salobra do poço do Município de Queimadas, do permeado e do concentrado do sistema de osmose inversa.....	72
Tabela 4.66 - Resultados Bacteriológicos da água salobra do poço do Município de Caturité, do permeado e do concentrado do sistema de osmose inversa.....	73

SIMBOLOGIA

- A - área superficial da membrana (cm^2)
- C - concentração (mg/L)
- Ca - concentração da solução de alimentação (mg/L)
- Cb - concentração de sais no seio da solução (mg/L)
- Cc - concentração do concentrado (mg/L)
- Ci - concentração molar do soluto (mol/L)
- Cp - concentração do permeado (mg/L)
- Cs - concentração de sais na superfície da membrana (mg/L)
- D - coeficiente de difusão (cm^2/s)
- E - consumo de energia (KWh/m^3)
- H - altura do nível da coluna de alimentação (m)
- J - taxa de fluxo do permeado ($\text{cm}^3/\text{cm}^2 \text{min}$)
- JC - fluxo convectivo do soluto ($\text{cm}^3/\text{cm}^2 \text{min}$)
- JCp - fluxo difusivo do soluto ($\text{cm}^3/\text{cm}^2 \text{min}$)
- J_i - taxa de fluxo de sal ($\text{g}/\text{cm}^2 \text{min}$)
- K - condutividade elétrica (mS/cm)
- K_s - coeficiente de transferência de massa para o solvente ($\text{cm}^3/\text{kgf min}$)
- K_s - coeficiente de transferência de massa para o soluto (cm/min)
- Pa - pressão da solução de alimentação (kgf/cm^2)
- Pc - pressão do concentrado (kgf/cm^2)
- Pp - pressão do permeado (kgf/cm^2)
- Qa - vazão da solução de alimentação (cm^3/min)
- Qc - vazão do concentrado (cm^3/min)
- Q_p - vazão do permeado (cm^3/min)
- R - recuperação do sistema (%)
- Ri - constante dos gases ideais ($\text{kgf L}/\text{cm}^2 \text{mol K}$)
- T - temperatura (K)
- TRS - taxa de rejeição de sais (%)

Letras gregas

ΔC - gradiente de concentração (mg/L)

ΔP - gradiente de pressão (kgf/cm²)

$\Delta \pi$ - gradiente de pressão osmótica (kgf/cm²)

α e σ - parâmetros específicos para cada condutivímetro utilizado

β - concentração de polarização

δ - espessura da camada limite (cm)

ν - n^o de íons formados na dissociação do soluto

η_r - eficiência de recuperação do sistema de dessalinização (%)

η_b - eficiência da bomba (%)

η_m - eficiência do motor (%)

CAPÍTULO I

1.0 - INTRODUÇÃO

A ciência, como atividade humana capaz de gerar conhecimento, figura no cenário social como escopo de proporcionar aos indivíduos instrumentos de desenvolvimento e realização social.

É por meio da pesquisa científica que se procura a melhor solução para os problemas humanos, seja quais forem. O conhecimento científico ainda é o mecanismo mais seguro de avaliação dos fatos.

Neste sentido, podemos destacar que a escassez de água potável no planeta deverá ser um dos maiores desafios que a ciência procurará superar no próximo milênio.

A preocupação é pertinente, pois os recursos hídricos disponíveis, parecem cada vez mais escassos, em decorrência de fatores humanos e naturais, dentre eles, sobressaem-se: a degradação ambiental promovida pela sociedade moderna, poluindo rios, mares e lagos; má distribuição da água no planeta; aumento do consumo humano; desperdício.

Atualmente, 1 bilhão de pessoas não têm acesso à água potável para consumo humano e a perspectiva para o século vindouro, caso não sejam tomadas providências imediatas, revela-se assustadora: 2/3 da população mundial poderão passar sede no ano de 2005 [França, 1998]

Ademais, esse recurso natural não é apenas um elemento indispensável à sobrevivência humana. Sua função de agente de desenvolvimento econômico e social das nações, sob binômio qualidade- quantidade, apresenta-se como fundamental. A sua falta, decerto, afeta o desenvolvimento econômico dos países, basta verificar a questão das grandes estiagens que ocorrem no Nordeste.

Esclarecemos ainda que a água, diferentemente do petróleo é fonte natural inesgotável, porém pode faltar água potável, tendo em vista os fatores acima aludidos que colaboram para diminuição dos mananciais d'água do globo terrestre.

Diante desse panorama preocupante, geralmente aparece a pergunta: como explicar a carência de água se o planeta tem 75% de sua superfície coberta por esse líquido precioso? [França, 1998].

É de nosso conhecimento que a distribuição da água no nosso planeta se encontra nos oceanos, com aproximadamente 97% do total de água existente. A grande fonte de água potável se encontra nas geleiras, principalmente nos pólos, (cerca de 2,0 %). As águas subterrâneas correspondem a 0,6% e os rios, lagos e atmosfera apresentam 0,4 % da água total do planeta que pode suprir à humanidade [Price, 1991].

O Brasil detém 8% de toda água doce superficial do planeta. Essa água disponível é distribuída de forma extremamente desigual, existindo regiões em que ela é abundante e em outras sua ausência é sinônimo de pobreza e morte [França, 1998].

A Região Nordeste apresenta em sua forma litológica uma predominância de rochas cristalinas, que contribui para a salinização dos mananciais hídricos ao longo do tempo, inviabilizando a utilização dos mesmos para consumo humano, animal e irrigação.

Estatísticas apontam que há no Nordeste, disponibilidade atual de 300.000 m³ de água salinizada de poços e açudes inativos, que potencialmente, abasteceriam mais de 12 milhões de habitantes do semi-árido castigados pela seca [Pereira & Santos, 1997].

Atualmente existe uma crescente conscientização sobre a necessidade de serem preservados os recursos hídricos, principalmente em regiões áridas, exigindo um complexo gerenciamento desses recursos.

Um dos recursos para a dessalinização e purificação de águas salobras e salinas que vem sendo muito utilizado é o processo de osmose inversa. Essa tecnologia, bastante difundida em países desenvolvidos foi recém introduzida no Brasil.

As membranas poliméricas semipermeáveis utilizadas nos processos de osmose inversa, são permeáveis a água e impermeáveis aos sais, suportam altas pressões e oferecem como produto final uma água dentro dos padrões exigidos pela Organização Mundial de Saúde para o consumo humano.

Tendo em vista a grande carência de água potável na Região Nordeste, o Laboratório de Dessalinização do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal da Paraíba, 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.

O presente trabalho tem como objetivo principal estudar o desempenho de uma unidade de pequeno porte para dessalinização de água salobras de poços tubulares via osmose inversa, para atender pequenas comunidades. Este sistema é composto de três diferentes tipos de membranas de poliamida para osmose inversa.

O sistema foi estudado com soluções de cloreto de sódio e águas salobras provenientes de poços tubulares. Os principais parâmetros analisados foram: condutividade elétrica, pressão de operação, recuperação, taxa de rejeição e consumo de energia. Além deste estudo foi utilizado um programa de osmose inversa (Ropro) desenvolvido pela Fluid Sytems Corporation USA, no sentido de comparar os resultados obtidos por este programa com os resultados experimentais.

CAPÍTULO II

2.0 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A osmose inversa é uma operação unitária que através de membranas semipermeáveis e com o auxílio de um gradiente de pressão, pode rejeitar sais inorgânicos de baixo peso molecular, como também pequenas moléculas orgânicas [Mulder, 1991].

O fenômeno da osmose inversa foi descoberto por Abbe Nollet a mais de 200 anos, quando foi observado o transporte de água através de uma bexiga de origem animal.

A primeira membrana sintética foi desenvolvida em 1867 por Moritz Taube. Em 1953, Reid propôs a dessalinização de água pelo processo de osmose inversa e investigou a permeabilidade de vários tipos de membranas sintéticas [Brandt et al, 1993].

Reid e Breton (1957) relataram que membranas derivadas de acetato de celulose, quando utilizadas para osmose inversa, apresentavam um bom desempenho como membranas semipermeáveis, mas que a taxa de permeabilidade para a água era muito baixa para uso prático [Nishimura & Koyama, 1992].

As membranas sintéticas com possibilidade comerciais só se tornaram disponíveis em 1960, quando Loeb e Sourirajan aperfeiçoaram uma técnica para preparação de membrana assimétrica de acetato de celulose, utilizadas no processo de dessalinização de água por osmose inversa e concluíram que essas membranas apresentavam uma alta taxa de rejeição de sais e uma elevada taxa de permeabilidade para a água [Harbert, Borges & Nobrega, 1997].

Em 1977, surgiram as membranas de poliamida que são resistentes ao ataque microbiológico, exibem grande tolerância a pH, porém se degradam na presença de cloro e possuem estrutura assimétrica, muito similar ao da membrana de acetato de celulose [Silva, 1995].

Embora recentes, os processos de separação com membranas têm encontrado um rápido desenvolvimento. A principal característica desses processos, está relacionada ao fato da maioria das separações ocorrerem sem mudança de fase, sendo, portanto,

tradicionais. Além disso, são processos que apresentam um baixo custo energético e um produto final de alta qualidade [Harbert, Borges & Nobrega, 1997].

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) também conhecido 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 [Harbert, Borges & Nobrega, 1997].

Na Figura 2.1 são apresentadas as principais características dos processos com membranas que utilizam a diferença de pressão transmembrana como força motriz.

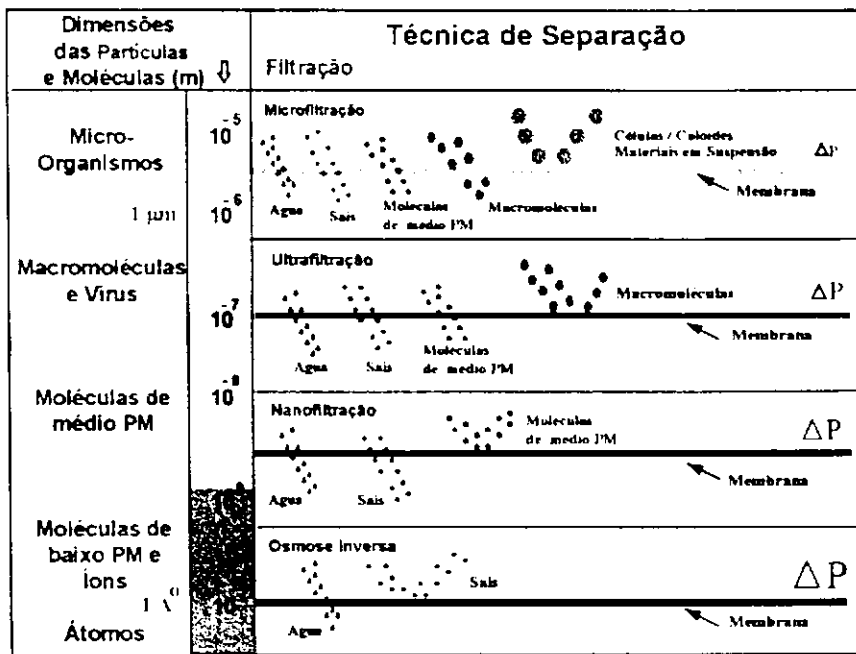


Figura 2.1- Principais características dos processos com membranas que utilizam diferença de pressão como força motriz.

As membranas de microfiltração (MF) são indicadas na remoção de partículas em suspensão e colóides que se encontram na faixa de 0,1 a 10 µm. Uma das aplicações da microfiltração é no pré-tratamento utilizado no processo de osmose inversa, quando se deseja remover contaminantes presentes na água de alimentação.

As membranas de ultrafiltração (UF) apresentam poros na faixa de 1 e 100 nm, portanto mais fechados do que as membranas de microfiltração (MF), apresentando assim uma maior resistência a permeação. Por este motivo, pressões mais elevadas do que as utilizadas em microfiltração são necessárias neste processo.

A ultrafiltração pode ser usada na remoção de macromoléculas, colóides, vírus, bactérias e proteínas. A ultrafiltração é largamente utilizada na indústria de alimentos, bebidas e laticínios, assim como em aplicações na biotecnologia e na área médica.

As membranas de nanofiltração (NF) se encontram entre a ultrafiltração (UF) e a osmose inversa (OI) e permitem a separação de partículas que se encontram na faixa de 10 Angstroms (1nanômetro), todas as moléculas orgânicas com elevado peso molecular são rejeitadas, como também íons bivalentes, como cálcio e magnésio e em pequena quantidade íons monovalentes. Uma das aplicações da nanofiltração é a remoção de compostos orgânicos e inorgânicos (dureza) de águas superficiais [Scott,1996].

2.1 - OSMOSE INVERSA

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

Portanto, este processo pode remover sais, dureza, microorganismos em geral e patogênicos em particular, turbidez, compostos orgânicos, pesticidas e a maioria dos contaminantes presentes na água. Mas muitos dos gases dissolvidos tais como hidrogênio sulfídrico e dióxido de carbono, irão passar através da membrana de osmose inversa [Taylor & Jacobs, 1996].

A dessalinização de águas para produção de água potável é a maior aplicação da osmose inversa e já se encontra consolidada a nível mundial, apresentando cerca de 34% dos 15 milhões de m^3/dia de água que são dessalinizados por dia [Taylor & Jacobs, 1996]. A abrangência de sua aplicação é, porém, bem mais ampla. Além da dessalinização de águas, vem sendo empregada em recuperação de efluentes industriais,

concentração de sucos, produtos farmacêuticos, processamento de alimentos e bebidas, soro do leite na fabricação do queijo, diálises, obtenção de água ultrapura, produção de aminoácidos para bio-engenharia, etc [Brandt et al, 1993]. As vantagens da osmose inversa incluem o baixo consumo energético, custos de capital e de operação relativamente baixo, necessidade de pequenos espaços e facilidades na construção, operação e manutenção, devido a natureza modular do processo.

2.1.1 - PRINCÍPIO OPERACIONAL DO PROCESSO DE OSMOSE INVERSA

O fenômeno da osmose é de fundamental importância na natureza já que o transporte seletivo através de membranas é essencial a vida. A osmose natural, vital para os sistemas biológicos, envolve a ação da água, quando duas soluções líquidas com diferentes concentrações são separadas por uma membrana semipermeável [Harbert, Borges & Nobrega, 1997]. Ocorre espontaneamente a passagem da solução menos concentrada em direção a mais concentrada, até que o equilíbrio seja estabelecido Figura 2 (a). O fluxo se processa porque a solução menos concentrada encontra-se em um estado de energia maior. Este fenômeno é conhecido como osmose. Quanto maior for a diferença de concentração inicial entre os dois compartimentos, maior será a pressão criada que interromperá o transporte osmótico da água através da membrana, a essa diferença entre as colunas da solução é denominada de pressão osmótica (conforme mostra a Figura 2 (b)). A osmose inversa é um processo induzido que ocorre quando uma pressão superior a pressão osmótica é aplicada do lado da solução mais concentrada. Assim sendo, pelo processo então denominado de osmose inversa, pode ser retirada água de uma solução salina por meio de uma membrana semi-permeável como mostra a Figura 2 (c), contanto que a solução em questão se encontre a uma pressão superior à pressão osmótica relativa a sua concentração salina [Lonsdale, 1992].

Em processos de grande escala isso ocorre com auxílio de uma bomba de alta pressão sob um fluxo contínuo passando por um permeador (vaso de pressão) onde fica situada a membrana. A solução contendo menor concentração de sais e a mais concentrada passam de forma contínua através da membrana, de modo que a pressão osmótica e a concentração de sais se mantêm em níveis aceitáveis para que o processo não seja interrompido. A água assim obtida é denominada de permeado ou produto e a solução concentrada de concentrado ou rejeito [Dow Latin Química, 1996].

Nos países que vem utilizando a osmose inversa em grande escala para fins de dessalinização, como por exemplo os Estados Unidos da América, o concentrado da dessalinização é considerado como um problema de ordem ambiental. Atualmente, o manejo do concentrado passou a ser fonte de estudo em função da qualidade da água a ser tratada. Por exemplo; normalmente para águas de oceanos, o concentrado vem sendo retornado para o próprio oceano de forma segura sem perturbar a vida marinha. Quando se trata de águas subterrâneas, rios ou lagos, existem várias formas de evitar o contato do concentrado com o solo: tem-se reciclado uma parte do concentrado para alimentação, quando se trata de uma água de alimentação de baixo teor de sais dissolvidos. Em algumas vilas, a descarga do concentrado é diluída com águas residuais de efluentes. Em alguns casos, vem-se retornando o concentrado para o próprio poço tubular profundo [Buros, 1994]. Na área agrícola, o concentrado vem sendo utilizado para irrigação tipo "spray", dependendo da concentração de sais dissolvidos no concentrado. Essa técnica dificulta a ocorrência de pontos de concentração localizadas no solo. Um outro método é a obtenção de soda caustica, ácido clorídrico ou ácido sulfúrico a partir do concentrado da dessalinização.

Outro processo utilizado é a evaporação, que geralmente necessita de grandes áreas e seu desempenho depende da taxa de irradiação solar da região, tornando-se em alguns casos um método improdutivo e caro [Buros, 1994].

No Brasil a quantidade do concentrado produzido é bastante reduzida comparada com a produção dos Estados Unidos.

O concentrado das unidades de osmose inversa para produção de água potável para pequenas comunidades de cidades do interior dos Estados do Nordeste, vem sendo utilizados para diversos fins como: uso em banheiros públicos, consumo animal e limpeza em geral.

Uma pesquisa que vem se destacando, como uma fonte de recurso alimentar é a produção de tilápias vermelhas e plantas do gênero *Atriplex*. Essa planta tornou-se como uma fonte de nutrientes para ruminantes, por conter aproximadamente 16 % de proteínas, 0,12 % de fósforo e 59 % de matéria orgânica. Esse tipo de estudo vem sendo desenvolvido no laboratório da Embrapa no Estado de Pernambuco [Amorim, 1998].

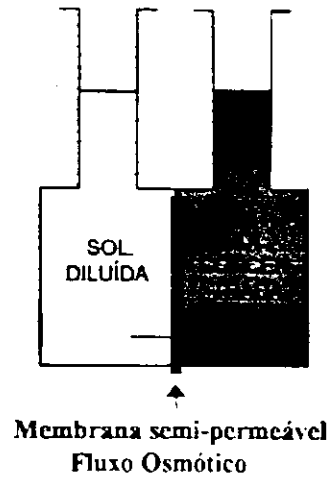


Figura 2 (a)

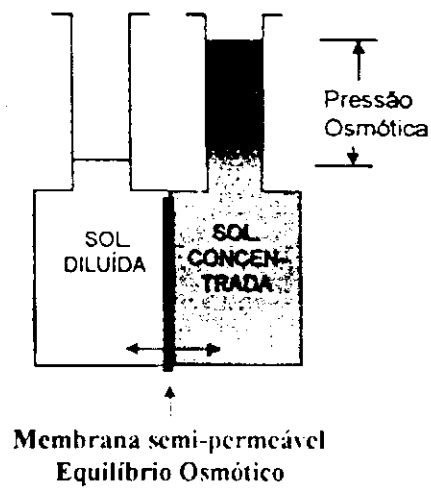


Figura 2 (b)

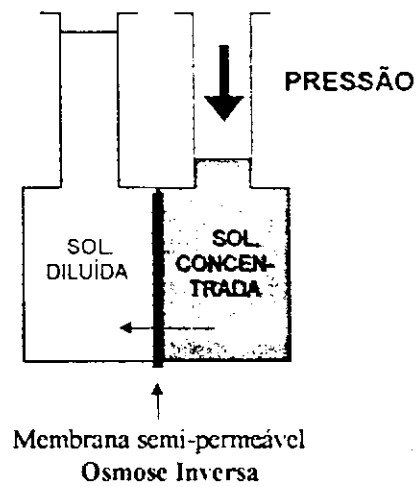


Figura 2 (c)

Figura 2.2- Representação esquemática do processo de osmose e osmose inversa

2.2 - 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 e pode ser representado pela Equação 2.1 [Taylor & Jacobs, 1996]:

$$J = K_s (\Delta P - \Delta \pi) = \frac{Q_p}{A} \quad (2.1)$$

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

$$\Delta \pi = \left[\frac{\pi_a + \pi_c}{2} - \pi_p \right] \quad (2.3)$$

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

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

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

ΔP = média da 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).

π_a = pressão osmótica da alimentação (kgf/cm^2).

π_c = pressão osmótica do concentrado (kgf/cm^2).

π_p = pressão osmótica do permeado (kgf/cm^2).

2.3 - FLUXO DE PASSAGEM DE SAIS

O transporte de sais através da membrana é proporcional a concentração ou diferença de potencial químico e depende da diferença de concentração e independe da

pressão aplicada ao sistema, o qual pode ser representado pela seguinte Equação [Taylor & Jacobs, 1996].

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

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

Onde: J_s = taxa de fluxo de sal ($\text{g}/\text{cm}^2 \text{ min}$).

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 = média da concentração de sais (mg/L).

C_a = concentração da alimentação (mg/L).

C_p = concentração do permeado (mg/L).

C_c = concentração do concentrado (mg/L).

2.4 - PRESSÃO OSMÓTICA

A pressão osmótica é função da concentração de sais e do tipo das moléculas orgânicas contidas na água de alimentação. Quanto maior for a concentração da solução, maior será o valor da pressão osmótica dessa solução [Brandt et al, 1993].

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

Onde: π = pressão osmótica da solução iônica (kgf/cm^2).

v = nº de íons formados na dissociação do soluto.

c = concentração molar do soluto (mol/L).

R = constante dos gases ($\text{kgf L} / \text{cm}^2 \text{ mol K}$).

T = temperatura (K).

2.5 - 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].

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

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 - RECUPERAÇÃO

A recuperação do sistema refere-se à razão da água de alimentação convertida em água purificada 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 dado pela seguinte expressão:

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

Onde: R = nível de recuperação do sistema (%).

Q_p = vazão do permeado (cm³/min).

Q_a = vazão de alimentação (cm³/min).

Q_c = vazão do concentrado (cm³/min).

A recuperação máxima em qualquer instalação de osmose inversa, depende dos sais presentes na água de alimentação. Com o aumento do nível de recuperação do sistema, mais água bruta é convertida em produto. Isto reduz o volume da água a ser rejeitada e, conseqüentemente, aumenta o valor da concentração de sais dissolvidos na corrente de rejeito, assim como à possibilidade de sua precipitação na superfície da membrana [Dow Latin America, 1996]

2.7 – CONSUMO DE ENERGIA

A energia consumida no processo de dessalinização é um dos parâmetros mais importante que dita e mostra a escolha de um método de dessalinização, com base no custo final da água dessalinizada (Darwish et al, 1997).

O consumo de energia atribuído ao sistema de osmose inversa é função da pressão de alimentação, eficiência de recuperação, da bomba e do motor elétrico [Taylor & Jacobs, 1996].

$$E = \frac{(H)(0,00315)}{\eta_r \eta_b \eta_m} \quad (2.9)$$

Onde: E = consumo de energia (kWh/m³).

H = altura do nível da coluna de alimentação (m).

(0,00315) = fator de conversão de energia para plantas de osmose inversa.

η_r = eficiência de recuperação do sistema de dessalinização (%).

η_b = eficiência da bomba (%).

η_m = eficiência do motor (%).

O consumo de energia calculado a partir da Equação 2.9, corresponde somente à energia gasta no processo de osmose inversa, não inclui a energia necessária à circulação da água.

2.8 - BALANÇO DE MASSA PARA O SISTEMA DE OSMOSE INVERSA

O sistema de osmose inversa é composto de três permeadores em série, conforme mostra a Figura 2.3.

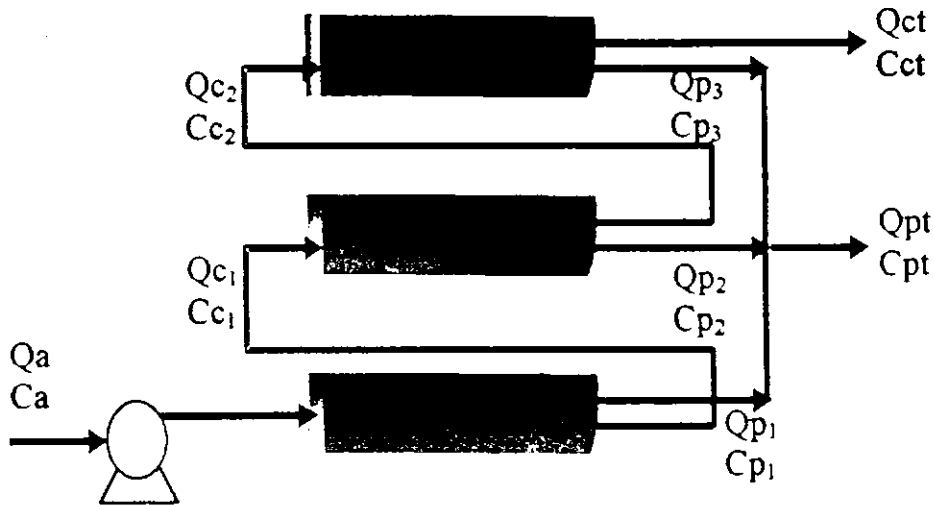


Figura 2.3- Sistema de osmose inversa constituído de três permeadores em série

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

Balanço parcial do sistema

$$Q_a C_a = Q_{p1} C_{p1} + Q_{c1} C_{c1} \quad (2.10)$$

$$\text{Onde: } Q_{p1} = Q_{p1} + Q_{p2} + Q_{p3} \quad (2.10.1)$$

$$Q_{c1} = Q_{c3} \quad (2.10.2)$$

Balanço parcial para o 1º permeador

$$Q_a C_a = Q_{p1} C_{p1} + Q_{c1} C_{c1} \quad (2.11)$$

Balanço parcial para o 2º permeador

$$Q_{c1} C_{c1} = Q_{p2} C_{p2} + Q_{c2} C_{c2} \quad (2.12)$$

Balanço parcial para o 3º permeador

$$Q_{c2} C_{c2} = Q_{p3} C_{p3} + Q_{c3} C_{c3} \quad (2.13)$$

Balanço parcial para o 3º permeador

$$Q_{c_2}C_{c_2} = Q_{p_3}C_{p_3} + Q_{c_3}C_{c_3} \quad (2.13)$$

$$\text{Onde: } Q_{c_3}C_{c_3} = Q_{c_1}C_{c_1} \quad (2.13.1)$$

O nível de recuperação total do sistema pode ser definido de acordo com a seguinte expressão:

$$R = \frac{Q_{p_1}}{Q_a} = \frac{Q_{p_1}}{Q_{p_1} + Q_{c_1}} \quad (2.14)$$

A partir dos resultados obtidos das vazões de cada permeador nas Equações (2.11), (2.12) e (2.13), pode-se determinar a taxa de recuperação para cada permeador

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

$$R_1 = \frac{Q_{p_1}}{Q_a} = \frac{Q_{p_1}}{Q_{p_1} + Q_{c_1}} \quad (2.15)$$

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

$$R_2 = \frac{Q_{p_2}}{Q_{c_1}} = \frac{Q_{p_2}}{Q_{p_2} + (Q_{p_3} + Q_{c_1})} \quad (2.16)$$

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

$$R_3 = \frac{Q_{p_3}}{Q_{c_2}} = \frac{Q_{p_3}}{Q_{p_3} + Q_{c_1}} \quad (2.17)$$

2.9 - MEMBRANAS POLÍMERICAS

Segundo Brandt et al, (1993) os principais critérios utilizados na seleção das membranas são:

1. boa seletividade e compatibilidade;
2. alta taxa de fluxo de água e de rejeição de sais;

3. boa tolerância a cloro e a outros agentes oxidantes;
4. resistência a fouling por materiais em suspensão e coloides;
5. baixo custo;
6. resistência aos ataques biológicos;
7. resistência mecânica;
8. estabilidade química;
9. resistência a altas temperaturas.

A estrutura da membrana é muito importante para a compreensão da separação e mecanismo de permeação de passagem de pequenas moléculas através da mesma. Em função das aplicações a que se destinam, as membranas apresentam diferentes estruturas. De um modo geral as membranas podem ser classificadas em duas grandes categorias: densas e porosas [Nishimura & Koyama, 1992].

Em processos nos quais utilizam membranas densas, como é o caso da osmose inversa, a capacidade seletiva depende da afinidade das diferentes espécies com o material da membrana e da difusão das mesmas através do filme polimérico. Neste caso, mais do que o tamanho da molécula, a natureza química e a estrutura do polímero que compõe a membrana são de fundamental importância. O fluxo do permeado obtido da dessalinização da água é sempre de natureza difusiva, independente do tipo de força motriz aplicada, uma vez que a membrana não apresenta poros na interface com a solução a ser processada [Harbert, Borges & Nobrega, 1997].

As membranas densas são classificadas em simétricas, assimétricas e de película fina composta. As membranas densas simétricas não apresentam nenhum interesse do ponto de vista comercial. São filmes poliméricos de espessura relativamente elevada e, por esse motivo, apresentam um fluxo do permeado muito baixo, fora da faixa de interesse comercial [Mulder, 1991].

As membranas densas assimétricas foram desenvolvidas com o objetivo de contornar o grande inconveniente apresentado pelas membranas densas simétricas que era o baixo fluxo do permeado [Harbert, Borges & Nobrega, 1997]. As membranas assimétricas consistem de uma película fina de alta densidade e um substrato poroso do mesmo polímero, que oferecem um suporte e apresentam uma composição química idêntica. A película fina superficial possui a capacidade de rejeitar os sais dissolvidos da solução durante a dessalinização da água, enquanto que o substrato poroso tem o

objetivo de oferecer a resistência física a membrana, tornando-se assim inerte ao desenvolvimento do fluxo do permeado.

As membranas de películas fina compostas, apresentam as mesmas características das membranas assimétricas, mas são formadas de materiais diferentes. Estes tipos de membranas oferecem melhores condições de controle para se atingir maiores valores para o permeado. O filme que funciona como suporte, possui maior porosidade e resistência a compactação [Dow Latin Química, 1996].

As membranas de acetato de celulose pertencem ao grupo de membranas assimétricas. As vantagens do uso deste tipo de membranas são: baixo custo de produção e resistência ao ataque por cloro; porém apresentam algumas desvantagens como: ocorrência de hidrólise proveniente da ação de ácidos e álcalis, biodegradação, baixas taxas de rejeição de sais, problemas decorrentes da compactação da membrana, baixo fluxo do permeado, o qual requer elevadas pressões de operação, estreita faixa de tolerância com relação a pH (5 a 8) e aos limites de temperatura de operação (0 a 35°C). Apesar das membranas de acetato de celulose serem ainda viáveis para muitas aplicações devido a seu baixo custo, os novos materiais que pertencem a uma família de polímeros de poliamida apresentam diversas vantagens em relação as membranas de acetato de celulose. Dentre elas destacam-se as seguintes: taxas superiores de rejeição de sais, taxa superiores de rejeições a moléculas orgânicas, não são biodegradáveis, baixa taxa de compactação, limites de temperatura de operação superior (0 a 45°C) e elevada taxa de rejeição de sílica (98%). Porém, o problema do ataque do cloro à estrutura da membrana ainda é um fator importante, o que exige a sua total remoção da água de alimentação [Dow Latin Química, 1997].

De uma maneira geral pode se afirmar que, tanto sob forma de película fina composta como sob forma assimétrica, as membranas de poliamida aromática possuem a melhor combinação de produtividade, desempenho e durabilidade no campo das membranas de osmose inversa.

2.10 - MÓDULOS COMERCIAIS

Geralmente as membranas são combinadas em módulos. O módulo é uma unidade prática que contém uma série de membranas mais um suporte poroso. A escolha

do módulo da membrana depende do tipo de aplicação e dos componentes que se deseja separar no processo. Os módulos de osmose inversa são disponíveis em quatro configurações: modelo tubular, modelo plano em quadro, modelo de fibra oca e modelo em espiral. Cada módulo pode ser conectado em série ou em paralelo [Coulson, Richardson, 1991].

Os modelos de fibra oca e espiral são os mais utilizados na dessalinização de águas salobras e do mar. Já os modelos plano em quadro e tubular são mais utilizados em líquidos com alta viscosidade e com altos níveis de sólidos suspensos como por exemplo: na produção de alimentos, bebidas, indústria farmacêutica e águas residuais [Scott, 1997].

O modelo em espiral é constituído por um envoltório de membrana em torno de um espaçador. Este conjunto é ligado a um tubo perfurado, localizado numa das extremidades do envoltório da membrana. Toda a estrutura do envoltório da membrana é enrolada em torno do tubo, sendo o conjunto inserido em um vaso de pressão cilíndrica. O fluido escoia sobre a membrana, enquanto o permeado flui para um sistema coletor por intermédio de um tubo externo [Mulder, 1991], conforme mostra a Figura 2.4.

Os espaçadores mantêm as membranas separadas promovendo um caminho de fluxo que provoca turbulência, diminuindo assim problemas de incrustações. [Sudak, 1990].



Figura 2.4- Elemento de membrana em espiral para o processo de osmose inversa

Atualmente, os modelos de configurações geométricas mais utilizados são: o do elemento enrolado em espiral e o de fibra oca, por possuírem a melhor relação de área superficial do filme da membrana por unidade de volume ocupada pelo módulo. Estes

modelos possuem custos de fabricação mais baixos e ainda possuem taxas de fluxo do permeado mais elevadas [Habert, Borges & Nobrega, 1997].

2.11 - CONCENTRAÇÃO DE POLARIZAÇÃO

Durante o processo de osmose inversa, o soluto e outras espécies presentes na solução de alimentação são transportadas do seio da solução em direção a superfície da membrana através do fluxo convectivo a uma velocidade equivalente a velocidade de permeação do solvente. Em função da natureza da membrana semipermeável, o soluto presente na solução de alimentação tende a ficar retido na interface da membrana. 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, $-D \left(\frac{d^2C}{dx^2} \right)$ e fluxo convectivo do soluto na direção da membrana (JC), a concentração de sais na superfície da membrana (Cs) deverá ser superior a concentração de sais no seio da solução (Cb), conforme mostra a Figura 2.5.

Considerando que as membranas sempre apresentam imperfeições e que não existe a presença de "fouling" na membrana/ interface alimentação, pode ocorrer uma difusão do soluto através da barreira semipermeável da membrana. No estado estacionário o transporte convectivo do soluto para membrana será equivalente ao transporte difusivo do soluto no sentido contrario, incluindo o que passa através da membrana (JCp). A partir das condições de contorno dada na Figura 2.5, o balanço de massa pode ser representado pela seguinte Equação [Taylor & Jacobs, 1996].

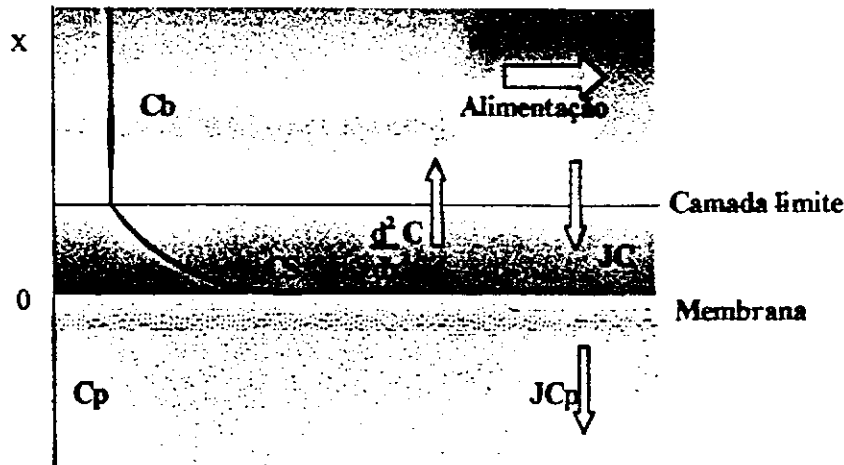


Figura 2.5- Condições da camada limite na membrana/ interface

$$JC - \left(-D \frac{d^2C}{dx^2} \right) = JC_p \quad (2.15)$$

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

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

Integrando a Equação (2.15) e aplicando as condições limites, obtém-se:

$$\ln \frac{C_s - C_p}{C_b - C_p} = \frac{J\delta}{D} \quad (2.16)$$

e que também pode ser escrita como:

$$\frac{C_s - C_p}{C_b - C_p} = \exp \left[\frac{J\delta}{D} \right] \quad (2.17)$$

O coeficiente de transferência de massa K_s é definida 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 indica relativamente baixa concentração de polarização.

$$K_s = \frac{D}{\delta} \quad (2.18)$$

A rejeição do soluto na membrana pode ser expresso como:

$$TRS = \left(\frac{C_s - C_p}{C_s} \right) = \left(1 - \frac{C_p}{C_s} \right) \quad (2.19)$$

Substituindo as Equações (2.18) e (2.19) na Equação (2.17) obtém-se a expressão para a razão da concentração de polarização que é definida como [Taylor & Jacobs, 1996]:

$$\frac{C_s}{C_b} = \frac{\exp(J, K_i)}{TRS + (1 - TRS)\exp(J, K_i)} = \beta \quad (2.20)$$

O valor máximo permitido para o coeficiente de concentração de polarização, utilizando membranas da Fluid Systems é $\beta = 1.13$. Caso β exceda esse alor a probabilidade de surgir fouling e scaling na superfície da membrana aumenta. (Fluid System, 1997)

2.12 – INCRUSTAÇÕES (fouling e scaling)

Uma das maiores preocupações no processo de osmose inversa são os materiais que se depositam na superfície da membrana, devido a presença de substâncias de natureza inorgânicas e orgânicas, denominadas de “fouling” e “scaling” [Bennet et al, 1996].

O “fouling” pode ser definido como um conjunto de fenômenos, capaz de provocar uma queda no fluxo do permeado e /ou o aumento da passagem de sais com o tempo, quando se trabalha com uma solução ou suspensão. A extensão do fenômeno do “fouling” depende da natureza da solução problema como também, e de maneira acentuada, das condições de operação do sistema de membrana [Harbert, Borges & Nobrega, 1997]. Os “foulings” são geralmente depósitos de natureza orgânica em natureza e são formados por materiais em suspensão. Estes incluem argila, lodo, coloides, óxidos de ferro, manganês e alumínio, além de sílica, bactérias e outras espécies biológicas [Brandt et al, 1993].

As causas do “fouling” incluem: concentração de polarização, formação de uma camada de gel na superfície do filme da membrana, obstrução dos poros da membrana por materiais em suspensão, fouling biológico e degradação da própria membrana [Jawad et al, 1997].

Um dos meios de controle do “fouling” é portanto, o cuidado na escolha do tipo de membrana, no projeto do módulo, com também do processo de pré-tratamento para água de alimentação [Frank, 1998].

Os “scaling” são considerados depósitos minerais, insolúveis nas condições de pH e temperatura, que se precipitam na superfície da membrana. Estes incluem sais como; carbonato de cálcio, sulfato de cálcio, carbonato de magnésio, sulfato de bário, sulfato de estrôncio [Bennet et al, 1996]. A precipitação desses sais dissolvidos é decorrente do fato de que tais sais, encontram-se em concentrações superiores ao limite de solubilidade na solução para as condições consideradas [Dow Latin Química, 1996]. A solubilidade desses sais depende da temperatura e do pH. Alta temperatura e alto pH facilitam a precipitação de carbonatos e sulfatos [Wilbert, 1993].

2.13 - PRÉ-TRATAMENTO

A utilização de um sistema de pré-tratamento em um processo de osmose inversa tem como objetivo reduzir o potencial de fouling na água de alimentação, devido a remoção de partículas micropoluentes e microrganismos, bem como a prevenção da formação de scale inorgânico, melhorando assim a qualidade da água de alimentação para um nível que resultará numa maior segurança de operação para os sistemas de osmose inversa [Dudley & Darton, 1997].

Um pré-tratamento ideal é projetado para causar um mínimo ou nenhum fouling nas membranas a um menor custo possível. Isto não só resulta em um aumento na taxa de produção de água potável, como também na diminuição da passagem de sais e um aumento da vida útil da membrana [Alawadhi, 1997]. Os fatores que devem ser levados em considerações quando o sistema necessita de um pré-tratamento são: [Taylor & Jacobs, 1996]

1. material no qual é construída a membrana;
2. configurações do módulo;
3. qualidade da água de alimentação;
4. taxa de recuperação;
5. qualidade final da água do permeado

O tipo de pré-tratamento a ser utilizado, irá depender da qualidade da água de alimentação. A qualidade da água de alimentação é definida em termos de concentração de partículas suspensas e níveis de saturação de sais solúveis dispersos no meio. Alguns dos mais conhecidos compostos de sais solúveis são; sulfato de cálcio, fosfato de cálcio, fluoreto de cálcio, sulfato de bário, sulfato de estrôncio, sílica. Os indicadores de partículas suspensas, usados na indústria da osmose inversa são a turbidez e o índice de densidade de sedimentos (SDI) [Sudak, 1990]. Os limites máximos são; turbidez de 1,0 NTU e SDI de 4,0. A operação contínua de um sistema de osmose inversa com água de alimentação, cujo os valores de turbidez ou SDI são próximos destes limites, podem resultar num significativo entupimento nas membranas (fouling). Em sistemas de osmose inversa que trabalham durante longos períodos, a média dos valores da turbidez e SDI na água de alimentação não deve exceder 0,5 NTU e 2,5 unidades de SDI, respectivamente [Hydranautics, 1998].

Os indicadores dos níveis de saturação dos sais solúveis, na corrente do concentrado são o Índice de Saturação de Langelier (LSI) e razões de saturação. O LSI fornece o grau de saturação por carbonato de cálcio. Valores negativos de LSI indicam que a água é agressiva e que terá a tendência de dissolver o carbonato de cálcio. Valores positivos de LSI indicam a possibilidade de precipitação de carbonato de cálcio. O LSI foi desenvolvido originalmente por Langelier para água potável de baixa salinidade. Para águas de alta salinidade encontradas nas aplicações de osmose inversa, o LSI é apenas um indicador aproximado. A razão de saturação é a razão entre a concentração de ions da corrente do concentrado e a solubilidade teórica dos sais para uma dada condição de temperatura e potencial iônico [Dudley & Darton, 1997]. Estas razões são aplicadas principalmente para sulfatos solúveis de cálcio, bário e estrôncio. Sílica também pode ser um constituinte em potencial de formação de incrustações nas membranas (scaling). Outros potenciais de incrustações estão presentes na água de alimentação na forma de fluoreto de cálcio ou fosfato.

Dependendo da qualidade da água bruta, o processo de pré-tratamento pode consistir de todas ou algumas das seguintes etapas [Hydranautics, 1998]:

1. remoção de grandes partículas usando filtros;
2. desinfecção da água com cloro;
3. clarificação com ou sem floculação;

4. clarificação e redução de dureza usando tratamento de CaO;
5. filtração (filtros multi-meios);
6. redução da alcalinidade por ajustamento do pH;
7. adição de inibidor de “scaling”;
8. redução de cloro livre usando bisulfato de sódio ou filtro de carvão ativado;
9. esterilização da água usando radiação ultra-violeta;
10. remoção final de partículas suspensas usando cartuchos de filtros.

As peneiras de malhas ou telas são usadas na remoção inicial de grandes partículas na água de alimentação. As peneiras são usadas em sistemas para águas de poços tubulares, para remover grãos de areias que podem vir na água durante o bombeamento. As telas são “peneiras” de porosidade mais fechadas, normalmente são usadas para fontes de águas superficiais, as quais contêm grandes concentrações de detritos biológicos. É comum desinfetar água de alimentação superficial com o objetivo de controlar a atividade biológica.

2.13.1 - SISTEMA DE 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 contendo sulfeto de hidrogênio não deve ser clorada ou exposta ao ar. Na presença de oxidante o ion sulfeto pode oxidar para enxofre elementar que eventualmente pode aderir aos elementos de membranas. Sabe-se que os agentes oxidantes são componentes que degradam as membranas, diminuindo o seu desempenho [Hydranautics, 1998]. 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]

2.13.2 - SISTEMA DE PRÉ-TRATAMENTO PARA ÁGUA SUPERFICIAL

Água superficial, pode conter vários níveis de concentração de partículas suspensas de origem inorgânica ou biológica. Normalmente a água superficial necessita de desinfecção, controle da atividade biológica e remoção de partículas suspensas por sistemas de filtros de multi-meios (filtros de areia). Para esses casos, o processo de filtração também pode ser acompanhado por outros tipos de tratamento, no sentido de aumentar a sua eficiência por flocculantes e polímeros orgânicos.

A decantação de água superficial em um tanque de armazenamento, resulta na redução de algumas partículas suspensas. A adição de flocculantes na forma de sais de ferro ou alumínio, resulta na formação dos hidróxidos correspondentes; estes hidróxidos neutralizam as cargas superficiais de partículas coloidais, agregadas e absorvidas as partículas flocculadas antes da decantação. O uso do óxido de cálcio resulta no aumento do pH na formação de partículas de carbonato de cálcio e hidróxido de magnésio. A clarificação através de óxido de cálcio, favorece a redução da dureza e alcalinidade.

Algumas águas superficiais podem conter altos índices de substâncias orgânicas, as quais podem ser removidas, com auxílio de filtros de carvão ativado. Dependendo da composição da água é necessário a acidificação e adição de inibidores antes do processo de osmose inversa [Hydranautics, 1998].

Em sistemas de osmose inversa os filtros de cartuchos (de celulose com resina melamínica) são usados para bombas de alta pressão, os quais tem o papel de formar uma barreira para as partículas suspensas na água. A taxa de permeação comumente aplicada na osmose inversa é na faixa de 5 a 15 microns. Dependendo da qualidade da água a ser tratada existe a necessidade de usar filtros de 1 micron.

Além desses tipos de pré-tratamento, têm-se introduzido outros para sistemas de osmose inversa. Módulos de membranas de microfiltração e ou ultrafiltração vêm sendo aplicados com bastante segurança. Além de apresentar alta taxa de recuperação operam a baixa pressão na alimentação. Esses tipos de sistema oferecem águas de melhor qualidade do que os sistemas de filtros convencionais [Hydranautics, 1998].

2.14- PÓS-TRATAMENTO

O processo utilizando membranas, remove essencialmente todos os microrganismos, dentre elas os patogênicos e a maioria dos sais e outros solutos presentes na água de alimentação. Porém todos os gases dissolvidos, incluindo dióxido de carbono e hidrogênio sulfídrico passam através da membrana. Com a finalidade de remover esses gases do permeado, o processo de osmose inversa necessita de algum tipo de pós-tratamento antes de ser utilizado para 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 sequência dessas unidades operacionais são funções do projeto e da qualidade da água.

2.14.1 - ESTABILIZAÇÃO

O propósito da estabilização é produzir um permeado que não seja corrosivo e que tenha um pH entre 6.5 a 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 métodos são geralmente usados para realizar a estabilização. São eles:

1. descarbonização ou degasificação para remover dióxido de carbono no qual irá aumentar o pH. Este tratamento também irá remover o gás hidrogênio sulfídrico se presente,
2. adição de produtos químicos tais como cal, carbonato de cálcio ou soda cáustica para aumentar a alcalinidade que além disso aumenta o pH,
3. mistura do permeado com uma certa quantidade da água de alimentação, para aumentar a alcalinidade e a quantidade de cálcio na água final.

Quando a soda cáustica é usada em uma parte do processo de estabilização, é essencial também adicionar a água, inibidores de corrosão que irão proteger os materiais do sistema de distribuição.

O pH do produto antes da estabilização irá depender de uma quantidade de adição química. Geralmente, os custos dos produtos químicos podem ser minimizados usando o degasificador para reduzir a concentração do dióxido de carbono até um valor o mais baixo possível e então dosar suficientemente com cal ou outros produtos químicos para ajustar o pH a um valor entre 6,5-8,5.

A mistura do permeado com a água de alimentação também pode estabilizar o produto final. Este tipo de estabilização da água produzida, deve ser considerada quando a água de alimentação apresenta baixa concentração de material orgânico [Beardsley & Minnesota, 1998].

2.14.2 - DESINFECCÃO

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

Os dois procedimentos mais usados na desinfecção são: a Radiação ultra violeta (UV) para aplicações industriais e a cloração, para águas de abastecimentos municipais [Dupont, 1996].

2.14.2.1 - Radiação ultra violeta

O efeito desinfetante da luz ultra violeta é associado com sua absorção pelos compostos orgânicos (DNA) presentes nos organismos vivos, resultando na quebra das ligações químicas, provocando a morte bioquímica.

A origem mais comum da luz ultra violeta (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 (virus, bactérias, protozoários, fungos, leveduras).

As principais vantagens da desinfecção por raios ultra violeta é que, não se adiciona a água compostos químicos, portanto, suas características físico- químicas não se alteram, o período de contato ou tempo de exposição é pequeno e a superdosagem não possui efeito nocivo. Por estas razões o tratamento UV para água produzida (permeado) em um sistema de osmose inversa tem sido bastante utilizada em aplicações industriais e particularmente em industria eletrônica [Rossin,1987].

A principal desvantagem da ultra violeta 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].

2.14.2.2 - Cloração

Nas aplicações para as águas de abastecimento, o produto da osmose inversa é geralmente desinfectado por adição de cloro. Em grandes sistemas, o gás cloro (Cl_2) é adicionado a água e em pequenos sistemas, geralmente injeta-se soluções aquosas de hipoclorito de sódio (NaOCl) [Beardsley & Minesota, 1998].

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



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



O ácido hipocloroso formado é fracamente dissociado em pH abaixo de 6,0. O pH das águas de abastecimento, normalmente se encontra na faixa em que há existência tanto de ácido hipocloroso como de íon hipoclorito. A eficiência da desinfecção por cloro é função da concentração de cloro, tempo, pH ou a temperatura da água que aumenta a eficiência da desinfecção [Rossin, 1987].

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 necessário para desinfecção pode ser menor comparado com a que é requerida para a desinfecção da água de poço. Além disso, a baixa concentração de orgânicos minimizam ou eliminam a formação de triclometanos e outros compostos orgânicos clorados [Dupont, 1996].

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 [Dupont, 1996].

Assim sendo, toda água distribuída deverá ser desinfetada e apresentar residual do desinfetante nos pontos de consumo. Logicamente, a concentração residual irá depender da qualidade da água in natura e/ou tratada do sistema de distribuição. Com residual desinfetante nos vários pontos do sistema de abastecimento tem-se condições de destruir pequenas concentrações de microrganismos que porventura venham a penetrar na rede de distribuição [Rossin, 1987].

2.15 - LIMPEZA DAS MEMBRANAS

O sistema de limpeza química é tão importante quanto o pré-tratamento da água de alimentação e destina-se a prolongar a vida útil das membranas e suas características operacionais. A frequência e o tipo de limpeza dependem da qualidade da água de alimentação [Taylor & Jacobs, 1996].

As membranas devem ser limpas, sempre que qualquer parâmetro operacional se altere de 10 a 15% em relação as condições originais do projeto. Se o fluxo do permeado decair, a qualidade do produto final diminuir, então é necessário aumentar a pressão aplicada ao sistema para tentar manter a mesma produtividade inicial. Quando isto acontece, ocorre a necessidade de se proceder a lavagem química [Wilbert, 1993].

Antes de iniciar a lavagem química das membranas, é realizado a lavagem do sistema com água desmineralizada, com a finalidade de eliminar a água salobra remanescente após a dessalinização, que se encontra presente no interior dos permeadores.

Durante a limpeza química é importante o controle do pH e da temperatura da solução que passa pelas membranas. A limpeza química será concluída assim que a água que retorna ao tanque não sofra nenhuma variação significativa de pH [Dow Química, 1996].

Os produtos químicos utilizados para a lavagem das membranas podem ser solução 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 material 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 observado uma estabilização do pH dos efluentes.

Normalmente a frequência de lavagem química é de três meses de operação, podendo variar em função da concentração e natureza da água de alimentação [Dow Latin Química, 1996].

CAPÍTULO III

3.0 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo, trata da descrição dos materiais e equipamentos utilizados na parte experimental deste trabalho bem como a metodologia aplicada.

3.2 - MATERIAL UTILIZADO

3.2.1 - PRODUTOS QUÍMICOS E INDICADORES

- Cloreto de sódio P.A da Merck .
- Ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0,02 N.
- Hidróxido amônia (NH_4OH), pH = 10.
- Hidróxido de Potássio (KOH) a 10%.
- Murexida.
- Metiliorange 0,4 %.
- Fenolftaleína.
- Cromato de potássio a 5 %.
- Eriocromo.
- Ácido etileno diamino tetracético ($EDTA$) 0,025 N.
- Nitrato de prata ($Ag NO_3$) 0,05 N.

3.2.2 - ÁGUA PARA ESTUDO

- Solução salina preparada com cloreto de sódio e água destilada
- Água salobra proveniente de poço tubular

O sistema foi testado para soluções de cloreto de sódio de concentrações que variaram de 1022 a 3938 mg/L e também para águas salobras de 1075 e 2240 mg/L, provenientes de poços tubulares situados no Município de Queimadas e no Município de Caturité, ambos no Estado da Paraíba- PB.

3.3 - SISTEMA DE OSMOSE INVERSA

O sistema de dessalinização é constituído de uma unidade de osmose inversa, sistema hidráulico e instrumentos de medidas e registros de dados, conforme mostra a Figura 3.1.

3.3.1 - UNIDADE DE OSMOSE INVERSA

A unidade de osmose inversa é constituída de três permeadores (ou vasos de alta pressão) em série com pressão máxima de operação de até 70,3 kgf/cm², modelo 2.5 S Sea Water. Os permeadores operam com três tipos de membranas de poliamida aromática com 6,35 cm de diâmetro por 35,56 cm de comprimento, adquiridas da Fluid Systems Corporation para osmose inversa, assim como segue:

- Membrana de alta filtração (HF)
- Membrana de ultra baixa 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.

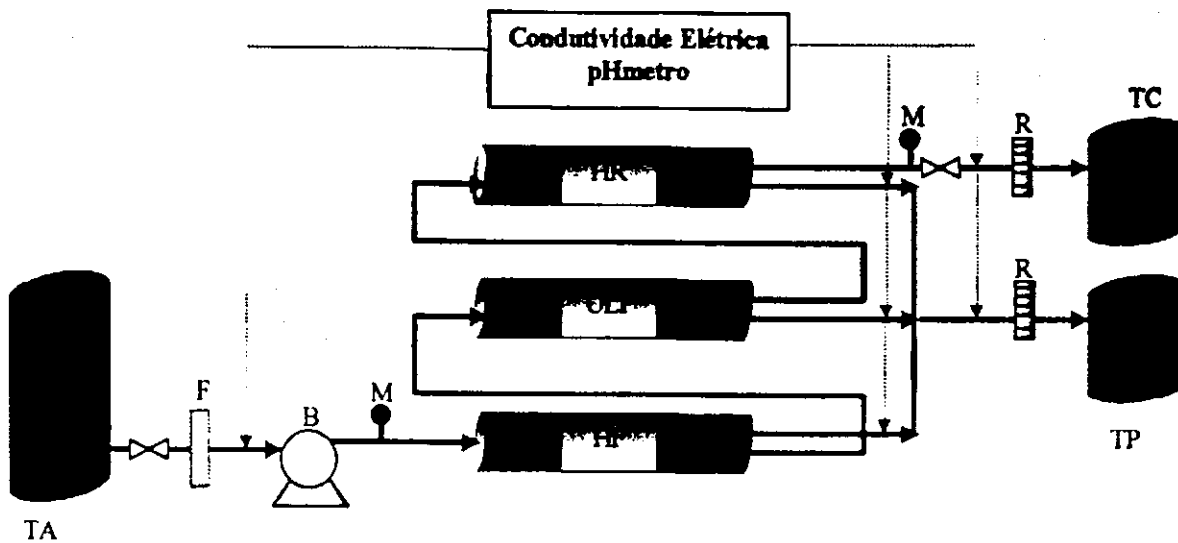


Figura 3.1: Sistema de osmose inversa composto das seguintes unidades: TA- tanque de alimentação (NaCl ou água salobra), TP- tanque do permeado, TC- tanque do concentrado, F- filtro, B- bomba centrífuga, M- manômetros, R- rotâmetros, HF- membrana de alta filtração, ULP- membrana de ultra baixa pressão, HR- membrana de alta rejeição.

3.3.2 - SISTEMA HIDRÁULICO

O sistema é constituído por uma bomba centrífuga de 1/4 CV, modelo B480596 da Procon, conectada a um tanque de alimentação com capacidade volumétrica de 50 litros onde se encontra a solução problema (solução de NaCl ou água salobra). Dois tanques de capacidades volumétricas um de 50 litros e outro de 20 litros usados para armazenar o concentrado e o permeado durante o processo. Um filtro de acetato de celulose de resina melaminica de 5 micra, conectado antes dos vasos de alta pressão e utilizado para prevenir incrustações nas membranas, por meio de partículas de alto peso molecular. Tubos e conexões em PVC de 1/2" (1/2 polegada), duas válvulas de retenção tipo esfera da Deca de 1/2", conexões de bronze de 1/2" e mangueiras plásticas.

3.3.3 - UNIDADE DE REGISTRO

Foram utilizadas seis unidades de registro, conforme pode ser observado na Tabela 3.1, onde foi possível obter a leitura da condutividade elétrica, potencial hidrogeniônico, pressão de entrada e saída do sistema de dessalinização e vazões do permeado e concentrado.

Tabela 3.1- Unidades de registro do sistema

Unidade	Tipo	Modelo	Fabricante
1	Condutímetro	CD-21	Digimed
2	pHmetro	DMPH-2	Digimed
3	Rotâmetro	CF40250	Blue Write Ind.
4	Rotâmetro	LF2005	Blue Write Ind.
5	Manômetro	-	Record
6	Manômetro	-	Record

Foram coletadas amostras da solução de alimentação, permeado e concentrado com a finalidade de medir a variação da concentração de sais e a variação hidrogeniônica durante o processo.

Também foram utilizados dois rotâmetros com a finalidade de registrar o fluxo volumétrico do permeado e concentrado durante o processo de dessalinização e um par de manômetros com capacidade máxima de 14 kgf/cm², conectados um na entrada da unidade de osmose inversa e outro na saída do permeador onde, se encontra o fluxo do concentrado.

3.4- CARACTERÍSTICAS E COMPOSIÇÃO DAS MEMBRANAS UTILIZADAS

1) Fluid Systems- 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 Systems- TFC®ULP

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 Systems- 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.

3.5 - CALIBRAÇÃO DAS UNIDADES DE MEDIDAS

3.5.1 - pHMETRO E CONDUTÍMETRO

Para calibração do condutivímetro foi utilizada uma solução padrão de 1,412 μ S/cm a 25°C da Digimed, Instrumentação Analítica. O pHmetro foi ajustado com

soluções tampão de pH=4,0 e pH=6,86 a 25°C também da digimed, Instrumentação Analítica.

3.5.2- CONVERSÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA PARA CONCENTRAÇÃO

Com o objetivo de determinar as concentrações de soluções de cloreto de sódio a partir do valor obtido da condutividade elétrica em mS/cm lidos no condutivímetro, foram preparadas diversas soluções com concentrações conhecidas (20 a 10000 mg/L). As medições das condutividades foram ajustadas com o auxílio de um programa "Grapher" versão 1.28 da Golden Software, com o objetivo de se obter uma Equação definida para cada faixa de concentração, conforme mostram as Equações 3.1 e 3.2. A partir da relação 1g/L (1000 ppm), determinaram-se duas curvas de calibração; uma para valores de concentrações de 20 a 80 mg/L e a outra, para valores de concentrações de 100 a 10000 mg/L.

$$C = \frac{K - \alpha}{\sigma} \quad (3.1)$$

$$C = k \cdot \sigma \cdot \alpha \quad (3.2)$$

Onde,

K é a condutividade elétrica (mS/cm)

C é a concentração em ppm.

α e σ são parâmetros específicos do condutivímetro utilizado, como mostra a Tabela 3.2.

Tabela 3.2- Parâmetros de ajustes para as curvas de calibração dos condutivímetros a partir da equação 3.1 e 3.2.

Condutivímetros	α	σ
Digimed	-0,00173	0,00254
Digimed	453,4489	1,095

O coeficiente percentual de correlação para o ajuste de curva a partir da equação 3.1 foi de 99,1% e para a Equação 3.2 foi de 99,99%.

3.6 - METODOLOGIA

Antes de iniciar o processo de dessalinização via osmose inversa para águas salobras, foram realizados experimentos com soluções de cloreto de sódio, com concentrações de 1022 a 3940 mg/L, com a finalidade de observar o comportamento do sistema e a partir desta avaliação estudou o seu desempenho com amostras de águas salobras de poços tubulares nas melhores faixas de operações obtidas a partir da 1ª etapa.

Os processos de dessalinização, utilizando soluções de cloreto de sódio, e águas salobras, foram efetuados de forma contínua para um dado volume de solução. As bateladas foram realizadas mantendo-se as concentrações constantes e variando as pressões aplicadas no conjunto de membranas. Durante o processo foram tomadas amostras na saída do sistema das correntes do concentrado e permeado, bem como foram coletadas amostras da corrente do permeado para cada permeador. Para as amostras das correntes do concentrado/permeado, além da condutividade elétricas foram obtidos os potenciais hidrogeniônicos.

3.6.1 - PROCESSO DE DESSALINIZAÇÃO

Antes de iniciar-se o processo de dessalinização se fazem necessários os seguintes cuidados:

- 1- observar se as válvulas do sistema se encontram abertas;
- 2- coletar amostras da solução de alimentação e medir a temperatura, potencial hidrogeniônico e condutividade elétrica;
- 3- homogeneizar a solução recirculada pelo dessalinizador sem o efeito da pressão;
- 4- após 3 minutos coletar uma nova amostra para observar a condutividade elétrica;
- 5- em seguida ajustar a válvula do concentrado na saída do último elemento de membrana de acordo com a pressão pré- determinada em função da qualidade da solução de alimentação.

Os dados da condutividade elétrica e do potencial hidrogeniônico dos efluentes do permeado e do concentrado, foram obtidos em intervalos de 1 minuto entre cada leitura durante os 4 primeiros minutos. A partir deste instante, as tomadas foram realizadas em intervalos de 2 minutos. Em função do volume disponível da solução de alimentação (50 litros), as bateladas duraram aproximadamente 10 minutos. Algumas bateladas foram realizadas em espaços de tempo maiores, de aproximadamente 30 minutos, devido aos efluentes do permeado e do concentrado terem retornados simultaneamente ao tanque de alimentação.

Os valores da condutividade elétrica de cada experimento foram convertidos para concentração em mg/L, através das Equações 3.1 e 3.2 e expostas em gráficos como forma de condutividade elétrica (mS/cm), em função do tempo.

A capacidade de produção da água potável e concentrado do dessalinizador foram observadas através de dois rotômetros.

A recuperação do sistema foi determinado através dos fluxos volumétricos lidos nos rotômetros. Com o objetivo de determinar as recuperações de cada elemento de membrana foi necessário obter-se a vazão de cada um experimentalmente.

Com o auxílio dos manômetros foram lidos os valores da pressão de alimentação, como também da pressão de saída do concentrado e do permeador.

Para as bateladas com águas salobras, foi necessário adicionar antes da bomba de alimentação um filtro de acetato de celulose com resina melamínica de 5 micra por onde passa a solução antes de chegar ao vaso de alta pressão onde se encontra as membranas e, tem como objetivo de reter as partículas em suspensão da água salobra.

Para este tipo de batelada foi necessário realizar análise físico-química e bacteriológica da água de alimentação, bem como no final do processo, análises do permeado e concentrado.

As amostras destinadas às análises físico-químicas foram armazenadas em recipientes devidamente limpas e esterelizados de capacidade de 2 litros e analisadas no Laboratório de Dessalinização da Universidade Federal da Paraíba DEC/CCT/UFPB.

As análises bacteriológicas foram realizadas no Laboratório de Saneamento da Área de Engenharia Sanitária e Ambiental DEC/CCT/UFPB. As amostras foram coletadas em frascos de vidro, de cor âmbar de um litro de capacidade, estéreis (170°C-2 horas em estufa), de boca larga e protegidas com papel alumínio.

3.7 - LIMPEZA DAS MEMBRANAS

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

3.8 - O FLUXO DO PERMEADO

O fluxo do permeado do sistema foi obtido com o auxílio da Equação 2.1, que se encontra no item 2.2 do capítulo II.

3.9 - TAXA DE REJEIÇÃO DE SAIS

A variação da taxa de rejeição de sais durante o processo foi determinada a partir de amostras dos permeados obtidos da saída do permeadores, com o auxílio da Equação 2.7, que se encontra no item 2.5 do capítulo II.

3.10 - RECUPERAÇÃO DO SISTEMA

A recuperação do sistema durante os experimentos foi determinada com o auxílio da Equação 2.8, descrita no item 2.6 do capítulo II.

3.11 - CONSUMO DE ENERGIA

O consumo de energia foi obtido com o auxílio da Equação 2.9, que se encontra no item 2.7 do Capítulo II.

CAPÍTULO IV

4.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os dados experimentais da dessalinização de soluções de cloreto de sódio e de águas salobras provenientes de poços tubulares.

Esse estudo foi realizado conforme as séries de experimentos descritas abaixo:

Série I – Variação da condutividade elétrica

Série II- Estudo comparativo do sistema com águas salobras versus soluções de NaCl.

Série III- Desempenho de cada membrana durante o processo.

Série IV- Recuperação de cada elemento de membrana

Série V-. Desempenho do sistema com e sem reciclo do concentrado e permeado.

Série VI - Efeito da recuperação do sistema

Série VII- Parâmetros técnicos

Série VIII – Consumo de energia e custo.

Série IX- Análise físico-química

Série X-. Análise Bacteriológica.

4.1 - VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Nas Figuras 4.1 a 4.5 e as Tabelas 4.1 a 4.17, conforme mostra o Apêndice II, são apresentados os resultados referentes as bateladas da Série I que mostram a variação da condutividade elétrica durante o processo, para diferentes pressões.

Observando o comportamento das curvas da condutividade elétrica em função do tempo para as bateladas da Série I, percebe-se que estas foram similares, apresentando uma queda na condutividade elétrica muito rápida para os primeiros instantes ($t = 2$ minutos) e em seguida ficando praticamente constante durante todo o tempo de operação.

A curva apresenta o comportamento de uma função exponencial onde percebe-se, que a medida que a pressão de alimentação aumenta há uma queda considerável na condutividade elétrica do permeado. Tomando como exemplo a Figura 4.2, a qual apresenta as bateladas para pressões de alimentação de 2,4 a 8,4 kgf/cm², para uma

condutividade elétrica inicial de 3,0 mS/cm, observa-se que a variação da condutividade elétrica durante o processo varia mais rápido a medida que a pressão aumenta. Entretanto, em todos os casos, notou-se que os valores da condutividade elétrica do permeado, após os primeiros instantes ($\approx 2,0$ minutos), apresentaram valores muito próximos. Isso demonstra que os resultados obtidos podem oferecer condições de determinar a melhor faixa de escolha para a pressão de operação. Ou seja, a pressão passa a ser um parâmetro independente da condutividade elétrica da solução de cloreto de sódio, conforme pode-se observar para as pressões de alimentação entre 4,4 a 8,4 kgf/cm². Mas em termos de recuperação para cada batelada esse fato não ocorre, conforme mostra a Tabela 4.37 (Apêndice II). Para as pressões de 2,4 e 3,4 kgf/cm², apesar do comportamento ainda apresentar semelhança com as demais, ocorreu uma diferença notável nos valores da condutividade elétrica para os primeiros instantes. A variação da condutividade elétrica foi mais lenta comparada com os outros casos.

Para uma condutividade de 2,10 e 3,0 mS/cm, pode se perceber com mais clareza o efeito da pressão de alimentação sobre a variação da condutividade elétrica durante o processo, da mesma forma para a batelada referente a Figura 4.3.

Nota-se que o potencial iônico presente na solução (pressão osmótica), está diretamente relacionado com a recuperação do sistema. Esse fato foi observado para as condutividades elétricas das soluções de alimentação acima de 5,0 mS/cm onde a recuperação do sistema foi insignificante para pressões abaixo de 4 kgf/cm², conforme pode ser visto na Tabela 4.37. Portanto, para esses casos as pressões tiveram de ser superiores as pressões osmótica das soluções de NaCl a fim de apresentar uma produção significativa, conforme mostram as Figuras 4.4 e 4.5. Isso pode ser comprovado para a solução NaCl de condutividade de 4mS/cm, onde pode-se operar com pressão inferior a 4,0 kgf/cm², conforme mostra a Figura 4.3.

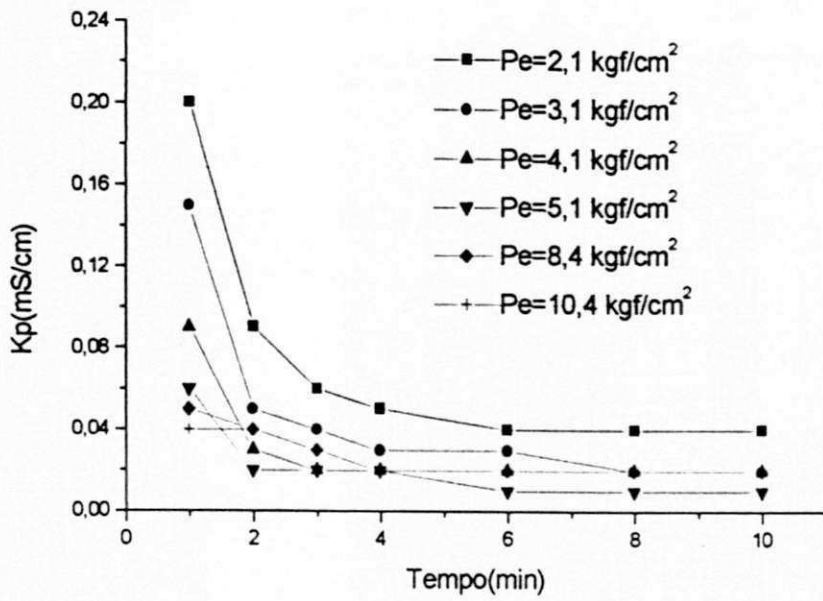


Figura 4.1 - Variação da condutividade elétrica de uma solução de NaCl ($K_i = 2,10$ mS/cm) em função do tempo para diferentes pressões de alimentação.

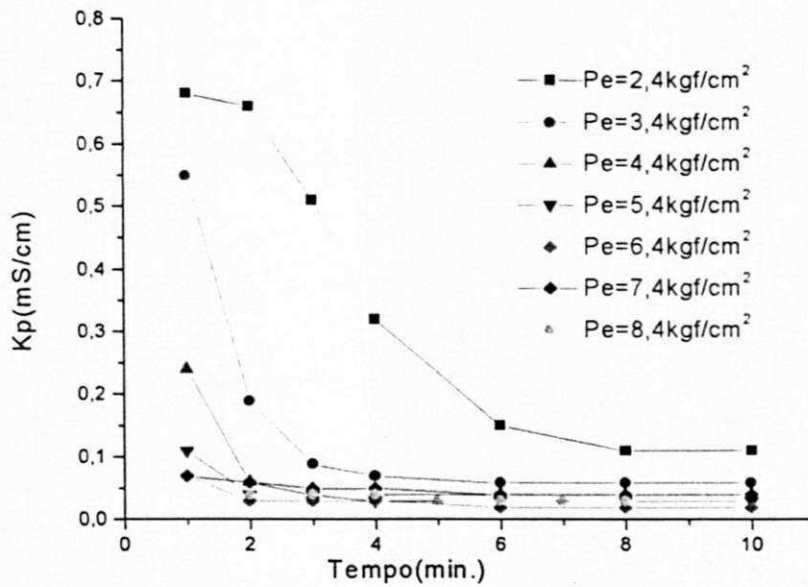


Figura 4.2 - Variação da condutividade elétrica de uma solução de NaCl ($K_i = 3,0$ mS/cm) em função do tempo para diferentes pressões de alimentação.

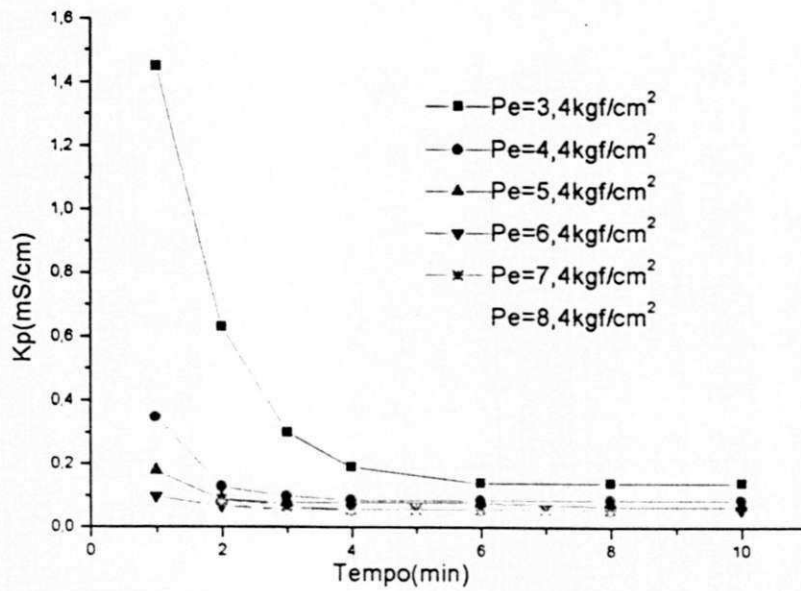


Figura 4.3 - Variação da condutividade elétrica de uma solução de NaCl ($K_i = 4,0$ mS/cm) em função do tempo para diferentes pressões de alimentação.

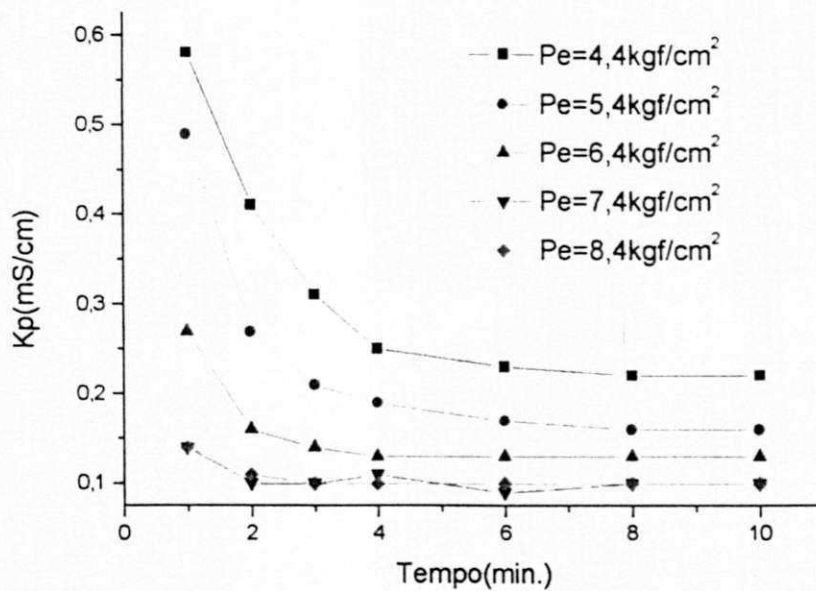


Figura 4.4 - Variação da condutividade elétrica de uma solução de NaCl ($K_i = 5,5$ mS/cm) em função do tempo para diferentes pressões de alimentação.

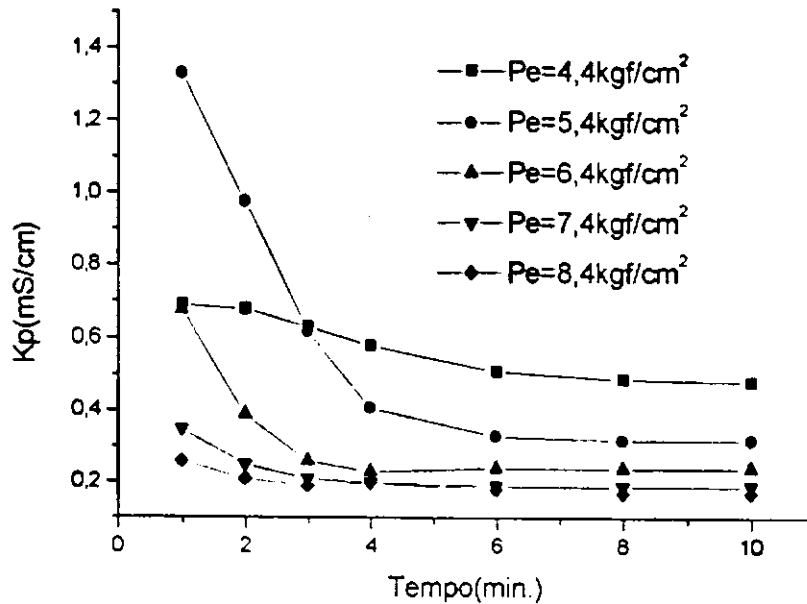


Figura 4.5 - Variação da condutividade elétrica de uma solução de NaCl ($K_i = 7.0$ mS/cm) em função do tempo para diferentes pressões de alimentação.

4.2 – ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DO SISTEMA COM ÁGUA SALOBRA VERSUS SOLUÇÃO DE CLORETO DE SÓDIO

Com o objetivo de comparar o desempenho do sistema, as Figuras 4.6 a 4.9 referem-se as Tabelas 4.2, 4.3, 4.10, 4.11 e 4.18 a 4.21, conforme mostra o Apêndice II. Estas apresentam os resultados das bateladas realizadas com soluções de NaCl de condutividade elétricas iniciais de 2,10 e 4,0 mS/cm e águas salobras dos poços do Municípios de Queimadas e Caturité de condutividade elétricas iniciais de 2,20 e 4,30 mS/cm, respectivamente.

O comportamento das curvas da condutividade elétrica durante o processo foram similares. Observa-se que as curvas das condutividade elétricas da água salobra não apresentaram uma grande diferença em relação a da solução de NaCl.

Em termos de eficiência, a recuperação do dessalinizador para a solução de NaCl foi superior em 30 % ao da água do poço do Município de Caturité para uma pressão de de 7,4 kgf/cm² e 19 % para uma pressão de 10,4 kgf/cm². Para a água do poço do Município de Queimadas a recuperação foi inferior em aproximadamente 28 % a da

solução de NaCl, para uma pressão de 5,1 kgf/cm² e em 26% para uma pressão de 10,4 kgf/cm², conforme pode ser visto na Tabela 4.37 do Apêndice II.

Considerando a área efetiva de cada elemento de membrana do sistema, a recuperação diminuiu para águas salobras quando comparada com os valores obtidos para as soluções de cloreto de sódio, sob as mesmas condições de operação. Ou seja a presença de outros elementos, além de cloreto de sódio, passam a interferir no transporte iônico, através da camada limite. Quando isso ocorre, a produção do permeado tende a diminuir e a do concentrado a aumentar. Para situações como essas se faz necessário aumentar o número de membranas dispostas em série e considerar um pré-tratamento preventivo da água para evitar formação de incrustações.

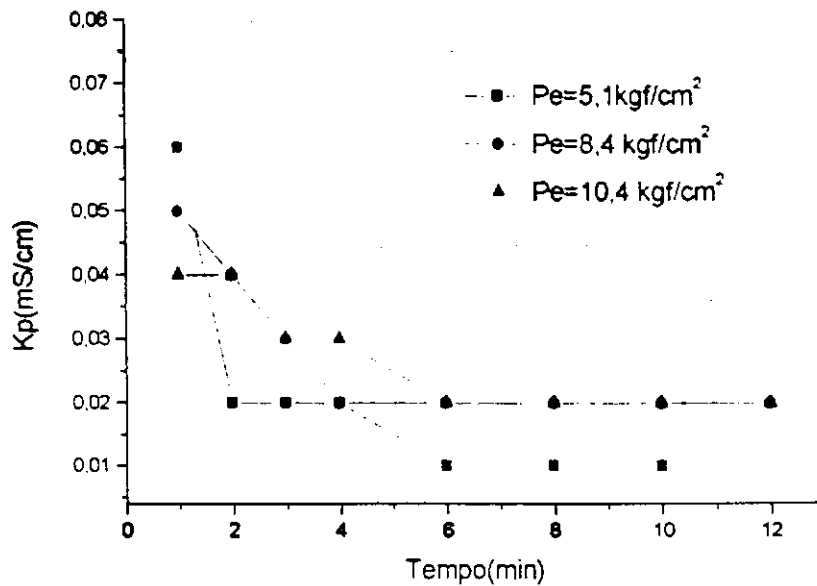


Figura 4.6 - Variação da condutividade elétrica de uma solução de NaCl ($K_i = 2,10$ mS/cm) em função do tempo para diferentes pressões de alimentação.

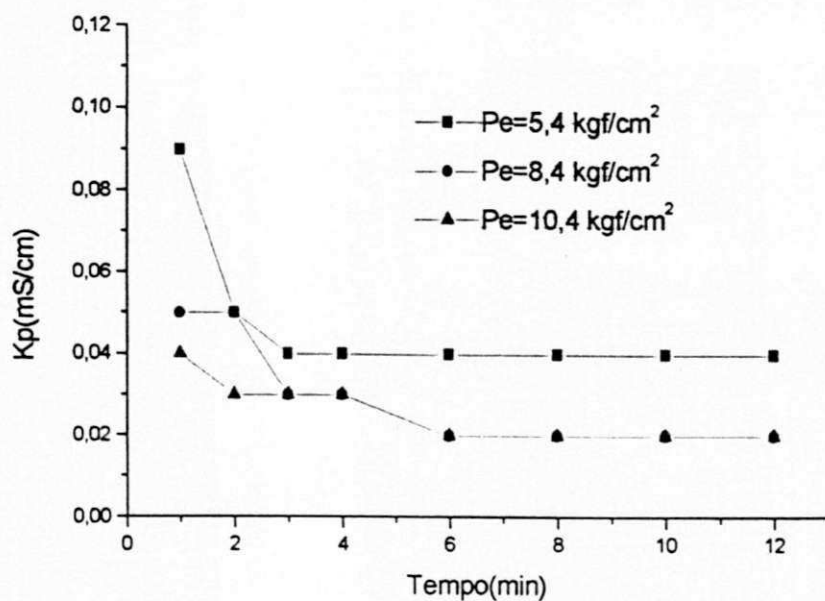


Figura 4.7 - Variação da condutividade elétrica da água salobra do poço do Município de Queimadas ($K_i = 2,20 \text{ mS/cm}$) em função do tempo para diferentes pressões de alimentação.

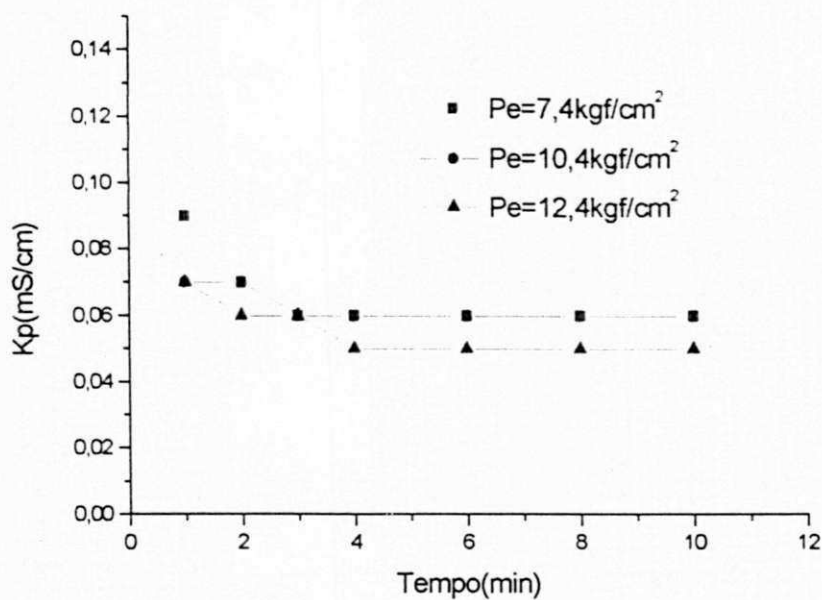


Figura 4.8 - Variação da condutividade elétrica de uma solução de NaCl ($K_i = 4,0 \text{ mS/cm}$) em função do tempo para diferentes pressões de alimentação.

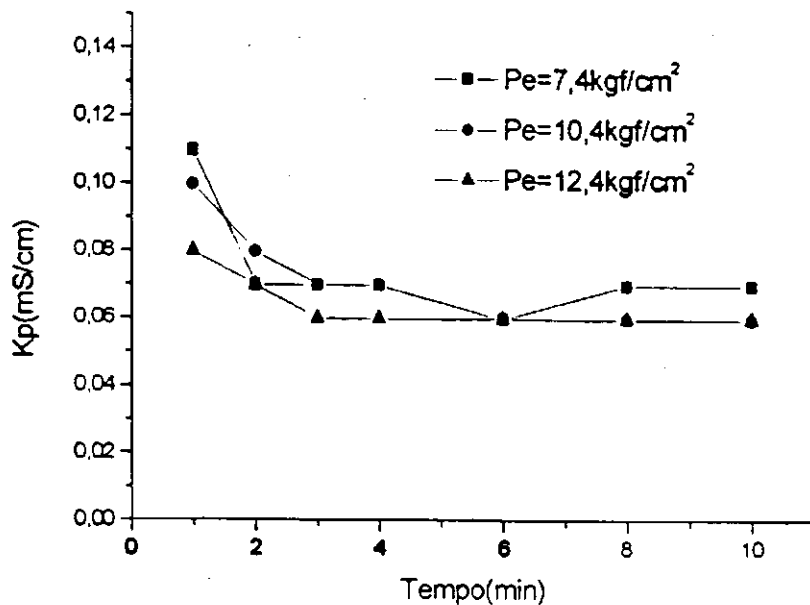


Figura 4.9 - Variação da condutividade elétrica da água salobra do poço do Município de Caturité ($K_i = 4,30 \text{ mS/cm}$) em função do tempo para diferentes pressões de alimentação.

4.3 - DESEMPENHO DE CADA MEMBRANA DURANTE O PROCESSO

A variação da condutividade elétrica dos efluentes do permeado para os três tipos de membranas em função do tempo, para soluções de NaCl e águas salobras dos Municípios de Queimadas e Caturité, são representadas pelas Figuras 4.10 a 4.15 e as Tabelas 4.22, 4.23 e 4.25, que se encontram no Apêndice II. As Tabelas restantes 4.24, 4.26 a 4.33 correspondentes a esta série que também se encontram no Apêndice II.

Conforme foi citado no Capítulo III, foram coletadas amostras do permeado de cada permeador, com intuito de comparar o desempenho de cada membrana durante o processo de dessalinização, essa comparação foi realizada tomando-se a condutividade elétrica dos permeados de cada elemento de membrana.

Tomando como exemplo, as Figuras 4.10 e 4.11, observou-se que os valores das condutividade elétrica das soluções de NaCl, para cada elemento de membrana foram inferiores aos das condutividades obtidas para água salobra.

A Tabela 4.34 apresenta a média das taxas de rejeição de sais de cada elemento de membrana obtidas com a solução de NaCl e água salobra do poço do Município de Queimadas que apresentam uma condutividade elétrica de 2,20 mS/cm sob uma pressão de operação de 8,4 kgf/cm².

Tabela 4.34- Média da taxa de rejeição de sais para cada elemento de membrana.

Taxa de Rejeição	Membrana HF (%)	Membrana ULP (%)	Membrana HR (%)
Solução NaCl	98,25	99,35	99,41
Água salobra	97,73	98,64	98,96

As membranas HF,HR e ULP foram testadas pelo fabricante (Fluid Systems), sob as seguintes condições: concentração de NaCl a 1500 mg/L, sob uma pressão de operação de 14,0 kgf/cm². As taxas de rejeição obtidas para as respectivas membranas foram de 98,2, 99,4 e 99%.

Em função destes dados, observou-se que os valores práticos obtidos, para cada elemento de membrana utilizado no sistema, foram próximos aos fornecidos pelo fabricante da Fluid Systems Corporation. Todavia deve-se considerar que a diferença da concentração de sais dissolvidos e pressão de trabalho para as soluções utilizadas no processo foram de valores diferentes aos utilizados nos testes pelo fabricantes das membranas. As demais bateladas (Figuras 4.12 a 4.15), apresentaram comportamentos similares. Foi observado que a condutividade elétrica do permeado para cada elemento de membrana diminuiu muito rápido para os primeiros instantes, permanecendo, logo após constante durante o processo. Em alguns casos os valores da condutividade permaneceram praticamente constantes.

O comportamento das curvas, para as membranas ULP e HR mostram que os dados ficaram sobre opostos. Este fato se deve a taxa de rejeição que as membranas apresentam, conforme pode-se observar através dos dados da Tabela 4.34 que se encontra no Apêndice II.

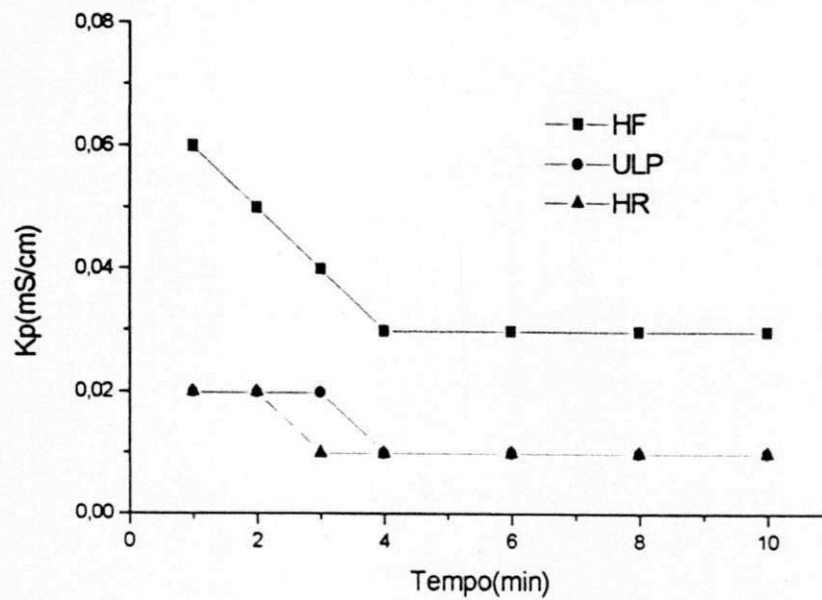


Figura 4.10 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo para os três tipos de membranas sob as seguintes condições: $K_i = 2,10$ mS/cm; $P_e = 8,4$ kgf/cm², $P_s = 8,0$ kgf/cm², $Q_p = 0,97$ L/min, $Q_c = 2,3$ L/min, $T = 26 \pm 2$ °C (p = permeado, c = concentrado, e = entrada, s = saída).

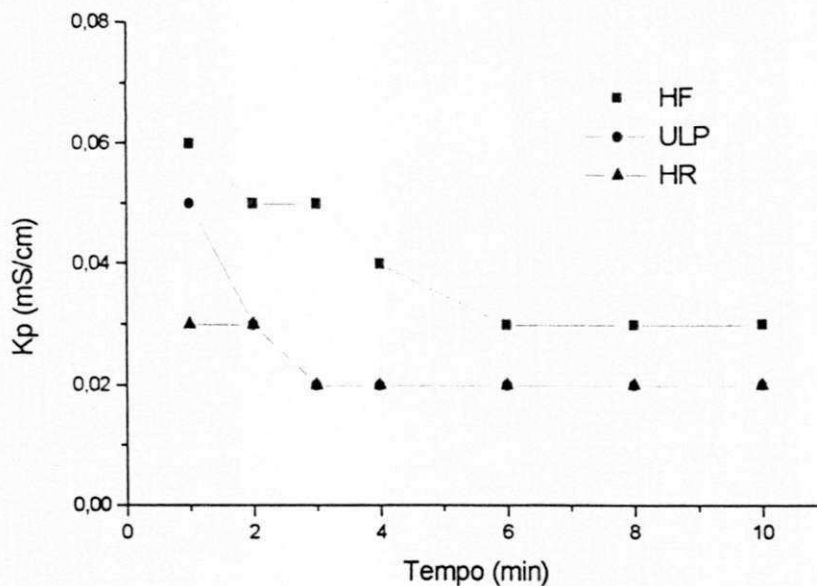


Figura 4.11 - Condutividade elétrica da água salobra do poço do Município de Queimadas em função do tempo para os três tipos de membranas sob as seguintes condições: $K_i = 2,20$ mS/cm; $P_e = 8,4$ kgf/cm²; $P_s = 8,0$ kgf/cm², $Q_p = 0,77$ L/min; $Q_c = 2,5$ L/min; $T = 26 \pm 2$ °C (p = permeado, c = concentrado, e = entrada, s = saída).

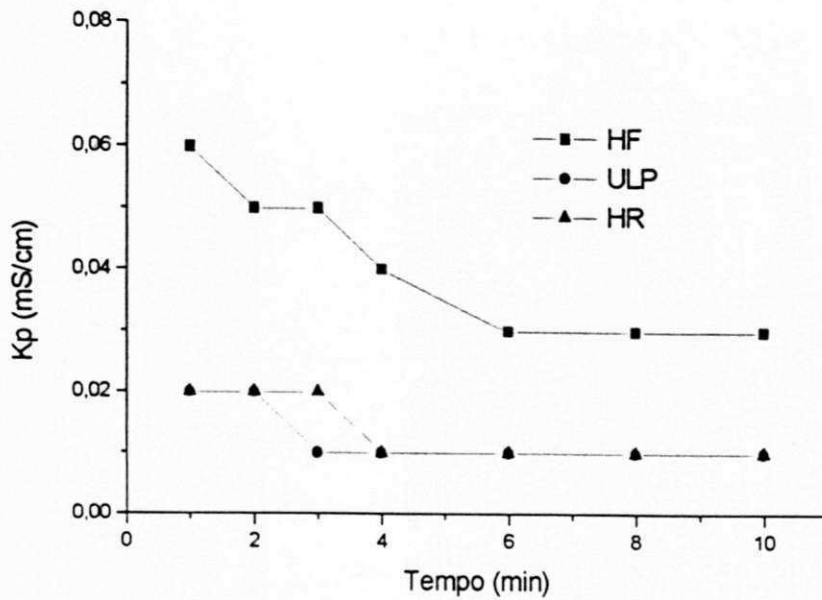


Figura 4.12 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo para os três tipos de membranas sob as seguintes condições: $K_i = 2,10$ mS/cm; $P_e = 10,4$ kgf/cm²; $P_s = 10,0$ kgf/cm²; $Q_p = 1,10$ L/min; $Q_c = 2,20$ L/min; $T = 26 \pm 2$ °C (p = permeado, c = concentrado, e = entrada, s = saída).

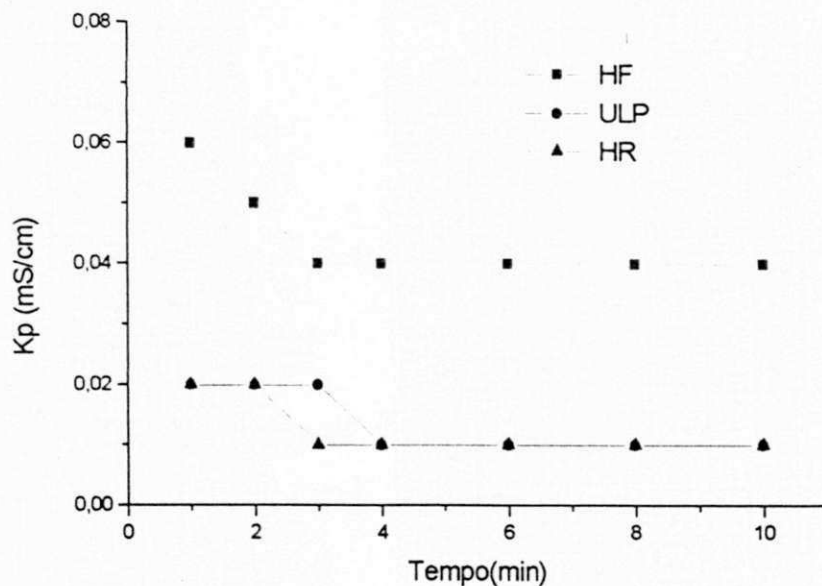


Figura 4.13 - Condutividade elétrica da água salobra do Município de Queimadas em função do tempo para os três tipos de membranas sob as seguintes condições: $K_i = 2,20$ mS/cm; $P_e = 10,4$ kgf/cm²; $P_s = 10,0$ kgf/cm²; $Q_p = 0,98$ L/min; $Q_c = 2,20$ L/min; $T = 26 \pm 2$ °C (p = permeado, c = concentrado, e = entrada, s = saída).

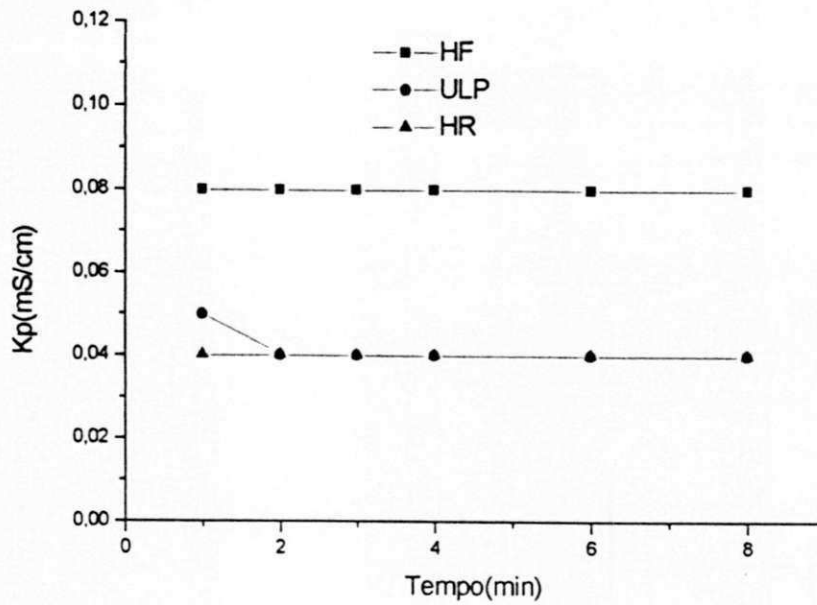


Figura 4.14 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo para os três tipos de membranas sob as seguintes condições: $K_i = 4,0 \text{ mS/cm}$; $P_e = 7,4 \text{ kgf/cm}^2$; $P_s = 7,0 \text{ kgf/cm}^2$; $Q_p = 0,50 \text{ L/min}$; $Q_c = 2,6 \text{ L/min}$; $T = 26 \pm 2^\circ\text{C}$ (p = permeado, c = concentrado, e = entrada, s = saída).

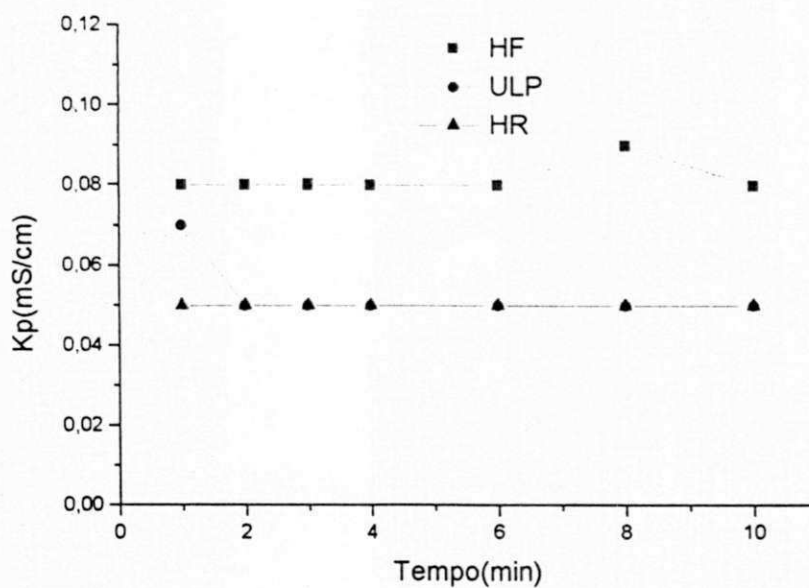


Figura 4.15 - Condutividade elétrica da água salobra do poço do Município de Caturité em função do tempo para os três tipos de membranas sob as seguintes condições: $K_i = 4,30 \text{ mS/cm}$; $P_e = 7,4 \text{ kgf/cm}^2$; $P_s = 7,0 \text{ kgf/cm}^2$; $Q_p = 0,39 \text{ L/min}$; $Q_c = 2,8 \text{ L/min}$; $T = 26 \pm 2^\circ\text{C}$ (p = permeado, c = concentrado, e = entrada, s = saída).

4.4 - RECUPERAÇÃO DE CADA ELEMENTO DE MEMBRANA

Para estudar a recuperação de cada elemento de membrana do sistema de dessalinização, foi necessário obter experimentalmente a produção de cada permeador. Foram estudados dois casos; um com água salobra do poço de Caturité, PB, de $K_i = 4,30 \text{ mS/cm}$, sob uma pressão de $12,4 \text{ kg/cm}^2$ e outro com uma solução de NaCl de $K_i = 2,10 \text{ mS/cm}$ a $8,4 \text{ kg/cm}^2$. Os dados da recuperação dos dois sistemas se encontram na Tabela 4.35. Sendo que as recuperações de cada elemento de membrana foram calculadas com auxílio das Equações 2.15 a 2.17. Observa-se que a maior recuperação foi para o sistema que operou com maior pressão, mesmo com a presença de outros compostos presentes na água de alimentação.

Comparando os valores das recuperações finais dos dois sistemas com as recuperações obtidas com os valores das vazões do permeado e concentrado lidos nos rotâmetros na saída do sistema, percebe-se que houve uma diferença entre as duas recuperações superior a 2,0%. Considerando que as amostras de cada permeador foram realizadas manualmente, com auxílio de uma proveta, a diferença percentual entre os valores das recuperações é esperado. Pode-se observar que as vazões dos permeados diminuíram gradativamente. Isso mostra que a exposição dos elementos de membranas em série pode influenciar na produtividade dos elementos subsequentes ao primeiro. Essa forma de arranjo pode vir contribuir na formação de “scaling” e/ou “fouling”, dependendo da qualidade da água.

Tabela 4.35 - Taxa de recuperação para os três tipos de membranas a diferentes condutividade elétrica e pressões de alimentação.

	Q_{p1} (cm^3/min)	Q_{p2} (cm^3/min)	Q_{p3} (cm^3/min)	R_{p1} (%)	R_{p2} (%)	R_{p3} (%)	R_s (%)	E (%)
NaCl	0,36	0,28	0,24	11,01	9,93	9,40	29,67	2,26
Poço	0,38	0,34	0,29	12,10	12,0	11,60	34,37	3,87

Onde: Q_{p1} = vazão do permeado para membrana HF (cm^3/min); Q_{p2} = vazão do permeado para membrana ULP (cm^3/min); Q_{p3} = vazão do permeado para membrana HR (cm^3/min); R_{p1} = recuperação do permeado para membrana de HF (%); R_{p2} = recuperação do permeado para membrana de ULP (%); R_{p3} = recuperação do permeado para membrana de HR (%); R_s = recuperação do sistema (%); E = erro percentual (%).

4.5 – DESEMPENHO DO SISTEMA COM E SEM RECICLO DO PERMEADO E CONCENTRADO.

As Figuras 4.16 e 4.17 e a Tabela 4.36 (Apêndice II), são referentes as bateladas realizadas com soluções de NaCl com e sem reciclo do permeado e concentrado, para diferentes pressões e condutividade elétricas.

Para as bateladas com reciclo, a condutividade elétrica diminuiu nos primeiros instantes e em seguida tendeu a aumentar. Enquanto que no sistema sem reciclo o comportamento da condutividade elétrica foi semelhante aos casos estudados anteriormente.

As bateladas com reciclo total podem ser explicadas da seguinte forma: como o tanque de alimentação não possui um sistema de agitação, não houve uma homogeneização adequada durante o processo. Considerando que o fluxo do permeado é inferior ao do concentrado e a concentração dos íons presentes na corrente do concentrado é superior a concentração dos íons no tanque de alimentação, há uma tendência por efeito de mistura, da concentração no tanque de alimentação aumentar. Conseqüentemente a condutividade elétrica do permeado tende a crescer durante o processo. A curva da condutividade elétrica do permeado poderá após um certo tempo, em função do tempo de residência do dessalinizador apresentar valores constantes. Em função do aumento da condutividade elétrica do tanque de alimentação, a taxa de produção de sais na superfície da membrana aumenta consideravelmente, formando assim uma camada, a qual oferece resistência a permeação da água. Esta elevação da concentração, aumenta o valor da diferença de pressão osmótica da solução, o que provavelmente passa a ser um fator que contribui para o decréscimo do fluxo do permeado e conseqüentemente o aumento da condutividade elétrica.

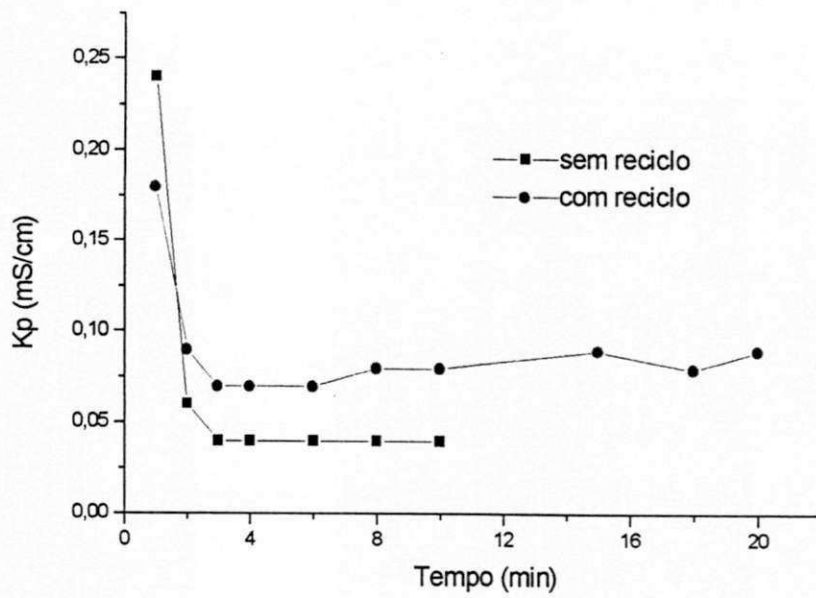


Figura 4.16 - Variação da condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo, utilizando o reciclo total ($K_i = 3,0 \text{ mS/cm}$) para uma pressão de alimentação de $P_e = 4,4 \text{ kfg/cm}^2$.

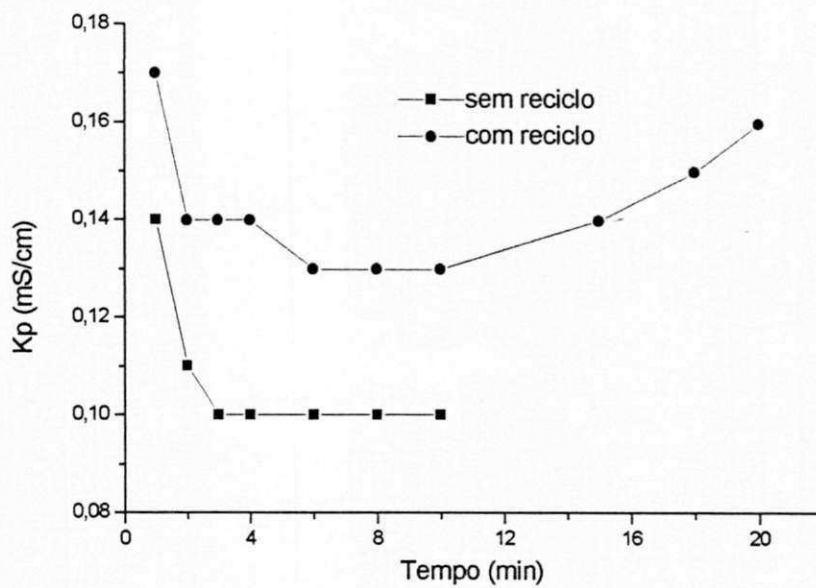


Figura 4.17 - Variação da condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo, utilizando o reciclo total ($K_i = 5,50 \text{ mS/cm}$) para uma pressão de alimentação de $P_e = 7,4 \text{ kfg/cm}^2$.

4.6 - EFEITO DA RECUPERAÇÃO DO SISTEMA

O efeito da recuperação do sistema está relacionado com vários parâmetros como: grandeza da condutividade elétrica da solução de alimentação, pressão, área efetiva de transferência de massa e do tipo de membrana utilizada no processo.

A Figura 4.18 referente a Tabela 4.37 (Apêndice II), apresenta a variação da recuperação do sistema em função da pressão aplicada para diferentes condutividades elétricas.

Observou-se que para uma mesma condutividade elétrica a recuperação do sistema aumentou com a elevação da pressão aplicada. Por outro lado observou-se que sob o efeito de uma pressão constante a recuperação diminuiu em função do aumento da condutividade.

De acordo com a Tabela 4.37, para as soluções de NaCl de condutividade elétrica de 4,0 mS/cm e 5,5 mS/cm sob uma pressão de alimentação de 5,4 kgf/cm², observou-se que a recuperação diminuiu em torno de 39 %, em relação a condutividade elétrica de maior valor.

Os valores das recuperações para as águas salobras foram inferiores aos das soluções de NaCl sob as mesmas condições de operação (Tabela 4.35), ou seja a presença de outros elementos, além de NaCl, passam a interferir no transporte iônico através da camada limite da membrana. Quando isto ocorre a produção do permeado tende a diminuir e conseqüentemente a recuperação.

Estes resultados são importantes uma vez que oferecem condições de determinar a melhor pressão operacional para uma faixa de concentração.

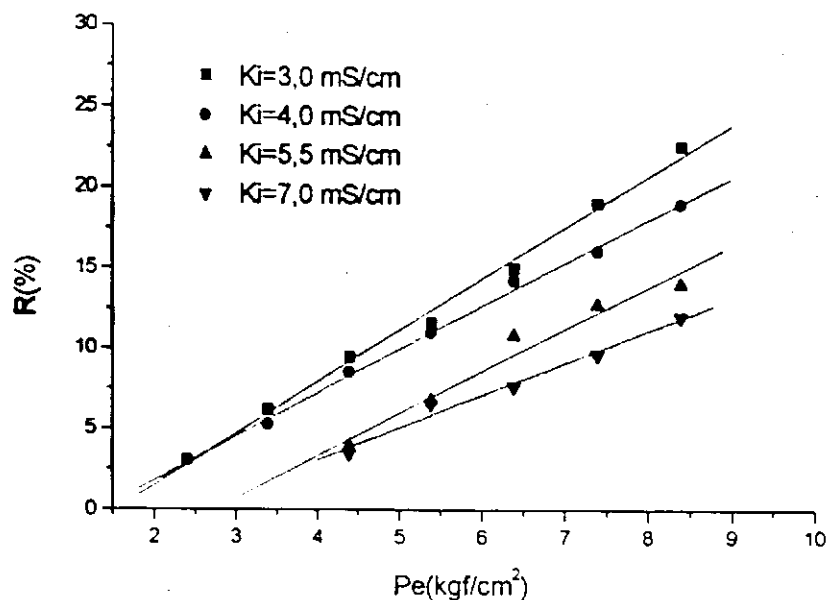


Figura 4.18 - Recuperação em função da pressão de alimentação de uma solução de NaCl para diferentes condutividade elétricas.

4.7 - PARÂMETROS TÉCNICOS

4.7.1 - Fluxo de água, pressão e taxa de rejeição de sais

As Figuras 4.19 a 4.23 e Tabelas 4.38 a 4.40, são referentes a Série VI e representam o comportamento do fluxo do permeado e da taxa média de rejeição de sais das soluções de NaCl em função da diferença do gradiente de pressão e pressão osmótica.

Através das Equações 2.1, 2.2, 2.3 e 2.6 do Capítulo II, determinaram-se para soluções de NaCl a diferentes pressões de operação e condutividade elétricas, os fluxos dos permeados, gradiente de pressão, gradiente de pressão osmótica e pressão osmótica respectivamente

A partir da vazão do permeado (Q_p) gerado durante o processo e da área efetiva da membrana, pode-se obter o fluxo de água que passa através da mesma (J_p). Com auxílio deste último e a diferença entre o gradiente de pressão e a pressão osmótica ($\Delta P - \Delta \pi$), pode-se obter o valor estimado para os coeficientes de transferência de massa para água (K_a). O comportamento das curvas obtidas para K_a obedece a Equação 2.1.

Observa-se que os valores obtidos para K_a tendem a diminuir em função da concentração inicial da solução de alimentação do sistema. Isso justifica que o transporte de água permeada depende da concentração de sais formada na superfície da membrana, a qual passa oferecer uma resistência à transferência. Para isso cada membrana possui um parâmetro importante que é denominado de GFD (gal/ft²dia), o qual opera dentro de uma faixa em função do tipo de água que será tratada [Hydranautics, 1998]. Quando se ultrapassa essa faixa isso significa que pode ocorrer a formação de incrustações (scaling/e ou fouling), na superfície da membrana. As mesma figuras mostram que o comportamento da TRS para todas as bateladas foram similares ou seja a taxa aumentou em função da pressão aplicada ao meio. Os dados obtidos mostram que ocorreu uma concordância significativa para todos os casos estudados e a TRS atingiu valores aproximados ao da literatura [Fluid Systems, 1997], para $(\Delta P - \Delta \pi) > 3,5 \text{ kgf/cm}^2$, que corresponde a pressões acima $5,5 \text{ kgf/cm}^2$.

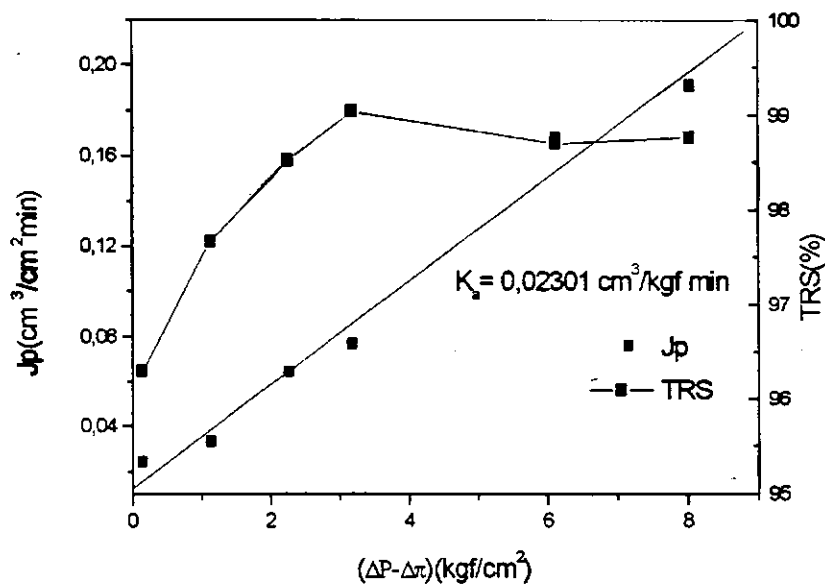


Figura 4.19 - Fluxo do permeado e média da taxa de rejeição de sais em função dos gradientes de pressões para uma solução de NaCl a uma condutividade elétrica inicial de $K_i = 2,10 \text{ mS/cm}$ (1020 mg/L).

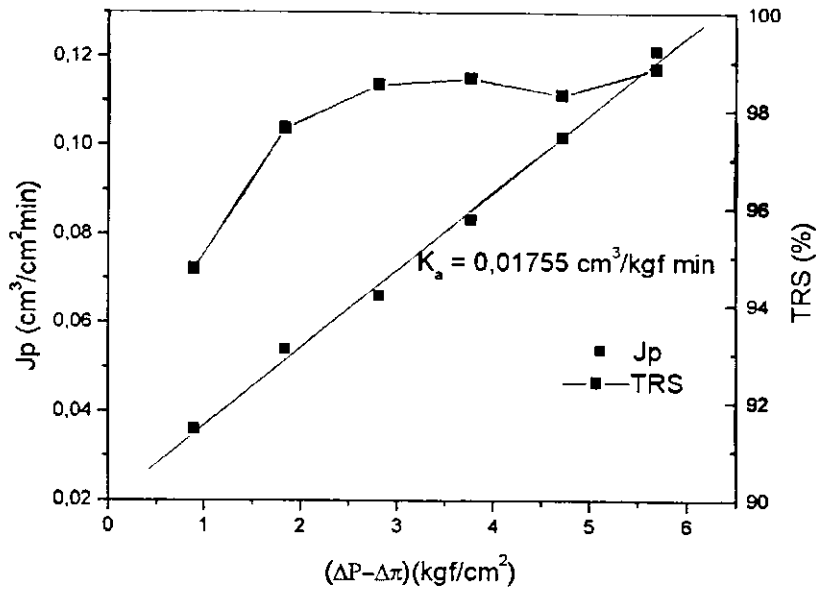


Figura 4.20 - Fluxo do permeado e média da taxa de rejeição de sais em função da pressão de alimentação para uma solução de NaCl a uma condutividade elétrica inicial de $K_i = 3,0$ mS/cm (1510 mg/L).

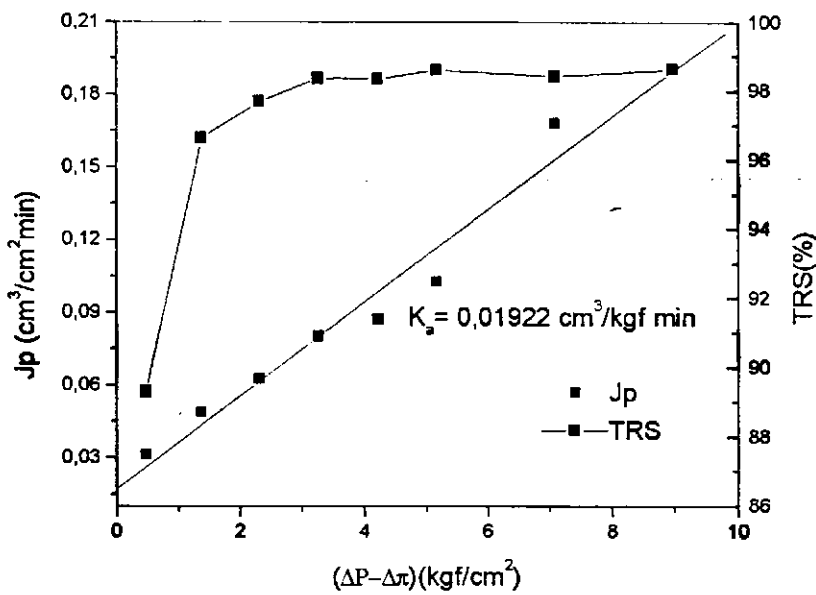


Figura 4.21 - Fluxo do permeado e média da taxa de rejeição de sais em função da pressão de alimentação para uma solução de NaCl a uma condutividade elétrica inicial de $K_i = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L).

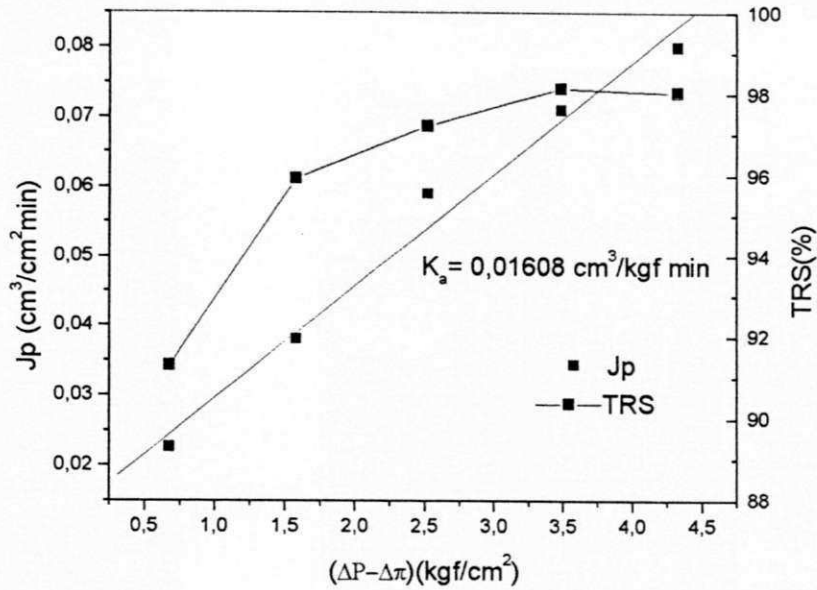


Figura 4.22 - Fluxo do permeado e média da taxa de rejeição de sais em função da pressão de alimentação para uma solução de NaCl a uma condutividade elétrica inicial de $K_i = 5,50 \text{ mS/cm}$ (2932 mg/L).

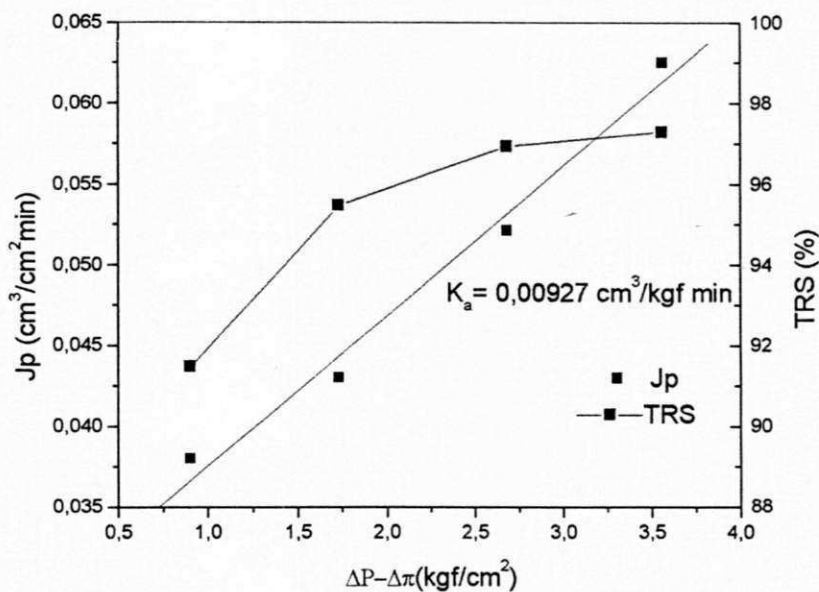


Figura 4.23 - Fluxo do permeado e média da taxa de rejeição de sais em função da pressão de alimentação para uma solução de NaCl a uma condutividade elétrica inicial de $K_i = 7,20 \text{ mS/cm}$ (3938 mg/L).

4.7.2 - Variação do potencial hidrogeniônico dos efluentes

As variações do potencial hidrogeniônico dos efluentes do permeado e concentrado em função do tempo para soluções de NaCl e águas salobras dos poços dos Municípios de Queimadas e Caturité, são representada nas Figuras 4.24 a 4.29, referentes as Tabelas 4.41, 4.42, 4.46 e 4.48 que se encontram no Apêndice II. As Tabelas restantes (4.43 a 4.45, 4.47 e 4.49 a 4.55) correspondentes a esta série se encontram no Apêndice II.

Analisando o comportamento das Figuras 4.24 a 4.29, observou-se que durante o tempo de operação ocorreram pequenas variações do pH para o permeado e o concentrado. Os valores do pH para o permeado foram inferiores ao do concentrado, o que era de se esperar. Esse fato ocorre devido a extração de sais dissolvidos na solução de alimentação. A taxa de diferença do pH entre o permeado e o concentrado, depende também de outros parâmetros como: tipo de membrana, pressão, pressão osmótica, temperatura da solução de alimentação e outras substancias de gênero coloidal.

Considerando que o sistema trabalha com um mesmo tipo de membranas sob o efeito da mesma pressão, e apresenta uma pressão osmótica inicial (de valores aproximados), conforme mostram as bateladas das Figuras 4.25 e 4.26 a 4.27 e 4.28, pode-se observar que a maior diferença dos potenciais hidrogeniônicos (pH_i e pH_p) ocorreu com as águas salobras dos poços, devido a presença de outros ions, principalmente daqueles que podem interferir na variação do pH como: cálcio, magnésio, carbonatos, bicarbonatos, etc., conforme mostram as análises fisico-químicas das águas no Apêndice II.

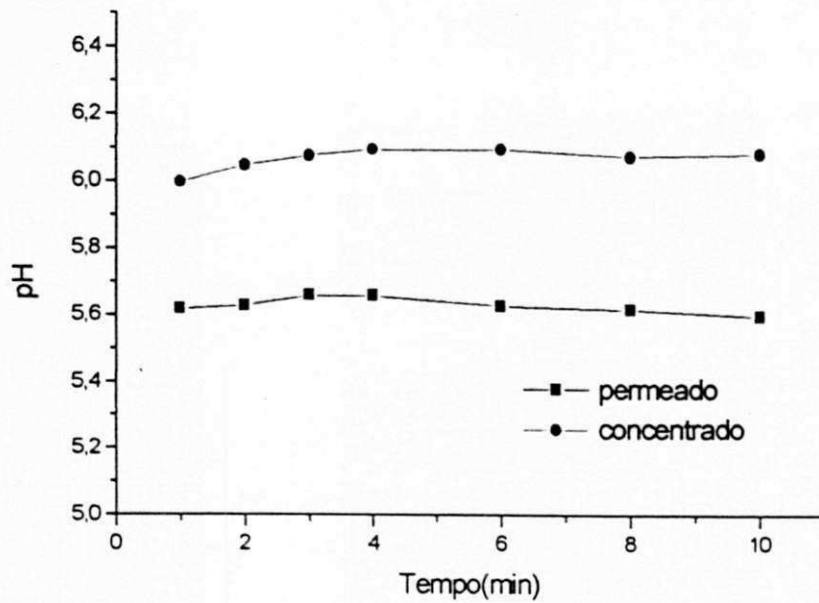


Figura 4.24 – Potencial hidrogênico de uma solução de NaCl em função do tempo sob as seguintes condições: $K_i = 2,10 \text{ mS/cm}$ (1022 mg/L); $\text{pH}_i = 6,2$; $P_e = 8,4 \text{ kgf/cm}^2$; $P_s = 8,0 \text{ kgf/cm}^2$; $Q_p = 0,97 \text{ L/min}$; $Q_c = 2,3 \text{ L/min}$; $T = 26 \pm 2^\circ\text{C}$.

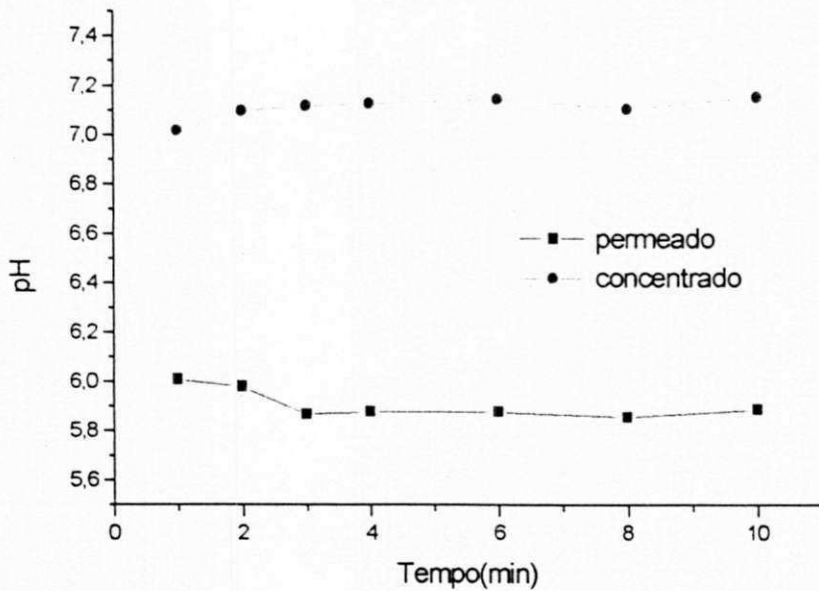


Figura 4.25 - Potencial hidrogênico da água salobra do poço do Município de Queimadas em função do tempo sob as seguintes condições: $K_i = 2,20 \text{ mS/cm}$ (1075 mg/L); $\text{pH}_i = 6,9$; $P_e = 8,4 \text{ kgf/cm}^2$; $P_s = 8,0 \text{ kgf/cm}^2$; $Q_p = 0,77 \text{ L/min}$; $Q_c = 2,5 \text{ L/min}$; $T = 26 \pm 2^\circ\text{C}$.

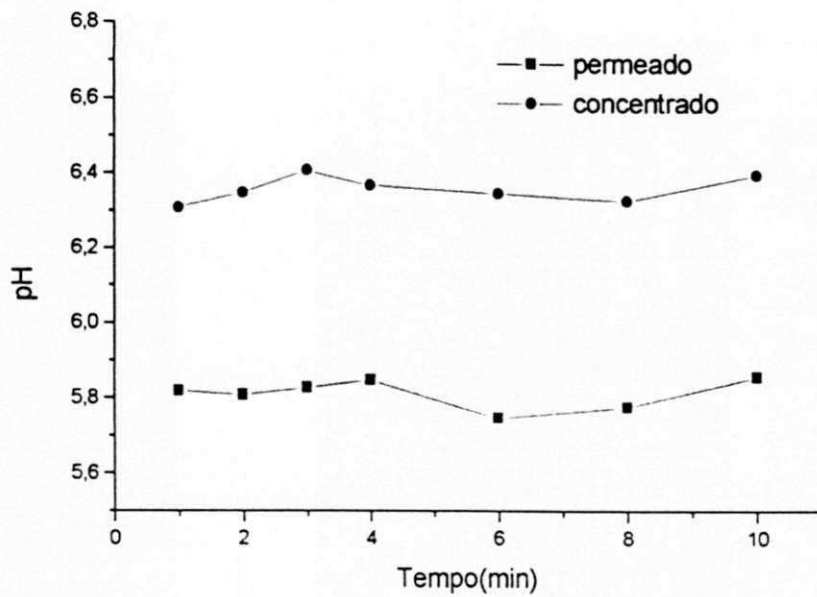


Figura 4.26 - Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo sob as seguintes condições: $K_i = 2,10 \text{ mS/cm}$ (1020 mg/L); $\text{pH}_i = 6,15$; $P_e = 10,4 \text{ kgf/cm}^2$; $P_s = 10,0 \text{ kgf/cm}^2$; $Q_p = 1,1 \text{ L/min}$; $Q_c = 2,2 \text{ L/min}$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

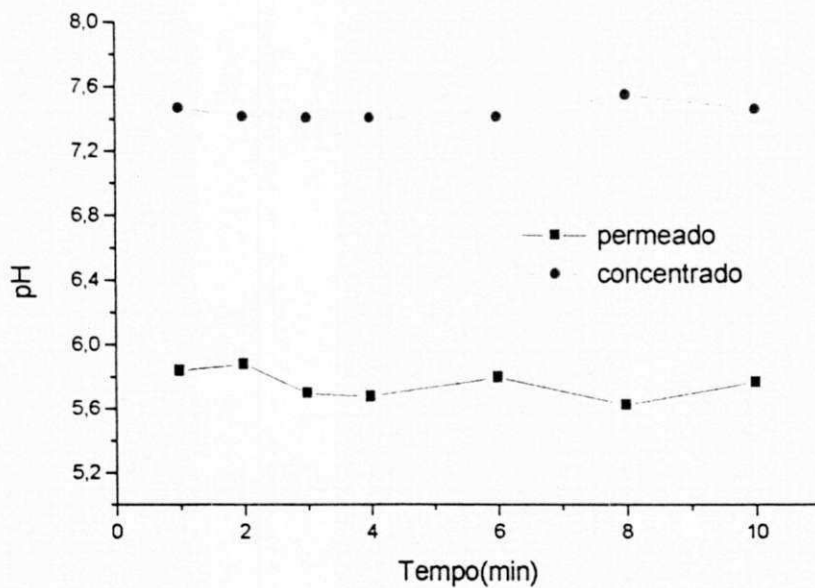


Figura 4.27 - Potencial hidrogeniônico do permeado e concentrado da água do poço de Queimadas em função do tempo sob as seguintes condições: $K_i = 2,20 \text{ mS/cm}$; $\text{pH}_i = 6,9$; $P_e = 10,4 \text{ kgf/cm}^2$; $P_s = 10,0 \text{ kgf/cm}^2$; $Q_p = 0,98 \text{ L/min}$; $Q_c = 2,20 \text{ L/min}$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

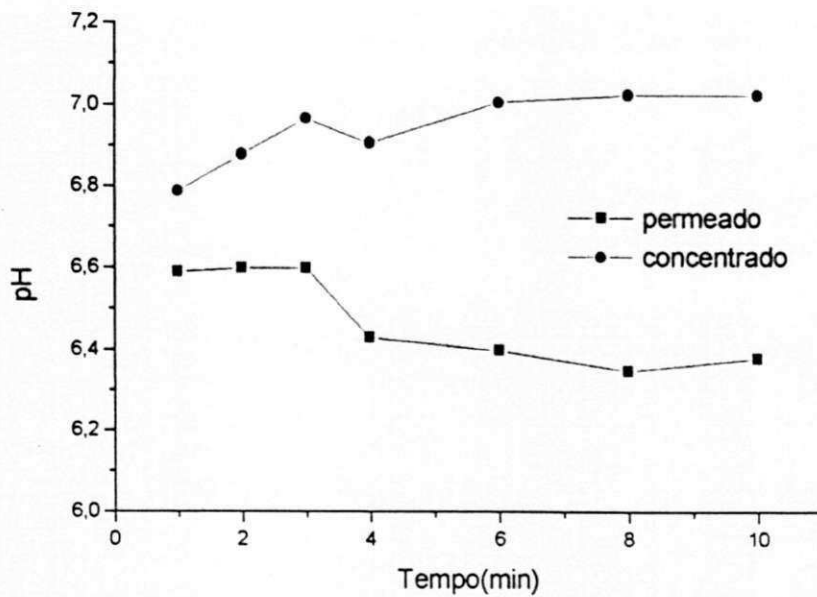


Figura 4.28 - Potencial hidrogeniônico do permeado e concentrado de uma solução de NaCl em função do tempo sob as seguintes condições: $K_i = 4,0 \text{ mS/cm}$; $\text{pH}_i = 6,7$; $\text{Pe} = 7,4 \text{ kgf/cm}^2$; $\text{Ps} = 7,0 \text{ kgf/cm}^2$; $\text{Q}_p = 0,50 \text{ L/min}$; $\text{Q}_c = 2,6 \text{ L/min}$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

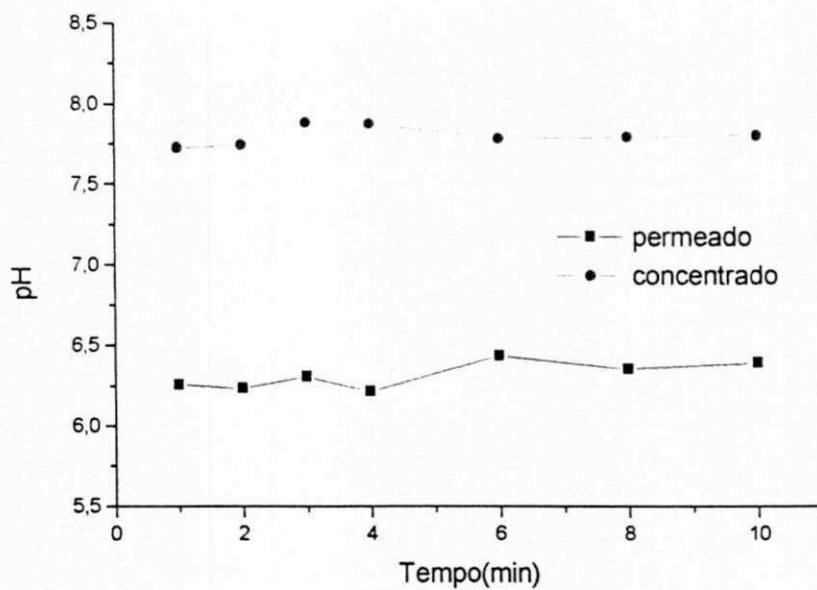


Figura 4.29 - Potencial hidrogeniônico do permeado e concentrado da água do poço de Caturité em função do tempo sob as seguintes condições: $K_i = 4,30 \text{ mS/cm}$; $\text{pH}_i = 7,2$; $\text{Pe} = 7,4 \text{ kgf/cm}^2$; $\text{Ps} = 7,0 \text{ kgf/cm}^2$; $\text{Q}_p = 0,39 \text{ L/min}$; $\text{Q}_c = 2,8 \text{ L/min}$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.8 - CONSUMO DE ENERGIA E CUSTO

As Tabelas 4.56 a 4.60 apresentam a recuperação, o consumo de energia e o custo em função das pressões de operação, para as bateladas realizadas com as soluções de NaCl.

Analisando os resultados obtidos para o consumo de energia e o custo, percebe-se que os mesmos aumentaram em função da concentração de sais dissolvidos na solução de alimentação do sistema.

As Tabelas 4.57 e 4.59 mostram que para soluções de condutividade elétrica de 3,0 e 5,5 mS/cm, sob pressão de alimentação de 7,4 kgf/cm², o consumo de energia para a solução de menor condutividade elétrica apresentou uma diferença percentual de 50%. Isso vem justificar o que foi mencionado acima, quando a condutividade elétrica aumentou o rendimento do sistema diminuiu para uma dada pressão. Para fins de cálculo do consumo de energia do sistema, foram considerados as eficiências do motor e da bomba, em 85% [Taylor & Jacobs, 1996]. Da mesma forma foi observado que o custo de água dessalinizada por metro cúbico, aumentou em função da qualidade de água. Para efeito de cálculo do custo de energia, considerou-se que 1kWh custa R\$0,13, de acordo com a Companhia de Eletricidade da Borborema (CELB) – PB.

No entanto com o sistema operando sob diferentes pressões, para uma dada condutividade elétrica, observou-se que o consumo de energia e o custo/m³ de água dessalinizada diminuíram com o aumento da pressão/ recuperação do sistema.

Para alguns casos foi observado que o consumo de energia aumentou, conforme mostram os dados das Tabelas 4.56 a 4.60. Estes casos ocorreram quando o valor da pressão de operação se tornou o parâmetro limitante da Equação 2.9, ou seja, a pressão passou a ser o fator responsável pelo aumento do consumo de energia.

Tabela 4.56 - Consumo de energia e Custo de uma solução de NaCl em função da pressão de operação e recuperação a uma condutividade elétrica inicial de 2,10 mS/cm (1020 mg/L).

Pe (kgf/cm ²)	R (%)	E (KWh/m ³)	Custo (R\$/m ³)
2,1	4,1	1,90	0,25
3,1	6,5	1,80	0,23
4,1	11,3	1,40	0,18
5,1	13,6	1,40	0,18
8,4	29,7	1,10	0,14
10,4	33,3	1,20	0,15

Tabela 4.57 - Consumo de energia e Custo de uma solução de NaCl em função da pressão de operação e recuperação a uma condutividade elétrica inicial de 3,0 mS/cm (1510 mg/L).

Pe(kgf/cm ²)	R (%)	E (KWh/m ³)	Custo (R\$/m ³)
2,4	3,1	2,96	0,38
3,4	6,2	2,08	0,27
4,4	9,5	1,76	0,23
5,4	11,6	1,77	0,23
6,4	15,0	1,62	0,21
7,4	19,1	1,47	0,19
8,4	22,6	1,41	0,18

Tabela 4.58 - Consumo de energia e Custo de uma solução de NaCl em função da recuperação e pressão de operação a uma condutividade elétrica inicial de 4,0 mS/cm (2069 mg/L).

Pe(kgf/cm ²)	R (%)	E (KWh/m ³)	Custo (R\$/m ³)
3,4	5,3	2,40	0,31
4,4	8,5	1,95	0,25
5,4	11,0	1,85	0,24
6,4	14,3	1,70	0,22
7,4	16,1	1,74	0,23
8,4	19,1	1,67	0,22
10,4	29,7	1,33	0,17
12,4	34,4	1,37	0,18

Tabela 4.59 - Consumo de energia e Custo de uma solução de NaCl em função da pressão de operação e recuperação a uma condutividade elétrica inicial de 5.5 mS/cm (2932 mg/L).

Pe(kgf/cm ²)	R (%)	E (KWh/m ³)	Custo (R\$/m ³)
4,4	3,9	4,28	0,56
5,4	6,77	3,02	0,39
6,4	10,83	2,24	0,29
7,4	12,77	2,20	0,28
8,4	13,91	2,29	0,30

Tabela 4.60 - Consumo de energia e Custo de uma solução de NaCl em função da pressão de operação e recuperação a uma condutividade elétrica inicial de 7,20 mS/cm (3938 mg/L).

Pe(kgf/cm ²)	R (%)	E (KWh/m ³)	Custo (R\$/m ³)
4,4	3,20	5,21	0,68
5,4	6,63	3,09	0,40
6,4	7,7	3,15	0,41
7,4	9,68	2,90	0,38
8,4	12,05	2,64	0,34

As Tabelas 4.61 e 4.62 são referentes as bateladas realizadas com água salobra do Município de Queimadas (Ki = 2,20 mS/cm) e do Município de Caturité (Ki = 4,30 mS/cm).

Os resultados obtidos com água salobra apresentaram o mesmo comportamento das bateladas com NaCl. Comparando as bateladas realizadas com NaCl e água salobra do poço do Município de Queimadas (Tabelas 4.56 e 4.61) observou-se que para uma mesma pressão de alimentação (Pe = 5,4 kgf/cm² e 8,4 kgf/cm²), o consumo de energia foi superior a 22 % para a água salobra do Município de Queimadas. Para a pressão superior a 8,4 kgf/cm² o consumo de energia foi superior a 6 %.

Para os resultados obtidos com a água salobra do poço do Município de Caturité (Tabela 4.62), observou-se que para a pressão de operação de 7,4 kgf/cm², o consumo de energia foi superior em 32 % ao da solução de NaCl (Tabela 4.58). Para pressões de 10,4 kgf/cm² e 12,4 kgf/cm² o consumo de energia foi superior a 13 %, sob as mesmas condições operacionais. Este fato já era esperado, devido a presença de outros íons além de Na⁺ e Cl⁻.

É importante ressaltar de acordo com os os dados obtidos para ambos sistemas (solução de NaCl/água salobra), o custo se encontra dentro da faixa do custo do processo de osmose inversa que é de R\$(0,15 - 1,0)/m³ [Taylor & Jacobs, 1996].

Tabela 4.61 - Consumo de energia e Custo da água do poço do Município de Queimadas em função da pressão de operação e recuperação a uma condutividade elétrica inicial de 2,20 mS/cm (1075 mg/L).

Pe(kgf/cm ²)	R (%)	E(KWh/m ³)	Custo (R\$/m ³)
5,4	11,39	1,80	0,23
8,4	23,55	1,35	0,18
10,4	30,82	1,28	0,17

Tabela 4.62 - Consumo de energia e Custo da água do poço do Município de Caturité em função da pressão de operação e recuperação para uma condutividade elétrica inicial de 4,30 mS/cm (2240 mg/L).

Pe(kgf/cm ²)	R (%)	E(KWh/m ³)	Custo (R\$/m ³)
7,4	12,22	2,30	0,30
10,4	24,92	1,58	0,21
12,4	30,16	1,56	0,20

4.9 - ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA

A Figura 4.30 apresenta os resultados das espécies iônicas analisadas na água do poço do Município de Caturité, do permeado e do concentrado após a dessalinização. Dentre os ions presentes, Na⁺ e Cl⁻ foram os de maiores concentrações na água do poço e no concentrado.

Analisando a taxa de rejeição dos ions(Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, CO₃⁻⁻, SO₄⁻), a partir da Tabela 4.63 (Apêndice II), observa-se que a taxa de rejeição foi de 100 %, enquanto que HCO₃⁻ foi de 82,35 %. Os resultados demonstram que a TRS, depende da concentração dos ions presentes na solução.

A Figura 4.31 referente a Tabela 4.64, apresenta os resultados de uma simulação realizada com o auxílio do Programa Ropro 6.1 da Fluid Systems e os resultados obtidos a partir do sistema de dessalinização.

A título de comparação, foi realizada uma simulação com a água do poço do Município de Queimadas dessalinizada através de um Programa de simulação, doado pelo fabricante de membrana da Fluid Systems com os resultados experimentais obtidos a partir do sistema de dessalinização. Os resultados obtidos da simulação e os experimentais se encontram na Figura 4.31 ou conforme mostra a Tabela 4.64.

Observou-se uma pequena diferença entre os dados simulados e experimentais para alguns ions, já para outros essa diferença foi acentuada.

O permeado obtido para os dois casos (Figuras 4.30 e 4.31) apresentou altas taxas de redução de todos os componentes presentes na água de alimentação, obtendo assim um produto no final do processo, dentro dos padrões de potabilidade para o consumo humano, exigidos pela Legislação Federal MS36-90.

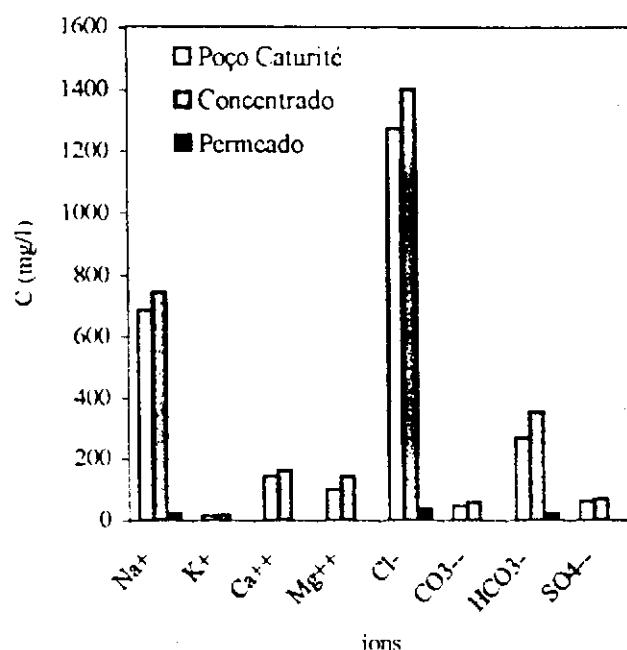


Figura 4.30 - Resultados das análises físico-químicas de uma água salobra proveniente de um poço tubular situado no Município de Caturité a uma condutividade elétrica inicial de 4,30 ms/cm (2240 mg/L) e pressão de operação de 7,4 kgf/cm²

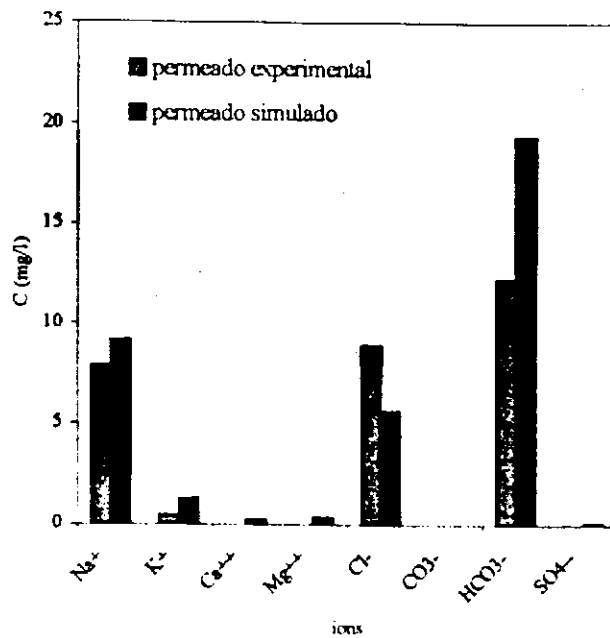


Figura 4.31 - Resultados experimentais e simulados das análises físico-químicas de uma água salobra proveniente de um poço tubular situado no Município de Queimadas a uma condutividade elétrica inicial de 2,20 ms/cm (1075 mg/L) e pressão de operação de 10,4 kgf/cm².

4.10 – ANÁLISE BACTERIOLÓGICA

As Tabelas 4.65 e 4.66 mostram os resultados das análises bacteriológicas realizadas com águas salobras dos poços do Município de Queimadas e Caturité, permeado e concentrado do sistema de osmose inversa

O grupo das bactérias coliformes vem sendo utilizado como indicador na avaliação bacteriológica da qualidade da água e sua presença é considerada indicadora de risco potencial à saúde pois indica contaminação fecal da água. Para água potável, ou seja aquela com qualidade adequada para consumo humano, os coliformes totais deverão estar ausentes em qualquer amostra e portanto, também os fecais e os E.coli [Sperling, 1996].

Em ambas as amostras das águas dos poços, pode-se considerar ausência de bactérias coliformes do tipo totais, fecais e Escherichia coli, indicando que estas águas não apresentaram contaminação fecal ou de esgotos. As quantidades de bactérias

heterótrofas mesófilas também foram baixas e inferiores aos valores máximos permitidos pela Legislação Federal MS 36/90 para água potável que permite até 500 UFC/ml.

Analisando a Tabela 4.65, detectou-se pequenas quantidades de bactérias do tipo de *Escherichia coli* e coliformes fecais e ausência de coliformes totais, para as águas do permeado e concentrado do sistema de osmose inversa.

Na Tabela 4.66, observou-se a ausência de coliformes fecais na água do permeado e presença de bactérias heterótrofas mesófilas, mais em quantidades inferiores as exigidas pela Legislação Federal MS 36/90.

Os resultados bacteriológicos, mostram que as qualidades dos permeados obtidos, estão de acordo com as características das águas estabelecidas pela Portaria Federal MS 36/90.

Portanto pode-se afirmar que as membranas utilizadas pelo processo de osmose inversa tem condições de rejeitar todos os tipos de bactérias patogênicas, obtendo assim um permeado de alta qualidade.

Tabela 4.65 – Resultados Bacteriológicos da água salobra do poço do Município de Queimadas, do permeado e do concentrado do sistema de osmose inversa.

Amostras	Coliformes totais NMP/100 mL	<i>Escherichia coli</i> UFC/100 mL	Coliformes fecais UFC/100 mL
1	0	< 1	<1
2	0	< 1	<1
3	0	< 1	<1

NMP- Número mais provável

UFC- Unidade formadora de colônias

Onde: 1 – água do poço do Município de Queimadas.

2 – permeado do sistema

3 – concentrado do sistema

Tabela 4.66 – Resultados Bacteriológicos da água salobra do poço do Município de Caturité, do permeado e do concentrado do sistema de osmose inversa.

Amostras	Coliformes fecais NMP/100 mL	Bactérias heterótrofas mesófilas UFC/mL
1	0	< 500
2	0	150
3	0	780

NMP- Número mais provável

UFC – Unidade formadora de colônias

Onde: 1 – água do poço do Município de Caturité.

2 – permeado do sistema

3 – concentrado do sistema

CAPÍTULO V

5.0 - CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos para o referido sistema conclui-se o seguinte:

1. A taxa de recuperação do sistema depende da concentração das espécies presentes na solução de alimentação e da pressão aplicada.
2. Os resultados mostraram que a presença de outros ions na solução de alimentação, além de Na^+ e Cl^- , influenciam no desempenho do sistema, como foi o caso da dessalinização das águas de poços.
3. Com os gradientes de pressões aplicados ($\Delta P - \Delta \pi > 3,5 \text{ kgf/cm}^2$), foi possível atingir valores muito próximos para as taxas de rejeições de sais atribuídas pelos fabricantes de membranas.
4. O sistema apresentou uma produção de 1584 L/dia chegando a atingir um valor de 34 % de recuperação para uma solução de cloreto de sódio de 2069 mg/L sob o efeito de uma pressão de 12,4 kgf/cm².
5. Mesmo considerando as perdas de energia, o custo para cada metro cúbico de água potável produzido foi considerado aceitável, de acordo com os valores obtidos na literatura R\$ (0,15 a 1,00)/m³.
6. Os laudos físico-químicos e bacteriológicos do permeado mostram que o sistema, além de rejeitar acima de 90% dos sais, impediu a passagem dos organismos indicadores, oferecendo assim uma água de boa qualidade sanitária, conforme os padrões da Legislação do Ministério de Saúde 36/90.

CAPÍTULO VI

O desenvolvimento deste trabalho mostrou uma grande variedade de perspectivas a serem estudadas, com o propósito de buscar a melhor forma operacional do sistema híbrido. Nesse sentido são sugeridos os seguintes pontos:

1. Coletar durante o processo, amostras do concentrado para cada elemento de membrana, com o objetivo de estimar o perfil de concentração de polarização nas superfícies das membranas.
2. Realizar experimentos fazendo uso de outro tipo de arranjo, como por exemplo: alimentação em paralelo dos dois primeiros elementos e o concentrado destes alimenta o último elemento de membrana.
3. Desenvolver modelos matemáticos que apresentem em função da qualidade da água de alimentação do sistema, o efeito do reciclo parcial do concentrado à corrente de alimentação.
4. Em função da potência da bomba de alta pressão, determinar o número máximo de membrana que o sistema possa operar apresentando menor custo de produção de água potável e consumo de energia.
5. Realizar análises bacteriológicas dos afluentes e efluentes no sentido de estudar a formação de bio-filmes nas superfícies das membranas.
6. Em função da aplicação do trabalho este poderá ser usado diretamente no campo no sentido de beneficiar pequenas comunidades com água de boa qualidade a baixo custo.

CAPÍTULO VII

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAWADHI, A.A., *Pretreatment plant design- Key to succesful reverse osmosis desalination plant*, Desalination, v110, p 1-10, 1997.

AMORIN, M.C.C., Boletim técnico da embrapa/ CPATSA, 1998.

BAKER, J.S, JUDD, S.D & PARSONS, S.A., *Antiscale magnetic pretreatment of reverse osmosis feed water*, Desalination, v110, p 151-166, 1997.

BEARDSLEY, S.S & MINNESOTA. E., *Potable water pos-treatment* In AWWA Seminar on Membrane Processes Principle and Practices, American Water Works Association, p.27-29, June, 1998.

BENNETT, P.B., *Scale and Deposit Control for Reverse Osmosis Systems*, Membrane Tecnology Conference Proceedings, American Water Works Association, New Orleans, LA, p681-693,1997.

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, 1993.

BUROS, O.K., *Desalting as a friendly water treatment process*, Desalting as na Environmentally Friendly Water Treatment Process, nº13, September,1994.

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

DOW LATIN AMERICA., *A tecnologia de membranas de osmose reversa*, boletim técnico, 1996.

DUDLEY, L.Y & DARTON, E.G., *Pretreatment procedures to control biogrowth and scale formation in membrane systems*, *Desalination*, v110, p 11-20, 1997.

FRANÇA, D., *O planeta água está secando*, *Globo Ciência*, v85, p.54-61, 1998.

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

FLUID SYSTEMS CORPORATION, *Ro Pro Version 6.1 da Fluid Systems*, membrane date file, 1997.

HARBERT, A.C., BORGES, C.P. & NOBREGA, R., *Processos de separação com membranas*, Escola Piloto em Engenharia Química, COPPE/UFRJ- Programa de Engenharia Química, 1997.

HYDRANAUTICS, *RO System Design Software*, versão 64(c), 1998.

JAWAD, M.A, EBRAHIM, S. AL-ATRAM.F & AL-SHAMMARI.S., *Pretreatment of the municipal wastewater feed for reverse osmosis plants*, *Desalination*, v109, p 211-223, 1997.

LONSDALE, H. K., *the growth of membrane technology*, *Journal of Membrane Science*, V10.p 81-181, 1992.

MULDER M., *Membrane Process, Basic Principle of Membrane*, Klumer Academic Publishers, Netherlands, 1991.

NISHIMURA, M & KOYAMA, K., *Reverse Osmosis*, In Osada, Y & Nakagowa,T. (ed.), *Membrane Science and Tecnology*, Marcel Dekker, Inc, New York,1992.

- PERREIRA, R.B & SANTOS, J.A., Projeto de dessalinizador por osmose inversa, IX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 1997.
- PRICE, M., *Water from the ground*, New Scientist, nº 42, p1-4, 1991.
- ROSSIN, A.C., *Desinfecção*, Técnica de Abastecimento e Tratamento de Água, 3ª ed, CETESB, p275-301, 1987.
- SILVA, F. T., *Concentração de suco de laranja (Citrus Sinesis) por osmose inversa*, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia alimentos, Campinas, SP, 1995.
- SPERLING, M.V., *Características das águas residuais*, Princípios do tratamento biológico de águas, Introdução a qualidade das águas e os tratamentos de esgotos, v1, 2ª ed, 1996.
- SCOTT, K., *Handbook of Industrial Membranes*, Elsevier advanced technology, 1ª ed, 1997.
- SUDAK, R.G., *Reverse osmosis* In Porter, M.C. (ed.), *Handbook of Industrial Membrane Technology*, Noyel Publications, New Jersey, 1990.
- TAYLOR, J.P. & JACOBS, E.P., *Reverse osmosis and nanofiltration*, In Joel Mallevalle et al (eds.), *Water Treatment Membrane Process*, MC Graw-Hill, New York, 1996.
- WIBERT, M.C., *The Desalting and Water Treatment Membrane Manual: A guide to membranes for municipal water treatment*, nº1, p 44, 1993.

APÊNDICE I

1- ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA

Cloretos: A determinação do cloreto presente na água foi avaliada pelo método da titulação utilizando AgNO_3 0,1 N, e usando como indicador o cromato de potássio (K_2CrO_4) 0,5 N.

Dureza: A determinação da dureza total foi feita pelo método da titulação utilizando EDTA 0,025 N. Para determinação do cálcio foi usado murexida como indicador e hidróxido de potássio (KOH) para elevar o pH a $\approx 11,0$. Para a determinação do magnésio foi utilizado hidróxido de amônia como solução tampão e ericromo como indicador

Alcalinidade: Para determinação da alcalinidade, foi utilizada solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0,02 N, fenoftaleína como indicador de carbonatos (CO_3^{2-}) e alaranjado de metila como indicador de bicarbonatos (HCO_3^-)

Sódio e Potássio: A determinação do sódio e potássio presentes na água, foram determinados através do fotômetro de chama.

2 - ANÁLISE BACTERIOLÓGICA

Os coliformes fecais (CF) foram determinados, utilizando-se o método de membrana filtrante. Para isso, a amostra de água foi agitada energeticamente e alíquotas de 100 ml foram filtradas através de uma membrana de acetato de celulose atóxica, com poros de $45\mu\text{m}$. A membrana foi colocada em placas de Petri com o meio m-FC. As placas foram incubadas durante 24 horas a $44,5 \pm 0,5$ (Para CF) Para as análises de coliformes totais (CT) e escherichia coli (E coli) foi utilizado o método quanty-tray (IDEXX) que se baseia na técnica de tubos múltiplos empregando substratos cromogênicos (ONPG e MUG). Após 24 horas foi realizada a leitura da cartela. As células de cor amarela indicam a contaminação por CT e as que apresentam fluorescência indicam a presença de E.coli.

Para a determinação da bactérias heterótrofas mesófilas (BHM) foi empregado o método de "Espalhamento em placa": 1,0 ml da amostra foi semeado em placas de Petri contendo agar SPC (Dilco) espalhadas com espátulas de Drigalsky e incubadas a

35°C, durante 48 horas após esse período foram contadas as colônias que se desenvolveram.

Todos os testes foram feitos por duplicatas. As colônias típicas foram contadas e calculado o número por 100 ml de amostra.

3.0 - CÁLCULO DO GRADIENTE DE PRESSÃO, PRESSÃO OSMÓTICA E FLUXO DO PERMEADO PARA UMA SOLUÇÃO DE NACL.

Dados:

$$P_s = 5,4 \text{ kgf/cm}^2$$

$$v_i = 2 \text{ (NaCl)}$$

$$P_c = 5,0 \text{ kgf/cm}^2$$

$$R_i = \frac{0,085 \text{ Lkgf}}{\text{cm}^2 \text{ molK}}$$

$$P_p = 1,033 \text{ kgf/cm}^2$$

$$M_{\text{NaCl}} = 58,5 \text{ g/mol}$$

$$C_s = 1,51 \text{ g/L}$$

$$Q_p = 380 \text{ cm}^3/\text{min}$$

$$C_c = 1,65 \text{ g/L}$$

$$A = 5760 \text{ cm}^2$$

$$C_p = 1,81 \times 10^{-2} \text{ g/L}$$

$$T = 298 \text{ K}$$

$$P_s = 5,4 \text{ kgf/cm}^2$$

$$P_c = 5,0 \text{ kgf/cm}^2$$

$$P_p = 1,033 \text{ kgf/cm}^2$$

A partir da Equação 2.6, determinou-se as pressões osmótica da alimentação, concentrado e permeado.

$$\pi = \sum v_i CRT \quad (2.6)$$

$$\pi_s = \frac{2 \times 1,51 \text{ g/L} \times 0,085 \text{ Lkgf/cm}^2 \text{ molK} \times 298 \text{ K}}{58,5 \text{ g/mol}} = 1,31 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\pi_c = \frac{2 \times 1,65 \text{ g/L} \times 0,085 \text{ Lkgf/cm}^2 \text{ molK} \times 298 \text{ K}}{58,5 \text{ g/mol}} = 1,43 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\pi_p = \frac{2 \times 1,81 \times 10^{-2} \text{ g/L} \times 0,085 \text{ Lkgf/cm}^2 \text{ molK} \times 298 \text{ K}}{58,5 \text{ g/mol}} = 0,016 \text{ kgf/cm}^2$$

Com os resultados obtidos das pressões osmótica da alimentação, concentrado e permeado e substituindo na Equação 2.3, determinou-se o gradiente de pressão osmótica.

$$\Delta\pi = \frac{\pi_a + \pi_c}{2} - \pi_p \quad (2.3)$$

$$\Delta\pi = 1,35 \text{ kgf/cm}^2$$

O gradiente de pressão foi determinado a partir da Equação (2.2)

$$\Delta P = \frac{P_a + P_c}{2} - P_p \quad (2.2)$$

$$\Delta P = 4,17 \text{ kgf/cm}^2$$

A partir da Equação 2.1 determinou-se o fluxo do permeado para solução de NaCl

$$J = K_a (\Delta P - \Delta\pi) = \frac{Q_p}{A} \quad (2.1)$$

$$J = 0,066 \text{ cm}^3/\text{cm}^2\text{min}$$

Com os dados obtidos do gradiente de pressão, pressão osmótica e o fluxo, foi determinado o coeficiente de transferência de massa para água a partir da Equação (2.1).

$$K_a = 0,023 \text{ cm}^3/\text{kgf min}$$

APÊNDICE II

Tabela 4.1 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 2,10 \text{ mS/cm}$ (1020 mg/L); $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 0,14 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 3,3 \text{ L/min}$; $Q_p^\# = 0,22 \text{ L/min}$; $Q_c^\# = 3,14 \text{ L/min}$; $R^* = 4,07 \%$; $R^\# = 6,55 \%$, $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada).

Tempo (min)	$Pe^* = 2,1 \text{ kgf/cm}^2$		$Pe^\# = 3,1 \text{ kgf/cm}^2$	
	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
1	0,20	2,07	0,15	2,13
2	0,09	2,06	0,05	2,11
3	0,06	2,06	0,04	2,12
4	0,05	2,07	0,03	2,12
6	0,04	2,05	0,03	2,12
8	0,04	2,06	0,02	2,14
10	0,04	2,06	0,02	2,14

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm^2), R = recuperação em (%), V = volume em (L).

Tabela 4.2 - Condutividade elétrica da solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 2,10 \text{ mS/cm}$ (1020 mg/L); $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 0,37 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 2,9 \text{ L/min}$; $Q_p^\# = 0,44 \text{ L/min}$; $Q_c^\# = 2,80 \text{ L/min}$; $R^* = 11,31 \%$; $R^\# = 13,60 \%$, $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada).

Tempo (min)	$Pe^* = 4,1 \text{ kgf/cm}^2$		$Pe^\# = 5,1 \text{ kgf/cm}^2$	
	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
1	0,09	2,19	0,06	2,45
2	0,03	2,20	0,02	2,57
3	0,02	2,20	0,02	2,56
4	0,02	2,20	0,02	2,56
6	0,02	2,22	0,01	2,56
8	0,02	2,22	0,01	2,57
10	0,02	2,21	0,01	2,57

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min); P = pressão em (kgf/cm^2), R = recuperação em (%), V = volume em (L).

Tabela 4.3 - Condutividade elétrica da solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 2,10$ mS/cm (1020 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^i = 0,97$ L/min; $Q_c^i = 2,30$ L/min; $Q_p^f = 1,1$ L/min; $Q_c^f = 2,20$ L/min; $R^i = 29,67\%$; $R^f = 33,33\%$; $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$Pe^i = 8,4$ kgf/cm ²		$Pe^f = 10,4$ kgf/cm ²	
	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
1	0,05	2,78	0,04	3,19
2	0,04	2,81	0,04	3,21
3	0,03	2,82	0,03	3,22
4	0,02	2,84	0,02	3,23
6	0,02	2,83	0,02	3,23
8	0,02	2,84	0,02	3,23
10	0,02	2,84	0,02	3,23

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L).

Tabela 4.4 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 3,0$ mS/cm (1510 mg/L); $V_t = 45$ l; $Q_p^i = 0,11$ L/min; $Q_c^i = 2,40$ L/min; $Q_p^f = 0,21$ L/min; $Q_c^f = 3,20$ L/min; $R^i = 3,07\%$; $R^f = 6,19\%$; $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$Pe^i = 2,4$ kgf/cm ²		$Pe^f = 3,4$ kgf/cm ²	
	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
1	0,68	3,03	0,55	3,09
2	0,66	3,06	0,19	3,09
3	0,51	3,06	0,09	3,05
4	0,32	3,05	0,07	3,08
6	0,15	3,02	0,06	3,08
8	0,11	3,04	0,06	3,08
10	0,11	3,03		

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L).

Tabela 4.5 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 3,0 \text{ mS/cm}$ (1510 mg/L); $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 0,31 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 3,0 \text{ L/min}$; $Q_p^\# = 0,38 \text{ L/min}$; $Q_c^\# = 2,90 \text{ L/min}$; $R^* = 9,5 \%$; $R^\# = 11,58 \%$, $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$Pe^* = 4,4 \text{ kgf/cm}^2$		$Pe^\# = 5,4 \text{ kgf/cm}^2$	
	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
1	0,24	3,17	0,11	3,26
2	0,06	3,19	0,04	3,26
3	0,04	3,19	0,04	3,27
4	0,04	3,20	0,03	3,27
6	0,04	3,19	0,03	3,26
8	0,04	3,18	0,03	3,36
10	0,04	3,17	0,03	3,26

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L).

Tabela 4.6 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 3,0 \text{ mS/cm}$ (1510 mg/L); $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 0,48 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 2,75 \text{ L/min}$; $Q_p^\# = 0,59 \text{ L/min}$; $Q_c^\# = 2,50 \text{ L/min}$; $R^* = 15,0 \%$; $R^\# = 19,09 \%$, $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$Pe^* = 6,4 \text{ kgf/cm}^2$		$Pe^\# = 7,4 \text{ kgf/cm}^2$	
	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
1	0,07	3,43	0,07	3,64
2	0,03	3,41	0,06	3,67
3	0,03	3,43	0,05	3,67
4	0,03	3,44	0,05	3,68
6	0,02	3,43	0,04	3,69
8	0,02	3,43	0,04	3,69
10	0,02	3,43	0,04	3,69

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L).

Tabela 4.7 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo; $K_i = 3,0$ mS/cm (1510 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p = 0,7$ L/min; $Q_c = 2,40$ L/min ; $P_e = 8,4$ kgf/cm²; $P_s = 8,0$ kgf/cm²; $R = 22,58$ %; $T = 27 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada, s = saída).

Tempo (min)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
1	0,04	3,76
2	0,04	3,76
3	0,04	3,76
4	0,03	3,76
6	0,03	3,77
8	0,03	3,77
10	0,03	3,77

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L).

Tabela 4.8 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,18$ L/min; $Q_c^* = 3,3$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,28$ L/min; $Q_c^{\#} = 3,0$ L/min; $R^* = 5,31$ %; $R^{\#} = 8,54$ %, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$P_e^* = 3,4$ kgf/cm ²		$P_e^{\#} = 4,4$ kgf/cm ²	
	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
1	1,45	4,18	0,35	4,23
2	0,63	4,16	0,13	4,21
3	0,30	4,21	0,10	4,19
4	0,19	4,21	0,09	4,20
6	0,14	4,23	0,09	4,21
8	0,14	4,18	0,09	4,23
10	0,14	4,19	0,09	4,23

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L).

Tabela 4.9 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,36$ L/min; $Q_c^* = 2,9$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,46$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,76$ L/min; $R^* = 11,04$ %; $R^{\#} = 14,28$ %, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$Pe^* = 5,4$ kgf/cm ²		$Pe^{\#} = 6,4$ kgf/cm ²	
	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
1	0,18	4,40	0,10	4,56
2	0,09	4,39	0,06	4,56
3	0,08	4,37	0,06	4,56
4	0,08	4,40	0,06	4,56
6	0,08	4,40	0,06	4,56
8	0,07	4,40	0,06	4,55
10	0,07	4,40	0,06	4,56

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min); P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L).

Tabela 4.10 - Condutividade elétrica da solução de NaCl em função do tempo: $K_i^* = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,50$ L/min; $Q_c^* = 2,6$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,59$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,50$ L/min; $R^* = 16,13$ %; $R^{\#} = 19,03$ %, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$Pe^* = 7,4$ kgf/cm ²		$Pe^{\#} = 8,4$ kgf/cm ²	
	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
1	0,09	4,67	0,08	4,89
2	0,07	4,71	0,05	4,92
3	0,06	4,71	0,05	4,93
4	0,06	4,70	0,06	4,93
6	0,06	4,70	0,05	4,93
8	0,06	4,71	0,05	4,93
10	0,06	4,71	0,05	4,93

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min); P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L).

Tabela 4.11 - Condutividade elétrica da solução de NaCl em função do tempo: $K_i^* = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,97$ L/min; $Q_c^* = 2,3$ L/min; $Q_p^{\#} = 1,1$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,1$ L/min; $R^* = 29,67\%$; $R^{\#} = 34,57\%$, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$Pe^* = 10,4$ kgf/cm ²		$Pe^{\#} = 12,4$ kgf/cm ²	
	Kp (mS/cm)	Kc (mS/cm)	Kp (mS/cm)	Kc (mS/cm)
1	0,07	5,21	0,07	5,67
2	0,07	5,20	0,06	5,69
3	0,06	5,28	0,06	5,69
4	0,06	5,30	0,05	5,69
6	0,06	5,32	0,05	5,69
8	0,06	5,31	0,05	5,69
10	0,06	5,31	0,05	5,69

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L).

Tabela 4.12- Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 5,50$ mS/cm (2932 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,13$ L/min; $Q_c^* = 3,2$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,22$ L/min; $Q_c^{\#} = 3,1$ L/min; $R^* = 3,90\%$; $R^{\#} = 6,77\%$, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$Pe^* = 4,4$ kgf/cm ²		$Pe^{\#} = 5,4$ kgf/cm ²	
	Kp (mS/cm)	Kc (mS/cm)	Kp (mS/cm)	Kc (mS/cm)
1	0,58	5,6	0,43	5,98
2	0,41	5,67	0,27	6,0
3	0,31	5,77	0,21	6,01
4	0,25	5,81	0,19	6,01
6	0,23	5,83	0,17	6,02
8	0,22	5,83	0,16	6,02
10	0,22	5,84	0,16	6,03

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L).

Tabela 4.13 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo; $K_i = 5,50$ mS/cm (2932 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,34$ L/min; $Q_c^* = 2,8$ L/min; $Q_p^\# = 0,41$ L/min; $Q_c^\# = 2,8$ L/min; $R^* = 10,83$ %; $R^\# = 12,77$ %, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$Pe^* = 6,4$ kgf/cm ²		$Pe^\# = 7,4$ kgf/cm ²	
	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
1	0,27	6,12	0,14	6,18
2	0,16	6,15	0,10	6,21
3	0,14	6,16	0,10	6,21
4	0,13	6,16	0,11	6,21
6	0,13	6,14	0,09	6,21
8	0,13	6,14	0,09	6,21
10	0,13	6,14	0,09	6,21

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min); P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L).

Tabela 4.14 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo; $K_i = 5,50$ mS/cm (2932 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p = 0,42$ L/min; $Q_c = 2,60$ L/min ; $Pe = 8,4$ kgf/cm²; $Ps = 8,0$ kgf/cm²; $R = 13,91$ %; $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada, s = saída).

Tempo (min)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
1	0,14	6,83
2	0,11	6,84
3	0,10	6,87
4	0,10	6,87
6	0,10	6,87
8	0,10	6,88
10	0,10	6,88

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min); P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L).

Tabela 4.15 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 7,20$ mS/cm (3938 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,11$ L/min; $Q_c^* = 3,3$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,22$ L/min; $Q_c^{\#} = 3,1$ L/min; $R^* = 3,2$ %; $R^{\#} = 6,63$ %, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$Pe^* = 4,4$ kgf/cm ²		$Pe^{\#} = 5,4$ kgf/cm ²	
	Kp (mS/cm)	Kc (mS/cm)	Kp (mS/cm)	Kc (mS/cm)
1	0,69	7,44	1,33	7,49
2	0,68	7,46	0,98	7,50
3	0,63	7,46	0,62	7,47
4	0,58	7,47	0,41	7,46
6	0,51	7,46	0,33	7,49
8	0,49	7,46	0,32	7,48
10	0,48	7,47	0,32	7,49

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V= volume em (L).

Tabela 4.16 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo: $K_i = 7,20$ mS/cm (3938 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,25$ L/min; $Q_c^* = 3,0$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,30$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,8$ L/min; $R^* = 7,70$ %; $R^{\#} = 9,68$ %, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$Pe^* = 6,4$ kgf/cm ²		$Pe^{\#} = 7,4$ kgf/cm ²	
	Kp (mS/cm)	Kc (mS/cm)	Kp (mS/cm)	Kc (mS/cm)
1	0,68	7,68	0,35	7,77
2	0,39	7,74	0,25	7,80
3	0,26	7,77	0,21	7,81
4	0,23	7,78	0,20	7,84
6	0,24	7,79	0,19	7,86
8	0,24	7,80	0,19	7,86
10	0,24	7,80	0,19	7,86

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V= volume em (L).

Tabela 4.17 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo; $K_i = 7,20 \text{ mS/cm}$ (3938 mg/L); $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p = 0,37 \text{ L/min}$; $Q_c = 2,70 \text{ L/min}$; $P_e = 8,4 \text{ kgf/cm}^2$; $P_s = 8,0 \text{ kgf/cm}^2$; $R = 12,05 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada, s = saída).

Tempo (min)	$K_p(\text{mS/cm})$	$K_c(\text{mS/cm})$
1	0,26	8,23
2	0,21	8,25
3	0,19	8,26
4	0,20	8,26
6	0,18	8,27
8	0,17	8,20
10	0,17	8,25

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L).

Tabela 4.18 - Condutividade elétrica da água salobra do poço do Município de Queimadas em função do tempo: $K_i = 2,20 \text{ mS/cm}$ (1075 mg/L); $P_e = 5,1 \text{ kgf/cm}^2$; $P_s = 5,0 \text{ kgf/cm}^2$; $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p = 0,36 \text{ L/min}$; $Q_c = 2,80 \text{ L/min}$; $R = 11,39$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada).

Tempo (min)	$K_p (\text{mS/cm})$	$K_c (\text{mS/cm})$
1	0,09	2,62
2	0,05	2,63
3	0,04	2,61
4	0,04	2,63
6	0,04	2,66
8	0,04	2,65
10	0,04	2,65

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L).

Tabela 4.19 - Condutividade elétrica da água salobra do poço do Município de Queimadas em função do tempo: $K_i = 2,20 \text{ mS/cm}$ (1075 mg/L); $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 0,97 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 2,30 \text{ L/min}$; $Q_p^\# = 0,98 \text{ L/min}$; $Q_c^\# = 2,20 \text{ L/min}$; $R^* = 29,67 \%$; $R^\# = 30,82 \%$, $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$Pe^* = 8,4 \text{ kgf/cm}^2$		$Pe^\# = 10,4 \text{ kgf/cm}^2$	
	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
1	0,05	2,73	0,04	3,12
2	0,05	2,74	0,03	3,13
3	0,03	2,75	0,03	3,15
4	0,03	2,74	0,03	3,17
6	0,02	2,72	0,02	3,19
8	0,02	2,72	0,02	3,17
10	0,02	2,72	0,02	3,15

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min); P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V= volume em (L).

Tabela 4.20 - Condutividade elétrica da água salobra do poço do Município de Caturité em função do tempo; $K_i = 4,30 \text{ mS/cm}$ (2240 mg/L); $V_t = 45 \text{ L}$; $Pe = 7,4 \text{ kgf/cm}^2$; $Ps = 7,0 \text{ kgf/cm}^2$; $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p = 0,39 \text{ L/min}$; $Q_c = 2,8 \text{ L/min}$; $R = 12,22 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada).

Tempo (min)	K_p (mS/cm)	K_c (mS/cm)
1	0,08	4,89
2	0,05	4,92
3	0,05	4,93
4	0,06	4,93
6	0,04	4,93
8	0,05	4,93
10	0,05	4,93

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min); P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V= volume em (L).

Tabela 4.21 - Condutividade elétrica da água salobra do poço do Município de Caturité em função do tempo: $K_i = 4,30 \text{ mS/cm}$ (2240 mg/L) $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 0,83 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 2,5 \text{ L/min}$; $Q_p^\# = 0,95 \text{ L/min}$; $Q_c^\# = 2,2 \text{ L/min}$; $R^* = 24,62 \%$; $R^\# = 30,16 \%$, $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$P_e^* = 10,4 \text{ kgf/cm}^2$		$P_e^\# = 12,4 \text{ kgf/cm}^2$	
	$K_p \text{ (mS/cm)}$	$K_c \text{ (mS/cm)}$	$K_p \text{ (mS/cm)}$	$K_c \text{ (mS/cm)}$
1	0,10	5,37	0,08	5,78
2	0,08	5,36	0,07	5,78
3	0,07	5,39	0,06	5,78
4	0,07	5,38	0,06	5,80
6	0,06	5,39	0,06	5,80
8	0,06	5,38	0,06	5,82
10	0,06	5,38	0,06	5,85

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L).

Tabela 4.22 - Condutividade elétrica da solução de NaCl e água salobra do poço de Queimadas em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i = 2,20 \text{ mS/cm}$ (1075 mg/L); $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 0,97 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 2,30 \text{ L/min}$; $Q_p^\# = 0,77 \text{ L/min}$; $Q_c^\# = 2,50 \text{ L/min}$; $R^* = 29,67 \%$; $R^\# = 23,55 \%$, $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$P_e = 8,4 \text{ kgf/cm}^2$			$P_e^\# = 8,4 \text{ kgf/cm}^2$		
	$K_{p_1} \text{ (mS/cm)}$	$K_{p_2} \text{ (mS/cm)}$	$K_{p_3} \text{ (mS/cm)}$	$K_{p_1} \text{ (mS/cm)}$	$K_{p_2} \text{ (mS/cm)}$	$K_{p_3} \text{ (mS/cm)}$
1	0,06	0,05	0,03	0,06	0,02	0,02
2	0,05	0,03	0,03	0,05	0,02	0,02
3	0,04	0,02	0,02	0,05	0,01	0,02
4	0,03	0,02	0,02	0,04	0,01	0,01
6	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01
8	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01
10	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L); p_1 = permeado para membrana de HF, p_2 = permeado para membrana de ULP, p_3 = permeado para membrana de HR.

Tabela 4.23 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl e água salobra do poço de Queimadas em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i = 2,20$ mS/cm (1075 mg/L); $V_t^* = 45$ L; $Q_p^* = 1,1$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,98$ L/min; $Q_c = 2,20$ L/min; $R^* = 33,33$ %; $R^{\#} = 30,82$ %, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$P_e^* = 10,4$ kgf/cm ²			$P_e^{\#} = 10,4$ kgf/cm ²		
	K_{p_1} (mS/cm)	K_{p_2} (mS/cm)	K_{p_3} (mS/cm)	K_{p_1} (mS/cm)	K_{p_2} (mS/cm)	K_{p_3} (mS/cm)
1	0,06	0,02	0,02	0,06	0,02	0,02
2	0,05	0,02	0,02	0,05	0,02	0,02
3	0,04	0,01	0,02	0,05	0,02	0,01
4	0,04	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01
6	0,04	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01
8	0,04	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01
10	0,04	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L); p_1 = permeado para membrana de HF, p_2 = permeado para membrana de ULP, p_3 = permeado para membrana de HR.

Tabela 4.24- Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i = 3,0$ mS/cm (1510 mg/L); $V_t = 45$ l; $Q_p^* = 0,59$ L/min; $Q_c^* = 2,50$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,70$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,40$ L/min; $R^* = 19,09$ %; $R^{\#} = 22,58$ %; $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada).

Tempo (min)	$P_e^* = 7,4$ kgf/cm ²			$P_e^{\#} = 8,4$ kgf/cm ²		
	K_{p_1} (mS/cm)	K_{p_2} (mS/cm)	K_{p_3} (mS/cm)	K_{p_1} (mS/cm)	K_{p_2} (mS/cm)	K_{p_3} (mS/cm)
1	0,10	0,04	0,03	0,06	0,03	0,03
2	0,06	0,03	0,03	0,06	0,02	0,02
3	0,06	0,03	0,03	0,06	0,02	0,02
4	0,06	0,03	0,02	0,05	0,02	0,02
6	0,06	0,02	0,02	0,06	0,02	0,02
8	0,06	0,02	0,02	0,05	0,02	0,02
10	0,06	0,02	0,02	0,05	0,02	0,02

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L); p_1 = permeado para membrana de HF, p_2 = permeado para membrana de ULP, p_3 = permeado para membrana de HR.

Tabela 4.25 - Condutividade elétrica da solução de NaCl e água salobra do poço do Município de Caturité em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i^* = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); $K_i^{\#} = 4,30$ mS/cm (2240 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,50$ L/min; $Q_c^* = 2,6$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,39$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,8$ L/min; $R^* = 16,13$ %; $R^{\#} = 12,22$ %, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$P_e^* = 7,4 \text{ kgf/cm}^2$			$P_e^{\#} = 7,4 \text{ kgf/cm}^2$		
	K_{p_1} (mS/cm)	K_{p_2} (mS/cm)	K_{p_3} (mS/cm)	K_{p_1} (mS/cm)	K_{p_2} (mS/cm)	K_{p_3} (mS/cm)
1	0,08	0,05	0,04	0,08	0,07	0,05
2	0,08	0,04	0,04	0,08	0,05	0,05
3	0,08	0,04	0,04	0,08	0,05	0,05
4	0,08	0,04	0,04	0,08	0,05	0,05
6	0,08	0,04	0,04	0,08	0,05	0,05
8	0,08	0,04	0,04	0,08	0,05	0,05
10	0,08	0,04	0,04	0,08	0,05	0,05

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L); p_1 = permeado para membrana de HF, p_2 = permeado para membrana de ULP, p_3 = permeado para membrana de HR.

Tabela 4.26- Condutividade elétrica da solução de NaCl e água salobra do poço do Município de Caturité em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i^* = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); $K_i^{\#} = 4,30$ mS/cm (2240 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,97$ L/min; $Q_c^* = 2,3$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,83$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,5$ L/min; $R^* = 29,67$ %; $R^{\#} = 24,92$ %, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada).

Tempo (min)	$P_e^* = 10,4 \text{ kgf/cm}^2$			$P_e^{\#} = 10,4 \text{ kgf/cm}^2$		
	K_{p_1} (mS/cm)	K_{p_2} (mS/cm)	K_{p_3} (mS/cm)	K_{p_1} (mS/cm)	K_{p_2} (mS/cm)	K_{p_3} (mS/cm)
1	0,09	0,06	0,04	0,12	0,07	0,07
2	0,08	0,05	0,04	0,11	0,06	0,06
3	0,09	0,05	0,04	0,9	0,06	0,05
4	0,09	0,06	0,04	0,08	0,05	0,06
6	0,09	0,05	0,04	0,08	0,05	0,05
8	0,09	0,05	0,04	0,08	0,06	0,05
10	0,09	0,05	0,04	0,08	0,05	0,05

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L); p_1 = permeado para membrana de HF, p_2 = permeado para membrana de ULP, p_3 = permeado para membrana de HR.

Tabela 4.27 - Condutividade elétrica da solução de NaCl e água salobra do poço do município de Caturité em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i^* = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); $K_i^{\#} = 4,30$ mS/cm (2240 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 1,1$ L/min; $Q_c^* = 2,1$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,95$ l/min; $Q_c^{\#} = 2,2$ L/min; $R^* = 34,37$ %; $R^{\#} = 30,16$ %, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$P_e^* = 12,4 \text{ kgf/cm}^2$			$P_e^{\#} = 12,4 \text{ kgf/cm}^2$		
	K_{p_1} (mS/cm)	K_{p_2} (mS/cm)	K_{p_3} (mS/cm)	K_{p_1} (mS/cm)	K_{p_2} (mS/cm)	K_{p_3} (mS/cm)
1	0,07	0,05	0,05	0,09	0,06	0,06
2	0,08	0,04	0,05	0,08	0,05	0,05
3	0,08	0,04	0,05	0,08	0,04	0,05
4	0,08	0,04	0,05	0,08	0,04	0,05
6	0,08	0,04	0,05	0,08	0,04	0,05
8	0,08	0,04	0,05	0,08	0,04	0,05
10	0,08	0,04	0,05	0,08	0,04	0,05

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L); p_1 = permeado para membrana de HF, p_2 = permeado para membrana de ULP, p_3 = permeado para membrana de HR.

Tabela 4.28 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i = 5,50$ mS/cm (2932 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,13$ L/min; $Q_c^* = 3,2$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,22$ L/min; $Q_c^{\#} = 3,1$ L/min; $R^* = 3,90$ %; $R^{\#} = 6,77$ %, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$P_e^* = 4,4 \text{ kgf/cm}^2$			$P_e^{\#} = 5,4 \text{ kgf/cm}^2$		
	K_{p_1} (mS/cm)	K_{p_2} (mS/cm)	K_{p_3} (mS/cm)	K_{p_1} (mS/cm)	K_{p_2} (mS/cm)	K_{p_3} (mS/cm)
1	0,46	0,42	0,35	0,41	0,33	0,29
2	0,28	0,28	0,25	0,20	0,18	0,16
3	0,25	0,25	0,20	0,18	0,16	0,16
4	0,21	0,21	0,20	0,17	0,16	0,15
6	0,20	0,20	0,19	0,16	0,15	0,14
8	0,20	0,20	0,19	0,16	0,15	0,14
10	0,20	0,20	0,19	0,16	0,15	0,14

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L); p_1 = permeado para membrana de HF, p_2 = permeado para membrana de ULP, p_3 = permeado para membrana de HR.

Tabela 4.29 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i = 5,50 \text{ mS/cm}$ (2932 mg/L); $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 0,34 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 2,8 \text{ L/min}$; $Q_p^\# = 0,41 \text{ L/min}$; $Q_c^\# = 2,8 \text{ L/min}$; $R^* = 10,83 \%$; $R^\# = 12,77 \%$, $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$Pe^* = 6.4 \text{ kgf/cm}^2$			$Pe^\# = 7.4 \text{ kgf/cm}^2$		
	K_{p_1} (mS/cm)	K_{p_2} (mS/cm)	K_{p_3} (mS/cm)	K_{p_1} (mS/cm)	K_{p_2} (mS/cm)	K_{p_3} (mS/cm)
1	0,18	0,17	0,15	0,12	0,08	0,07
2	0,14	0,11	0,11	0,13	0,07	0,07
3	0,13	0,10	0,10	0,13	0,07	0,07
4	0,13	0,11	0,11	0,12	0,07	0,07
6	0,13	0,11	0,11	0,12	0,07	0,07
8	0,13	0,11	0,11	0,12	0,07	0,07
10	0,13	0,11	0,11	0,12	0,07	0,07

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P= pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V= volume em (L); p_1 = permeado para membrana de HF, p_2 = permeado para membrana de ULP, p_3 = permeado para membrana de HR.

Tabela 4.30- Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo para os três tipos de membranas; $K_i = 5,50 \text{ mS/cm}$ (2932 mg/L); $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p = 0,42 \text{ L/min}$; $Q_c = 2,60 \text{ L/min}$; $Pe = 8,4 \text{ kgf/cm}^2$; $Ps = 8,0 \text{ kgf/cm}^2$; $R = 13,91 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada, s = saída).

Tempo (min)	K_{p_1} (mS/cm)	K_{p_2} (mS/cm)	K_{p_3} (mS/cm)
1	0,13	0,09	0,08
2	0,12	0,08	0,08
3	0,13	0,08	0,08
4	0,12	0,08	0,07
6	0,12	0,08	0,07
8	0,12	0,08	0,08
10	0,12	0,08	0,07

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P= pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V= volume em (L); p_1 = permeado para membrana de HF, p_2 = permeado para membrana de ULP, p_3 = permeado para membrana de HR.

Tabela 4.31 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i = 7,20$ mS/cm (3938 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,11$ L/min; $Q_c^* = 3,3$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,22$ L/min; $Q_c^{\#} = 3,1$ L/min; $R^* = 3,2$ %; $R^{\#} = 6,63$ %, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$P_e^* = 4,4$ kgf/cm ²			$P_e^{\#} = 5,4$ kgf/cm ²		
	K_{p_1} (mS/cm)	K_{p_2} (mS/cm)	K_{p_3} (mS/cm)	K_{p_1} (mS/cm)	K_{p_2} (mS/cm)	K_{p_3} (mS/cm)
1	0,59	0,53	0,50	0,68	0,60	0,57
2	0,56	0,46	0,47	0,45	0,41	0,39
3	0,52	0,43	0,42	0,38	0,32	0,31
4	0,51	0,41	0,43	0,35	0,30	0,29
6	0,48	0,42	0,42	0,32	0,29	0,29
8	0,47	0,42	0,42	0,32	0,28	0,26
10	0,47	0,42	0,42	0,32	0,27	0,26

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L), p_1 = permeado para membrana de HF, p_2 = permeado para membrana de ULP, p_3 = permeado para membrana de HR.

Tabela 4.32 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo para os três tipos de membranas: $K_i = 7,20$ mS/cm (3938 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,25$ L/min; $Q_c^* = 3,0$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,30$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,8$ L/min; $R^* = 7,70$ %; $R^{\#} = 9,68$ %, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$P_e^* = 6,4$ kgf/cm ²			$P_e^{\#} = 7,4$ kgf/cm ²		
	K_{p_1} (mS/cm)	K_{p_2} (mS/cm)	K_{p_3} (mS/cm)	K_{p_1} (mS/cm)	K_{p_2} (mS/cm)	K_{p_3} (mS/cm)
1	0,34	0,30	0,25	0,25	0,20	0,19
2	0,28	0,21	0,20	0,23	0,17	0,16
3	0,26	0,19	0,19	0,22	0,17	0,17
4	0,26	0,20	0,20	0,22	0,17	0,15
6	0,26	0,20	0,20	0,22	0,16	0,16
8	0,26	0,20	0,20	0,22	0,16	0,16
10	0,25	0,20	0,20	0,22	0,16	0,16

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L), p_1 = permeado para membrana de HF, p_2 = permeado para membrana de ULP, p_3 = permeado para membrana de HR.

Tabela 4.33 - Condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo para os três tipos de membranas; $K_i = 7,20$ mS/cm (3938 mg/L); $V_t = 45$ L; $Q_p = 0,37$ L/min; $Q_c = 2,70$ L/min ; $P_e = 8,4$ kgf/cm²; $P_s = 8,0$ kgf/cm²; $R = 12,05$ %; $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada, s = saída).

Tempo (min)	K_{p_1} (mS/cm)	K_{p_2} (mS/cm)	K_{p_3} (mS/cm)
1	0,23	0,18	0,18
2	0,21	0,16	0,15
3	0,21	0,15	0,16
4	0,20	0,15	0,15
6	0,20	0,15	0,15
8	0,20	0,14	0,14
10	0,20	0,14	0,14

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%), V = volume em (L); p_1 = permeado para membrana de HF, p_2 = permeado para membrana de ULP, p_3 = permeado para membrana de HR.

Tabela 4.36 - Variação da condutividade elétrica de uma solução de NaCl em função do tempo, utilizando o reciclo total sob as seguintes condições: $K_i^* = 3,0$ mS/cm; $K_i^\# = 5,50$ mS/cm; $Q_p^* = 0,28$ L/min; $Q_{pr}^* = 0,25$ L/min; $Q_c^* = 3,0$ L/min; $Q_p^\# = 0,41$; $Q_{pr}^\# = 0,35$ L/min; $Q_c^\# = 2,8$ L/min.

Tempo (min)	$P_e^* = 4,4$ kgf/cm ²		$P_e^\# = 7,4$ kgf/cm ²	
	K_p (mS/cm)	K_{pr} (mS/cm)	K_p (mS/cm)	K_{pr} (mS/cm)
1	0,24	0,18	0,14	0,17
2	0,06	0,09	0,11	0,14
3	0,04	0,07	0,10	0,14
4	0,04	0,07	0,10	0,14
6	0,04	0,07	0,10	0,13
8	0,04	0,08	0,10	0,13
10	0,04	0,08	0,10	0,13
15	—	0,09	—	0,14
18	—	0,08	—	0,15
20	—	0,09	—	0,16

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q_p = vazão do permeado em (L/min), Q_{pr} = vazão do permeado com reciclo em (L/min); Q_c = Vazão do concentrado (L/min); P = pressão em (kgf/cm²).

Tabela 4.37- Condutividade elétricas em função das pressões de alimentação e das recuperações do sistema para soluções de NaCl e águas salobras de poços tubulares.

Ki (mS/cm)	Pe (kgf/cm ²)	R _{NaCl} (%)	R _{poço} (%)
2,10 mS/cm	2,1	4,07	
	3,1	6,55	
	4,1	11,31	
	5,1	16,0	11,39
	8,4	29,67	23,55
	10,4	33,33	30,82
3,0 mS/cm	2,4	3,07	
	3,4	6,16	
	4,4	9,44	
	5,4	14,58	
	6,4	15,0	
	7,4	19,09	
	8,4	22,60	
4,0 mS/cm	3,4	5,31	
	4,4	8,54	
	5,4	<u>11,04</u>	
	6,4	14,28	
	7,4	16,13	12,22
	8,4	19,09	
	10,4	29,67	24,62
	12,4	34,37	30,16

Continua ...

Continuação da Tabela 4.37

5,50 mS/cm	4,4	3,90	
	5,4	<u>6,77</u>	
	6,4	10,83	
	7,4	12,77	
	8,4	14,05	
7,20 mS/cm	4,4	3,51	
	5,4	6,62	
	6,4	7,69	
	7,4	9,68	
	8,4	12,05	

Tabela 4.38- Fluxo do permeado e média da taxa de rejeição de sais em função da gradiente de pressão para uma solução de NaCl, a uma condutividade elétrica inicial de $K_i = 2,10$ mS/cm. e coeficiente de transferência de massa para a água de $K_s = 0,002301$ cm³/kgf min.

Pe (kgf/cm ²)	($\Delta P - \Delta \pi$) (kgf/cm ²)	Jp (cm ³ /cm ² min)	TR (%)
2,1	0,15	0,16	96,30
3,1	1,15	0,04	97,67
4,1	2,27	0,06	98,53
5,1	3,19	0,08	99,04
8,4	6,33	0,17	98,71
10,4	8,03	0,19	98,77

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), P= pressão em (kgf/cm²), Jp = fluxo do permeado em (cm³/cm²min); TR = taxa de rejeição de sais em (%).

Tabela 4.39 - Fluxo do permeado e média da taxa de rejeição de sais em função da gradiente de pressão para uma solução de NaCl e coeficientes de transferências de massa para a água de $K_s = 0,01755$ cm³/kgf min e $0,01922$ cm³/kgf min.

Pe (kgf/cm ²)	K _i = 3,0 mS/cm			K _i = 4,0 mS/cm		
	($\Delta P - \Delta \pi$) (kgf/cm ²)	Jp (cm ³ /cm ² min)	TR (%)	($\Delta P - \Delta \pi$) (kgf/cm ²)	Jp (cm ³ /cm ² min)	TR (%)
2,4	—	—	87,84	—	—	—
3,4	0,90	0,04	94,74	0,48	0,03	89,32
4,4	1,84	0,05	97,62	1,37	0,05	96,64
5,4	2,82	0,07	98,52	2,32	0,06	97,68
6,4	3,77	0,08	98,65	3,27	0,08	98,36
7,4	4,72	0,10	98,33	4,23	0,09	98,35
8,4	5,69	0,12	98,86	5,18	0,10	98,61
10,4	—	—	—	7,09	0,17	98,43
12,4	—	—	—	8,98	0,19	98,64

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), P= pressão em (kgf/cm²), Jp = fluxo do permeado em (cm³/cm²min); TR = taxa de rejeição de sais em (%).

Tabela 4.40 - Fluxo do permeado e média da taxa de rejeição de sais em função do gradiente de pressão para uma solução de NaCl e coeficientes de transferências de massa para a água de $K_s = 0,01608$ e $0,00927 \text{ cm}^3/\text{kgf min}$.

Pe (kgf/cm ²)	Ki = 5,5 mS/cm			Ki = 7,0 mS/cm		
	($\Delta P - \Delta \pi$) (kgf/cm ²)	Jp (cm ³ /cm ² min)	TR (%)	($\Delta P - \Delta \pi$) (kgf/cm ²)	Jp (cm ³ /cm ² min)	TR (%)
4,4	0,68	0,02	91,31	—	—	92,0
5,4	1,59	0,04	95,93	0,09	0,04	91,48
6,4	2,53	0,06	97,21	1,73	0,04	95,48
7,4	3,49	0,07	98,14	2,68	0,05	96,94
8,4	4,33	0,08	98,04	3,56	0,06	97,30

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), P= pressão em (kgf/cm²), Jp = fluxo do permeado em (cm³/cm²min), TR = taxa de rejeição de sais em (%).

Tabela 4.41 - Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: Ki = 2,10 mS/cm (1020 mg/L); pHⁱ = 6,2; pH^t = 6,15; Vt = 45 L; Qpⁱ = 0,97 L/min; Qcⁱ = 2,30 L/min; Qp^e = 1,1 L/min; Qc^e = 2,20 L/min; Rⁱ = 29,67 %; R^e = 33,33 %, T = 26 +/- 2 °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	Pe = 8,4 kgf/cm ²		Pe = 10,4 kgf/cm ²	
	pH (perm)	pH (conc)	pH (perm)	pH (conc)
1	5,62	5,83	5,82	6,31
2	5,63	5,82	5,81	6,35
3	5,66	5,79	5,83	6,41
4	5,66	5,74	5,85	6,37
6	5,63	5,73	5,80	6,35
8	5,62	5,65	5,84	6,33
10	5,60	5,66	5,86	6,40

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), P= pressão em (kgf/cm²), Jp = fluxo do permeado em (cm³/cm²min), TR = taxa de rejeição de sais em (%).

Tabela 4.42 - Potencial hidrogeniônico da água salobra do poço do Município de Queimadas em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 2,20 \text{ mS/cm}$ (1075 mg/L); $\text{pH} = 6,90$; $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 0,97 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 2,30 \text{ L/min}$; $Q_p^\# = 0,98 \text{ L/min}$; $Q_c^\# = 2,20 \text{ L/min}$; $R^* = 29,67 \%$; $R^\# = 30,82 \%$, $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	Pe = 8,4 kgf/cm ²		Pe = 10,4 kgf/cm ²	
	pH (perm)	pH (conc)	pH (perm)	pH (conc)
1	6,01	7,02	6,0	7,47
2	5,98	7,10	5,91	7,42
3	5,87	7,12	5,90	7,41
4	5,88	7,13	5,88	7,41
6	5,88	7,15	5,89	7,42
8	5,86	7,11	5,93	7,47
10	5,89	7,16	5,97	7,49

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), P = pressão em (kgf/cm²), J_p = fluxo do permeado em (cm³/cm².min); TR = taxa de rejeição de sais em (%).

Tabela 4.43 - Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições; $K_i = 3,0 \text{ mS/cm}$ (1510 mg/L); $\text{pH}^* = 6,50$; $\text{pH}^\# = 6,54$; $Q_p^* = 0,59 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 2,50 \text{ L/min}$; $Q_p^\# = 0,7 \text{ L/min}$; $Q_c^\# = 2,40 \text{ L/min}$; $R^* = 19,09 \%$, $R^\# = 22,58 \%$; $T = 27 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada, s = saída).

Tempo (min)	Pe = 7,4 kgf/cm ²		Pe = 8,4 kgf/cm ²	
	pH (perm)	pH (conc)	pH (perm)	pH (conc)
1	6,36	6,87	6,26	6,93
2	6,41	6,96	6,31	6,91
3	6,36	6,89	6,28	6,89
4	6,44	6,92	6,32	6,87
6	6,41	7,0	6,41	6,97
8	6,26	7,0	6,44	6,92
10	6,30	7,1	6,43	6,94

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min); P = pressão em (kgf/cm²); R = recuperação em (%).

Tabela 4.44 - Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); $pH = 6,20$; $V_t = 45$ l; $Q_p^* = 0,18$ L/min; $Q_c^* = 3,3$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,28$ L/min; $Q_c^{\#} = 3,0$ L/min; $R^* = 5,31$ %; $R^{\#} = 8,54$ %, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$Pe = 3,4$ kgf/cm ²		$Pe = 4,4$ kgf/cm ²	
	pH (perm)	pH (conc)	pH (perm)	PH (conc)
1	5,91	6,07	6,22	6,33
2	5,95	6,07	6,24	6,45
3	5,98	6,30	6,33	6,58
4	5,99	6,35	6,35	6,84
6	6,00	6,33	6,33	6,62
8	6,05	6,16	6,23	6,72
10	6,00	6,20	6,30	6,60

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²); R = recuperação em (%).

Tabela 4.45 - Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); $pH^* = 6,0$; $pH^{\#} = 6,5$; $V_t = 45$ l; $Q_p^* = 0,36$ L/min; $Q_c^* = 2,9$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,46$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,76$ L/min; $R^* = 11,04$ %; $R^{\#} = 14,28$ %, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$Pe = 5,4$ kgf/cm ²		$Pe = 6,4$ kgf/cm ²	
	pH (perm)	pH (conc)	pH (perm)	pH (conc)
1	6,68	7,13	6,10	6,22
2	6,40	6,57	5,98	6,33
3	6,42	6,55	5,97	6,26
4	6,42	6,52	5,96	6,24
6	6,37	6,58	5,95	6,25
8	6,49	6,74	5,97	6,30
10	6,52	6,65	5,97	6,31

Tabela 4.46 - Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); pH = 6,60; $V_t = 45$ l; $Q_p^* = 0,50$ L/min; $Q_c^* = 2,6$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,59$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,50$ L/min; $R^* = 16,13$ %; $R^{\#} = 19,03$ %, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	Pe = 7,4 kgf/cm ²		Pe = 8,4 kgf/cm ²	
	pH (perm)	pH (conc)	pH (perm)	pH (conc)
1	6,59	6,79	6,36	6,98
2	6,60	6,88	6,41	7,0
3	6,60	6,97	6,38	7,07
4	6,43	6,91	6,45	7,08
6	6,40	7,01	6,48	7,04
8	6,35	7,03	6,42	7,06
10	6,38	7,03	6,44	7,05

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²); R = recuperação em (%).

Tabela 4.47 - Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 4,0$ mS/cm (2069 mg/L); pH = 6,10; $V_t = 45$ l; $Q_p^* = 0,97$ L/min; $Q_c^* = 2,3$ L/min; $Q_p^{\#} = 1,1$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,1$ L/min; $R^* = 29,67$ %; $R^{\#} = 34,57$ %, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	Pe = 10,4 kgf/cm ²		Pe = 12,4 kgf/cm ²	
	pH (perm)	pH (conc)	pH (perm)	pH (conc)
1	5,93	7,0	5,67	7,01
2	5,90	7,01	5,69	7,05
3	5,97	7,02	5,69	7,07
4	5,98	7,04	5,69	7,08
6	5,93	7,04	5,69	7,09
8	5,90	7,06	5,69	7,09
10	5,90	7,07	5,69	7,09

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²); R = recuperação em (%).

Tabela 4.48- Potencial hidrogeniônico da água salobra do poço do Município de Caturité em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 4,30 \text{ mS/cm}$ (**2240 mg/L**); $\text{pH} = 7,2$; $V_t = 45 \text{ l}$; $Q_p^* = 0,39 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 2,80 \text{ L/min}$; $Q_p^\# = 0,83 \text{ L/min}$; $Q_c^\# = 2,50 \text{ L/min}$; $R^* = 12,22 \%$; $R^\# = 24,92 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada).

Tempo (min)	$Pe = 7,4 \text{ kgf/cm}^2$		$Pe = 10,4 \text{ kgf/cm}^2$	
	pH (perm)	pH (conc)	pH (perm)	pH (conc)
1	6,26	7,73	6,49	7,89
2	6,24	7,75	6,52	8,07
3	6,31	7,89	6,63	7,89
4	6,22	7,88	6,62	8,12
6	6,44	7,79	6,50	8,01
8	6,36	7,80	6,56	7,93
10	6,40	7,81	6,60	7,95

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min); P = pressão em (kgf/cm²); R = recuperação em (%).

Tabela 4.49- Potencial hidrogeniônico da água salobra do poço do Município de Caturité em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 4,30 \text{ mS/cm}$ (**2240 mg/L**); $\text{pH} = 7,2$; $V_t = 45 \text{ l}$; $Q_p = 0,95 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 2,20 \text{ L/min}$; $R = 30,16 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada).

Tempo (min)	pH (perm)	pH (conc)
1	6,50	7,85
2	6,30	7,83
3	6,34	7,86
4	6,36	7,84
6	6,27	7,84
8	6,23	7,86
10	6,23	7,85

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm); Q = vazão em (L/min); P = pressão em (kgf/cm²); R = recuperação em (%).

Tabela 4.50 - Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 5,50$ mS/cm (2932 mg/L); pH = 6,24; $V_t = 45$ l; $Q_p^* = 0,13$ L/min; $Q_c^* = 3,2$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,22$ L/min; $Q_c^{\#} = 3,1$ L/min; $R^* = 3,90$ %; $R^{\#} = 6,77$ %, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	Pe = 4,4 kgf/cm ²		Pe = 5,4 kgf/cm ²	
	pH (perm)	pH (conc)	pH (perm)	pH (conc)
1	5,90	6,10	6,2	6,1
2	5,90	6,00	6,1	6,1
3	6,00	6,00	6,0	6,0
4	5,90	6,00	6,0	6,2
6	5,80	6,00	6,0	6,2
8	6,00	6,00	6,0	6,1
10	6,00	6,00	6,1	6,1

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min); P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%).

Tabela 4.51 - Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 5,50$ mS/cm (2932 mg/L); pH = 6,13; $V_t = 45$ L; $Q_p^* = 0,34$ L/min; $Q_c^* = 2,8$ L/min; $Q_p^{\#} = 0,41$ L/min; $Q_c^{\#} = 2,8$ L/min; $R^* = 10,83$ %; $R^{\#} = 12,77$ %, $T = 26 \pm 2$ °C (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	Pe = 6,4 kgf/cm ²		Pe = 7,4 kgf/cm ²	
	pH (perm)	pH (conc)	pH (perm)	pH (conc)
1	6,1	6,1	5,64	6,47
2	6,1	6,1	5,74	6,50
3	6,1	6,0	5,89	6,59
4	5,9	6,1	5,92	6,6
6	5,9	6,2	5,81	6,66
8	5,9	6,1	6,08	6,66
10	5,9	6,1	6,0	6,70

Onde: K = condutividade elétrica em mS/cm, Q = vazão em L/min; P = pressão em (kgf/cm²); R = recuperação em (%).

Tabela 4.52 - Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 5,50 \text{ mS/cm}$ (2932 mg/L); $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p = 0,42 \text{ L/min}$; $Q_c = 2,60 \text{ L/min}$; $P_e = 8,4 \text{ kgf/cm}^2$; $P_s = 8,0 \text{ kgf/cm}^2$; $R = 13,91 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada, s = saída).

Tempo (min)	pH (perm)	pH (conc)
1	6,31	6,9
2	6,40	7,0
3	6,44	7,05
4	6,49	7,03
6	6,62	7,01
8	6,59	7,1
10	6,60	7,0

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min), P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%).

Tabela 4.53 - Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 7,20 \text{ mS/cm}$ (3938 mg/L); $\text{pH} = 6,87$; $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 0,11 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 3,3 \text{ L/min}$; $Q_p^{\#} = 0,22 \text{ L/min}$; $Q_c^{\#} = 3,1 \text{ L/min}$; $R^* = 3,2 \%$; $R^{\#} = 6,63 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$P_e = 4,4 \text{ kgf/cm}^2$		$P_e = 5,4 \text{ kgf/cm}^2$	
	pH (perm)	pH (conc)	pH (perm)	pH (conc)
1	6,77	7,13	6,77	7,10
2	6,80	7,12	6,86	7,11
3	6,67	7,18	6,76	7,12
4	6,52	7,14	6,87	7,03
6	6,76	7,15	6,91	7,23
8	6,74	7,16	6,85	7,20
10	6,75	7,17	6,87	7,17

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min); P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%).

Tabela 4.54 - Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 7,20 \text{ mS/cm}$ (3938 mg/L); $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p^* = 0,25 \text{ L/min}$; $Q_c^* = 3,0 \text{ L/min}$; $Q_p^\# = 0,30 \text{ L/min}$; $Q_c^\# = 2,8 \text{ L/min}$; $R^* = 7,70 \%$; $R^\# = 9,68 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada)

Tempo (min)	$Pe = 6,4 \text{ kgf/cm}^2$		$Pe = 7,4 \text{ kgf/cm}^2$	
	pH (perm)	pH (conc)	pH (perm)	pH (conc)
1	6,28	6,92	6,91	6,99
2	6,15	6,96	7,0	7,05
3	6,14	7,06	6,85	7,29
4	6,14	7,08	6,77	7,0
6	6,31	7,09	6,57	7,25
8	6,59	7,09	6,49	7,02
10	6,60	7,14	6,51	7,0

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min); P = pressão em (kgf/cm²), R = recuperação em (%).

Tabela 4.55 - Potencial hidrogeniônico de uma solução de NaCl em função do tempo, sob as seguintes condições: $K_i = 7,20 \text{ mS/cm}$ (3938 mg/L); pH = 6,74; $V_t = 45 \text{ L}$; $Q_p = 0,37 \text{ L/min}$; $Q_c = 2,70 \text{ L/min}$; $Pe = 8,4 \text{ kgf/cm}^2$; $Ps = 8,0 \text{ kgf/cm}^2$; $R = 12,05 \%$; $T = 26 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (i = inicial, t = tanque, p = permeado, c = concentrado, e = entrada, s = saída).

Tempo (min)	pH (perm)	pH (conc)
1	6,67	7,14
2	6,70	7,13
3	6,72	7,16
4	6,76	7,1
6	6,74	7,15
8	6,75	7,14
10	6,73	7,15

Onde: K = condutividade elétrica em (mS/cm), Q = vazão em (L/min); P = pressão em (kgf/cm²); R = recuperação em (%).

Tabela 4.63- Resultados das análises físico-químicas para o sistema de osmose inversa utilizando água salobra proveniente do poço do Município de Caturité a uma condutividade elétrica inicial de 4,30 mS/cm e pressão de operação de 7,4 kgf/cm².

Componentes	VMP (mg/L)	Ci (mg/L)	Cp (mg/L)	Cc (mg/L)	TRS (%)
Sódio	—	685,37	24,32	744,54	96,45
Potássio	—	16,34	0,57	18,35	96,51
Cálcio	—	145,29	0,0	150,30	100,0
Magnésio	—	103,33	0,0	145,87	100,0
Dureza Total	500,0	787,50	0,0	975,0	100,0
Hidróxidos	0,0	0,0	0,0	0,0	—
Carbonatos	120,0	108,00	0,0	60,00	00,0
Bicarbonatos	600,0	207,40	36,60	353,80	82,35
Alcalinidade	—	315,40	36,60	413,80	88,39
Total					
Cloretos	250,0	1136,00	88,75	1402,25	92,19
Sulfatos	400,0	28,97	< 0,001	2890,00	≈ 100,0
Sólidos Totais a 105°C		2430,70	—	—	—
Sólidos Totais Dissolvidos	1000,0	2805,00	150,34	2875,11	84,97

Onde: Ci = concentração inicial (mg/L); Cp = concentração do permeado (mg/L); Cc = concentração do concentrado (mg/L); TRS = taxa de rejeição de sais (%); VMP = valores máximos permissíveis.

Tabela 4.64- Resultado experimental e simulado do permeado, utilizando água salobra proveniente do poço do Município de Queimadas para o sistema de osmose inversa a uma condutividade elétrica inicial de 2,20 mS/cm e pressão de operação de 10,4 kgf/cm².

Componentes	VMP (mg/L)	Ci (mg/L)	Ce (mg/L)	Cs (mg/L)	TRSe(%)	TRSS (%)
Sódio	—	317,40	7,89	9,18	97,51	97,11
Potássio	—	35,20	0,45	1,31	98,72	96,28
Cálcio	—	46,00	0,0	0,23	100,0	99,50
Magnésio	—	63,50	0,0	0,32	100,0	99,50
Dureza Total	500,0	375,0	0,0	1,89	100,0	99,50
Hidróxidos	0,0	0,00	0,0	0,0	—	—
Carbonatos	120,0	0,00	0,0	0,0	—	—
Bicarbonatos	600,0	671,0	12,2	19,26	98,18	97,13
Alcalinidade	—	671,0	12,2	19,26	98,18	97,13
Total						
Cloretos	250,0	390,50	8,87	5,61	97,73	98,56
Sulfatos	400,0	24,0	< 0,001	0,06	≈ 100,0	99,75
Sólidos Totais a 105°C		1596,0		35,97		97,74
Sólidos Totais Dissolvidos	1000,0	1547,6	29,41	26,17	98,10	98,31

Onde: Ci = concentração inicial em (mg/L); Ce = concentração experimental do permeado em (mg/L); Cs = concentração do permeado simulado em (mg/L). TRSe = Taxa de rejeição de sais experimental (%); TRSS = Taxa de rejeição de sais simulado; VMP = valores máximos permissíveis.