



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

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO
VIA OSMOSE INVERSA PARA PEQUENAS COMUNIDADES, FAZENDO USO
DE PAINÉIS FOTOVOLTÁICOS**

AILTO BALBINO DE LUCENA FILHO

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA

MARÇO – 2000

ALTO BALBINO DE LUCENA FILHO

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO VIA
OSMOSE INVERSA PARA PEQUENAS CUMUNIDADES, FAZENDO USO DE
PAINÉIS FOTOVOLTÁICOS

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

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: OPERAÇÕES E PROCESSOS

ORIENTADORES: Professor Kepler Borges França (Dr.)
Professor Hervé Michel Laborde (Dr.)

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA
MARÇO - 2000



| | |
|-------|---|
| L953e | <p>Lucena Filho, Ailton Balbino de. Estudo e desenvolvimento de um sistema de dessalinização via osmose inversa para pequenas comunidades, fazendo uso de painéis fotovoltaicos / Ailton Balbino de Lucena Filho. - Campina Grande, 2000. 112 f.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2000. "Orientação : Prof. Dr. Kepler Borges França, Prof. Dr. Hervé Michel Laborde". Referências.</p> <p>1. Dessalinização da Água. 2. Sistema de Dessalinização - Osmose Inversa. 3. Painéis Fotovoltaicos - Energia. 4. Dissertação - Engenharia Química. I. França, Kepler Borges. II. Laborde, Hervé Michel. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 628.165(043)</p> |
|-------|---|

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO
VIA OSMOSE INVERSA PARA PEQUENAS COMUNIDADES, FAZENDO USO
DE PAINÉIS FOTOVOLTAÍCOS**


AILTO BALBINO DE LUCENA FILHO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 31 / 03 / 2000

BANCA EXAMINADORA:



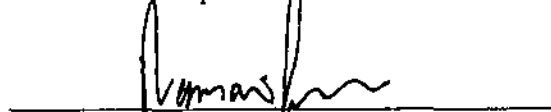
Professor Dr. Kepler Borges França
Orientador



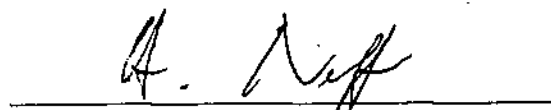
Professor Dr. Hervé Michel Laborde
Orientador



Professor Dr. José Jailson Nicácio Alves
Componente da Banca



Professor Dr. Vicemário Simões
Componente da Banca



Professor Dr. Helmut Franz Neff
Componente da Banca

**CAMPINA GRANDE – PARAÍBA
MARÇO - 2000**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos os meus familiares, em especial à minha mãe, **D. Natividade**, que me acompanha em todos os momentos. À Aninha e Mariana Carla que muito me ajudaram para que este trabalho fosse possível. Dedico-o também aos poetas repentistas populares, que defendem o nosso povo com a engenharia da construção do verso (o repente), em especial a Raimundo Nonato e Nonato Costa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a **Deus** que possui todo o conhecimento e que nos dá um pouco dele para que possamos compreender os seus desígnios e usar este conhecimento em prol da grandeza do espírito humano.

Ao amigo e professor orientador Kepler Borges França, pela paciência e transmissão sincera de conhecimentos que nos foi dada. Está de parabéns pelo grande empenho em aplicar os conhecimentos de engenharia química como o é a osmose inversa a tão sofrida Região Nordeste do Brasil.

Ao professor orientador Hervé Michel Laborde, que sempre teve o maior empenho em fazer-me entender mais sobre energia fotovoltaica associada à osmose inversa. Sou-lhe grato pelo grande interesse em transmitir seus conhecimentos, talvez mostrando desta forma que nenhum educador deva ficar com o conhecimento guardado para si.

Aos amigos e colegas de curso Izolda, Cristiane, Wilma e Francinaldo.

Aos professores: Luís Vasconcelos, Severino Neto, Severino Emenegildo, Odelsia Alsina, Flávio Honorato, Eudésio Villar, José Raimundo, Meiry Gláucia, Helmut Franz Neff.

Ao povo brasileiro, que através da CAPES, forneceu o financiamento para a realização deste trabalho.

À Maricé e Maria José, pela cordialidade que sempre tiveram para comigo.

A Jean e Manuel Maia, pela grande ajuda na confecção deste trabalho.

Às meus pais.

Aos meus familiares, amigos, colegas de curso.

A Micheline, pelas informações transmitidas.

Ao apoio da Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente.

A Atecel.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo estudar e otimizar o desempenho de um sistema de dessalinização via osmose inversa, onde a energia para o sistema seja a de painéis fotovoltaicos. Para isso foi desenvolvido no Laboratório de Dessalinização do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal da Paraíba, um sistema de pequena escala constituído por três membranas de osmose inversa. O desempenho do sistema foi avaliado para soluções sintéticas de cloreto de sódio de concentração variando de 4,6 até 10519 mg.L⁻¹ e para a pressão aplicada variando de 3 até 15 kgf.cm⁻². Através da variação da potência elétrica fornecida ao sistema e da variação da pressão aplicada ao sistema, foram tomadas medidas de: tensão e corrente elétrica, vazão, condutividade elétrica, pH e pressão de saída. Com os dados obtidos avaliou-se os seguintes parâmetros: potência elétrica, condutividade elétrica, vazão, recuperação, consumo de energia, pH e custo da água dessalinizada. Foi observado, a partir dos dados coletados, que a recuperação do sistema é um parâmetro importante que depende diretamente da concentração do componente presente na solução de alimentação e conseqüentemente da área de transferência de massa de cada elemento de membrana. Em fins deste fato observou-se que:

- com a diminuição da tensão elétrica, houve diminuição da potência elétrica requerida pelo motor e, conseqüentemente, diminuição da energia necessária para o processo.
- com o aumento da pressão, houve um aumento da potência elétrica requerida pelo motor, o consumo de energia diminuiu, a vazão do permeado e a recuperação aumentaram e a condutividade elétrica do permeado diminuiu.
- com o aumento da concentração da solução de alimentação, a vazão do permeado decresceu e o consumo de energia e o custo da água dessalinizada aumentaram.

ABSTRACT

The present work has the objective to study and optimize the performance of a desalination system through reverse osmosis (RO), where the energy for the system comes from photovoltaics panels. For that, it was developed in the Laboratory of Desalination of the Department of Chemical Engineering of the Federal University of Paraiba, a small scale system composed by 3 RO membranes. The performance of the system was evaluated for synthetic solutions of sodium chloride (NaCl) of concentration varying for 4.6 to 10,519 mg.L⁻¹ and for applied pressure varying for 3 to 15 kgf.cm⁻². Through the electric power supplied to the system and through the variation of the applied pressure to the system, it was made a set of measurements: electric tension and current, flow, electric conductivity, pH and output pressure. With the obtained data the following parameters have been evaluated: electric power, electric conductivity, flow, recovery, consumption of energy, pH, and cost of dessalinated water. It was observed that the recovery of the system is a important parameter that depends directly on the concentration of the ionic component in the feeding solution and consequently on the area of mass transfer of each membrane element. Finally it was observed that:

- with the decrease of the electric tension, there was decrease of the electric power requested by the motor and, consequently, decrease of the necessary energy for the process.
- with the increase of the pressure, there was an increase of the electric power requested by the motor, the consumption of energy decreased, the flow of the permeated and the recovery increased and the electric conductivity of the permeated decreased.
- with the increase of the concentration of the feeding solution, the flow of the permeated decreased and the consumption of energy and the cost of the dessalinated water increased.

SUMÁRIO

| | | Página |
|-------------------------|---|---------------|
| SIMBOLOGIA | | |
| LISTA DE TABELAS | | |
| LISTA DE FIGURAS | | |
| CAPÍTULO I | INTRODUÇÃO | 1 |
| CAPÍTULO II | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 2.1 | Processos de separação com membranas | 5 |
| 2.1.1 | Microfiltração | 8 |
| 2.1.2 | Ultrafiltração | 8 |
| 2.1.3 | Nanofiltração | 8 |
| 2.1.4 | Osmose inversa | 9 |
| 2.2 | Vantagens do processo de osmose inversa | 10 |
| 2.3 | Aplicações da osmose inversa | 11 |
| 2.4 | Histórico da osmose inversa | 12 |
| 2.5 | Processos de dessalinização | 13 |
| 2.6 | Classificação das membranas poliméricas | 16 |
| 2.6.1 | Membranas assimétricas | 16 |
| 2.6.2 | Membranas de película fina composta | 17 |
| 2.7 | Configurações geométricas | 18 |
| 2.7.1 | Plano em quadro | 18 |
| 2.7.2 | Elemento enrolado em espiral | 18 |
| 2.7.3 | Tubular | 19 |
| 2.7.4 | Fibras ocas | 19 |

| | | |
|---------------------|---|-----------|
| 2.8 | Pressão osmótica de uma solução iônica | 20 |
| 2.9 | Fluxo de permeado e de soluto | 21 |
| 2.10 | Taxa de rejeição de sais | 22 |
| 2.11 | Recuperação | 22 |
| 2.12 | Balanco de massa e energia no sistema de osmose inversa | 23 |
| 2.13 | Concentração de polarização | 26 |
| 2.14 | Tratamento da água | 27 |
| 2.14.1 | Pré - Tratamento | 27 |
| 2.14.2 | Pós - Tratamento | 28 |
| 2.15 | Consumo de energia | 28 |
| 2.16 | Simulação de processos de osmose inversa | 30 |
| 2.17 | A conversão fotovoltaica | 30 |
| 2.18 | Histórico da conversão fotovoltaica | 32 |
| 2.19 | Aplicações da energia solar fotovoltaica | 34 |
| 2.20 | Sistema de geração fotovoltaico | 34 |
| 2.20.1 | Subsistema de captação energética | 35 |
| 2.20.2 | Subsistema de acumulação | 36 |
| 2.20.3 | Subsistema de regulação | 38 |
| 2.20.4 | Subsistema de adaptação de corrente | 39 |
| 2.21 | Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos | 40 |
| 2.22 | Custo da energia fotovoltaica | 45 |
| CAPÍTULO III | MATERIAIS E MÉTODOS | 47 |
| 3.1 | Equipamentos | 47 |
| 3.1.1 | Sistemas de osmose inversa | 47 |
| 3.1.1.1 | Subsistema hidráulico | 49 |
| 3.1.1.2 | Subsistema de geração de energia | 49 |
| 3.1.1.3 | Subsistema de unidades de registro | 50 |
| 3.2 | Metodologia | 51 |

| | | |
|--------------------|---|-----------|
| 3.2.1 | 1ª Etapa: Determinação de Q_p e Q_c ; P_c ; I ; K_a , K_p e K_c ; pH_a , pH_p e pH_c ; e de T_a . | 51 |
| 3.2.2 | 2ª Etapa: Determinação da potência mínima | 52 |
| 3.3 | Determinação de parâmetros | 54 |
| 3.3.1 | Condutividade elétrica e potencial hidrogeniônico | 54 |
| 3.3.2 | Potência elétrica | 54 |
| 3.3.3 | Consumo de energia experimental e teórico | 54 |
| 3.3.4 | Custo da água dessalinizada | 54 |
| 3.3.5 | Temperatura de operação | 54 |
| CAPÍTULO IV | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 55 |
| 4.1 | Variação do potencial hidrogeniônico com a pressão | 55 |
| 4.2 | Variação da condutividade elétrica com a pressão | 56 |
| 4.3 | Variação da vazão do permeado e concentrado com a pressão | 58 |
| 4.4 | Variação da vazão do permeado (e recuperação) com a concentração de alimentação | 61 |
| 4.5 | Variação da potência elétrica com a pressão | 63 |
| 4.6 | Variação da potência elétrica com a tensão elétrica | 65 |
| 4.7 | Variação da energia com a tensão elétrica | 66 |
| 4.8 | Variação da energia com a pressão | 68 |
| 4.9 | Custo da água dessalinizada | 71 |
| CAPÍTULO V | CONCLUSÕES | 74 |
| CAPÍTULO VI | PERSPECTIVAS | 75 |

| | | |
|---------------------|--|-----------|
| CAPÍTULO VII | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 76 |
| APÊNDICE I | Dimensionamento de um sistema de energia solar para osmose inversa | 81 |
| APÊNDICE II | Comunidades carentes de água potável e de energia elétrica | 87 |
| APÊNDICE III | Tabelas referentes aos gráficos do Capítulo IV | 89 |

SIMBOLOGIA

| | |
|---------------|---|
| A | Área efetiva da membrana (cm^2) |
| AM | Amperímetro |
| ΔC | Gradiente de concentração (mg.L^{-1}) |
| C_a | Concentração da alimentação (mg.L^{-1}) |
| CAD | Custo da água dessalinizada ($\text{R}\$.m^{-3}$) |
| C_b | Concentração no seio da solução (mg.L^{-1}) |
| C_c | Concentração do concentrado (mg.L^{-1}) |
| C_{1b} | Custo de uma bateria (R\$) |
| CE_b | Custo da energia devido às baterias (R\$) |
| C_c | Custo dos equipamentos de energia solar (R\$) |
| CE_c | Custo da energia devido aos equipamentos de energia solar ($\text{R}\$.kWh^{-1}$) |
| CE_p | Custo da energia devido aos painéis ($\text{R}\$.kWh^{-1}$) |
| CE_{pv} | Custo da energia fotovoltaica (R\$) |
| c_i | Concentração molar do íon i (mol.L^{-1}) |
| C_o | Custo do sistema de osmose inversa (R\$) |
| C_p | Concentração do permeado (mg.L^{-1}) |
| C_{1p} | Custo de um painel (R\$) |
| C_s | Concentração da solução na superfície da membrana (mg.L^{-1}) |
| D_a | Duração de autonomia de carga (dias) |
| E | Energia (kWh.m^{-3}) |
| ΔE | Energia interna (J.kg^{-1}) |
| E_{1p} | Energia fornecida por um painel (kWh.dia^{-1}) |
| E_{ca} | Consumo de energia em corrente alternada (kWh.dia^{-1}) |
| E_{cc} | Consumo de energia em corrente contínua (kWh.dia^{-1}) |
| E_{exp} | Consumo de energia experimental na osmose inversa (kWh.m^{-3}) |
| E_t | Consumo total de energia (kWh.dia^{-1}) |
| $E_{teórico}$ | Consumo de energia teórico na osmose inversa (kWh.m^{-3}) |

| | |
|---|---|
| ΣF | Atrito total do fluido ($J.kg^{-1}$) |
| F_b | Vida útil de uma bateria (dias) |
| F_c | Vida útil dos equipamentos de energia solar (dias) |
| F_o | Vida útil do sistema de osmose inversa (dias) |
| F_p | Vida útil de um painel (dias) |
| g | Duração de insolação com irradiação de $1 kW.m^{-2}$ ($h.dia^{-1}$) |
| g_c | Constante gravitacional ($kg.m.s^{-2}.N^{-1}$) |
| g_g | Aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$) |
| H_{ca} | Duração de funcionamento do equipamento i de ca ($h.dia^{-1}$) |
| H_{cc} | Duração de funcionamento do equipamento i de cc ($h.dia^{-1}$) |
| I | Corrente elétrica (A) |
| $I_3; I_5; I_7; I_9;$ $I_{11}; I_{13}; I_{15}$ | Corrente elétrica para as pressões de 3; 5; 7; 9; 11; 13; 15 $kgf.cm^{-2}$, respectivamente (A) |
| I_{pmax} | Corrente no ponto de potência máxima (A) |
| I_{sc} | Corrente de curto circuito (A) |
| J_i | Taxa de fluxo de soluto ($g.cm^{-2}.s^{-1}$) |
| J_w | Taxa de fluxo de solvente ($cm^3.cm^{-2}.s^{-1}$) |
| K | Condutividade elétrica de uma solução iônica ($mho.cm^{-1}$ ou $S.cm^{-1}$) |
| K_n | Condutividade elétrica da solução de alimentação ($\mu S.cm^{-1}$) |
| K_c | Condutividade elétrica do concentrado ($\mu S.cm^{-1}$) |
| $kgf.cm^{-2}$ | Unidade de pressão inglesa ($1,0335 kgf.cm^{-2} = 101,325 kN.m^{-2}$) |
| k_i | Coefficiente de transferência de massa do soluto ($cm.s^{-1}$) |
| K_p | Condutividade elétrica do permeado ($\mu S.cm^{-1}$) |
| k_w | Coefficiente de transferência de massa do solvente ($cm^2.g^{-1}.s^{-1}$) |
| kWh | Quilowatt-hora, unidade de energia |
| M | Profundidade de descarga máxima de uma bateria (%) |
| min | Minuto |
| MM | Manômetro |
| M_s | Margem de segurança de captação de energia pelos painéis (%) |
| N_{ca} | Número de equipamentos do tipo i de ca (adimensional) |
| N_{cc} | Número de equipamentos do tipo i de cc (adimensional) |

| | |
|------------------|--|
| N_p | Número de painéis para a instalação fotovoltaica (adimensional) |
| P | Potência elétrica (W) |
| ΔP | Gradiente de pressão (kgf.cm^{-2}) |
| P_a | Pressão de alimentação do sistema (kgf.cm^{-2}) |
| P_{a1}, P_{a2} | Pressão nos pontos 1 e 2, respectivamente do sistema da Figura 2.3 (kgf.cm^{-2}) |
| P_c | Pressão do concentrado do sistema (kgf.cm^{-2}) |
| P_{ca} | Potência elétrica do equipamento i de corrente alternada (W) |
| P_{cc} | Potência elétrica do equipamento i de corrente contínua (W) |
| pH | Potencial hidrogeniônico (adimensional) |
| pH_a | Potencial hidrogeniônico da solução de alimentação (adimensional) |
| pH_c | Potencial hidrogeniônico do concentrado (adimensional) |
| pH_p | Potencial hidrogeniônico do permeado (adimensional) |
| P_p | Pressão do permeado do sistema (kgf.cm^{-2}) |
| P_{pico} | Potência de pico de um painel (W) |
| ppm | Partes por milhão |
| pv | Painel fotovoltaico |
| Q | Vazão (L.min^{-1}) |
| Q_a | Vazão de alimentação (L.min^{-1}) |
| Q_c | Vazão do concentrado (L.min^{-1}) |
| Q_p | Vazão do permeado (L.min^{-1}) |
| Q_s | Calor trocado pelo sistema (J.kg^{-1}) |
| r | Recuperação do sistema (%) |
| R | Constante universal dos gases ideais ($R = 0,085 \text{ L.kgf.cm}^{-2}.\text{mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$) |
| RM | Rotâmetro |
| S | Siemens, unidade de condutividade elétrica |
| T | Temperatura absoluta (K) |
| T_a | Temperatura da solução de alimentação ($^{\circ}\text{C}$) |

| | |
|---------------------------------|--|
| TDS | Total de sais dissolvidos (mg.L^{-1} ou ppm) |
| TDS _a | Total de sais dissolvidos da alimentação (mg.L^{-1} ou ppm) |
| TDS _c | Total de sais dissolvidos do concentrado (mg.L^{-1} ou ppm) |
| TDS _p | Total de sais dissolvidos do permeado (mg.L^{-1} ou ppm) |
| TPS | Taxa de passagem de sais pela membrana (%) |
| TQ | Tanque |
| TRS | Taxa de rejeição de sais pela membrana (%) |
| T _s | Tensão de trabalho da instalação fotovoltaica (V) |
| V | Tensão elétrica (V) |
| v | Velocidade de escoamento do fluido (m.s^{-1}) |
| ΔV | Diferença de potencial elétrico (V) |
| V ₁ , V ₂ | Volume específico nos pontos 1 e 2 da Figura 2.3 ($\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$) |
| VM | Voltímetro |
| V _{oc} | Tensão de circuito aberto (V) |
| V _{pmáx} | Tensão no ponto de potência máxima (V) |
| VV | Varivolt |
| w | Vazão ponderal (kg.s^{-1}) |
| W _r | Trabalho realizado pelo fluido ou sobre ele (J.kg^{-1}) |
| W _{pico} | Watt-pico, medida de potência máxima de um painel (W) |
| Z | Altura manométrica do fluido (m) |

SÍMBOLOS GREGOS

| | |
|---------------|---|
| β | Coefficiente de concentração de polarização (adimensional) |
| π | Pressão osmótica de uma solução iônica (kgf.cm^{-2}) |
| $\Delta\pi$ | Gradiente de pressão osmótica (kgf.cm^{-2}) |
| ν | Viscosidade cinemática ($\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$) |
| ν_i | Carga elétrica do íon i formado na dissociação do soluto (adimensional) |
| ε | Fator de correção de energia cinética (adimensional) |
| μ | Viscosidade dinâmica ($\text{g.cm}^{-1}.\text{s}^{-1}$) |
| η_b | Eficiência da bomba (%) |

| | |
|--------------------------|--|
| η_i | Eficiência do inversor (%) |
| η_m | Eficiência do motor (%) |
| Δ | Varição (adimensional) |
| ρ_a, ρ_p, ρ_c | Densidade do fluido de alimentação, do permeado e do concentrado, respectivamente (kg.m^{-3}) |

ÍNDICES INFERIORES

| | |
|----|--------------------------|
| a | Alimentação |
| b | Bomba de alta pressão |
| c | Concentrado |
| ca | Corrente alternada |
| cc | Corrente contínua |
| i | Espécie iônica; Inversor |
| m | Motor |
| p | Painel; Permeado |
| t | Total |
| w | Água |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 - Aplicações de processos com membranas (Habert et alii, 1997). | 06 |
| Tabela 2.2 - Principais aplicações da osmose inversa. | 12 |
| Tabela 2.3 - Consumo de água por seres humanos, animais e irrigação. | 14 |
| Tabela 2.4 - Energia consumida pelos processos de destilação e osmose inversa para dessalinização da água do mar (Dias, 1999). | 15 |
| Tabela 2.5 - Potencial de insolação médio mensal de algumas cidades do Brasil (em kWh.m ⁻² .dia ⁻¹), para uma irradiação de 1000 W.m ⁻² . | 44 |
| Tabela 3.1 - Eficiência do motor usado no trabalho experimental. | 50 |
| Tabela 3.2 - Conversão da condutividade elétrica ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) para concentração (mg.L ⁻¹). | 51 |
| Tabela 3.3 - Variação da pressão (P_e), das vazões (Q_p e Q_c) e da corrente elétrica (I), ao variar a pressão. Sistema Experimental I; $V = 220 \text{ V}$; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $K_a = 5500 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (2932 mg.L ⁻¹). | 52 |
| Tabela 3.4 - Variação das vazões do permeado e do concentrado (Q_p e Q_c), da corrente elétrica (I), da condutividade elétrica do permeado e do concentrado (K_p e K_c), ao variar a tensão (ΔV). Sistema Experimental I; $P_a = 9 \text{ kgf.cm}^{-2}$; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $K_a = 5500 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (2932 mg.L ⁻¹). | 53 |
| Tabela 4.1 - Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl. Sistema Experimental I; $K_a = 13,5 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (4,6 mg.L ⁻¹); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta V = 220 \text{ V}$; $\text{pH}_a = 6,36$. | 90 |
| Tabela 4.2 - Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental I; $K_a = 2000 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (969 mg.L ⁻¹); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta V = 220 \text{ V}$; $\text{pH}_a = 6,33$. * Dados não coletados. | 90 |
| Tabela 4.3 - Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema I; $K_a = 3850 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (1984 mg.L ⁻¹); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta V = 220 \text{ V}$; $\text{pH}_a = 7,05$. * Dados não coletados. | 91 |
| Tabela 4.4 - Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental I; $K_a = 5500 \mu\text{S.cm}^{-1}$ | 91 |

| | |
|--|----|
| (2932 mg.L ⁻¹); T _a = 25 ± 1 °C; ΔV = 220 V; pH _a = 6,82. | |
| Tabela 4.5 - Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental I; K _a = 7300 μS.cm ⁻¹ (3998 mg.L ⁻¹); T _a = 25 ± 1 °C; ΔV = 220 V; pH _a = 6,70. * Dados | 92 |
| Tabela 4.6 - Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental I; K _a = 8950 μS.cm ⁻¹ (4998 mg.L ⁻¹); T _a = 25 ± 1 °C; ΔV = 220 V; pH _a = 6,77. * Dados não coletados. | 92 |
| Tabela 4.7 - Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental I; K _a = 10790 μS.cm ⁻¹ (6133 mg.L ⁻¹); T _a = 25 ± 1 °C; ΔV = 220 V; pH _a = 6,74. * Dados não coletados. | 93 |
| Tabela 4.8 - Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental I; K _a = 17280 μS.cm ⁻¹ (10272 mg.L ⁻¹); T _a = 25 ± 1 °C; ΔV = 220 V; pH _a = 6,80. * Dados não coletados. | 93 |
| Tabela 4.9 - Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental II; K _a = 163 μS.cm ⁻¹ (62 mg.L ⁻¹); T _a = 25 ± 1 °C; ΔV = 220 V; pH _a = 7,86. * Dados não coletados. | 94 |
| Tabela 4.10 - Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental II; K _a = 2010 μS.cm ⁻¹ (974 mg.L ⁻¹); T _a = 25 ± 1 °C; ΔV = 220 V; pH _a = 7,81. * Dados não coletados. | 94 |
| Tabela 4.11 - Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental II; K _a = 3840 μS.cm ⁻¹ (1979 mg.L ⁻¹); T _a = 25 ± 1 °C; ΔV = 220 V; pH _a = 7,75. * Dados não coletados. | 94 |
| Tabela 4.12 - Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental II; K _a = 8790 μS.cm ⁻¹ (4900 mg.L ⁻¹); T _a = 25 ± 1 °C; ΔV = 220 V; pH _a = 7,58. * Dados não coletados. | 95 |
| Tabela 4.13 - Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental II; K _a = 17660 μS.cm ⁻¹ (10519 mg.L ⁻¹); T _a = 25 ± 1 °C; ΔV = 220 V; pH _a = 7,86. * Dados não | 95 |

| | |
|--|-----|
| coletados. | |
| Tabela 4.14 - Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental I; $K_a = 13,5 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($4,6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 95 |
| Tabela 4.15 - Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental I; $K_a = 2000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($969 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 96 |
| Tabela 4.16 - Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental I; $K_a = 3850 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($1984 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 97 |
| Tabela 4.17 - Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental I; $K_a = 5500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($2932 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 97 |
| Tabela 4.18 - Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental I; $K_a = 7300 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($3998 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 98 |
| Tabela 4.19 - Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental I; $K_a = 8950 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($4998 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 98 |
| Tabela 4.20 - Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental I; $K_a = 10790 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($6133 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 99 |
| Tabela 4.21 - Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental I; $K_a = 17280 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($10272 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. * Dados não coletados. | 99 |
| Tabela 4.22 - Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental II; $K_a = 163 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($62 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. * Dados não coletados. | 100 |
| Tabela 4.23 - Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental II; $K_a = 2010 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($974 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 100 |
| Tabela 4.24 - Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental II; $K_a = 3840 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($1979 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 101 |
| Tabela 4.25 - Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental II; $K_a = 8790 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($4900 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 101 |
| Tabela 4.26 - Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental II; $K_a = 17660 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($10519 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 102 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 4.27 - Variação do pH do permeado e do concentrado com a pressão. Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. * Dados não coletados. | 102 |
| Tabela 4.28 - Variação da condutividade elétrica do permeado e do concentrado com a pressão. Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. * Dados não coletados. | 103 |
| Tabela 4.29 - Variação da vazão do permeado com a pressão. Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. * Dados não coletados. | 103 |
| Tabela 4.30 - Variação da vazão do permeado com a pressão. Sistema Experimental II; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. * Dados não coletados. | 104 |
| Tabela 4.31 - Variação da vazão do permeado e do concentrado com a pressão. Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. * Dados não coletados. | 104 |
| Tabela 4.32 - Variação da vazão do permeado com a concentração de alimentação, para a pressão variando de 3 até 15 kgf.cm^{-2} . Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 105 |
| Tabela 4.33 - Variação da vazão do permeado com a concentração de alimentação, para a pressão variando de 3 até 13 kgf.cm^{-2} . Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 105 |
| Tabela 4.34 - Variação da potência elétrica com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 4,6 até 6133 mg.L^{-1} . Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 106 |
| Tabela 4.35 - Variação da potência elétrica com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 62 até 10519 mg.L^{-1} . Sistema Experimental II; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 106 |
| Tabela 4.36 - Variação da potência elétrica com a tensão elétrica, para a pressão variando de 3 até 15 kgf.cm^{-2} . Sistema Experimental I; $C_a = 2932 \text{ mg.L}^{-1}$; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 107 |
| Tabela 4.37 - Variação da potência elétrica com a tensão elétrica, para a pressão variando de 3 até 13 kgf.cm^{-2} . Sistema Experimental II; $C_a = 1979 \text{ mg.L}^{-1}$; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 108 |
| Tabela 4.38 - Variação da energia com a tensão elétrica, para a pressão variando de 3 até 15 kgf.cm^{-2} . Sistema Experimental I; $C_a = 4,6 \text{ mg.L}^{-1}$; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 109 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 4.39 - Variação da energia com a tensão elétrica, para a pressão variando de 5 até 15 kgf.cm ⁻² . Sistema Experimental I; C _a = 4998 mg.L ⁻¹ ; T _a = 25 ± 1 °C. | 109 |
| Tabela 4.40 - Variação da energia com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 4,6 até 10272 mg.L ⁻¹ . Sistema Experimental I; T _a = 25 ± 1 °C. | 110 |
| Tabela 4.41 - Variação da energia com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 62 até 10519 mg.L ⁻¹ . Sistema Experimental II; T _a = 25 ± 1 °C. | 110 |
| Tabela 4.42 - Variação das energias teórica e experimental com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 4,6 até 4998 mg.L ⁻¹ . Sistema Experimental I; T _a = 25 ± 1 °C. * Dados não coletados. | 111 |
| Tabela 4.43 - Variação das energias teórica e experimental com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 1979 até 4900 mg.L ⁻¹ . Sistema Experimental II; T _a = 25 ± 1 °C. * Dados não coletados. | 111 |
| Tabela 4.44 - Variação do custo da água dessalinizada com a concentração de alimentação, utilizando-se energia convencional e fotovoltaica. Sistema experimental I; T _a = 25 ± 1 °C. | 112 |
| Tabela 4.45 - Variação do custo da água dessalinizada com a concentração de alimentação, utilizando-se energia convencional e fotovoltaica. Sistema experimental II; T _a = 25 ± 1 °C. | 112 |
| Tabela Anexo - Comunidades carentes de água potável e energia elétrica da Paraíba. * Dados não coletados. | 88 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 - Representação esquemática do processo de osmose e osmose inversa. | 09 |
| Figura 2.2 - Modelo de membrana elemento enrolado em espiral. | 19 |
| Figura 2.3 - Sistema Experimental I de osmose inversa constituído por três permeadores em série. | 24 |
| Figura 3.1 - Sistema Experimental I de osmose inversa utilizado na pesquisa. | 48 |
| Figura 4.1 - Variação do pH do permeado e do concentrado com a pressão. pH a $C_a = 4,6 \text{ mg.L}^{-1} \Rightarrow 6,40$; pH a $C_a = 1984 \text{ mg.L}^{-1} \Rightarrow 7,15$; Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 56 |
| Figura 4.2 - Variação da condutividade elétrica do permeado com a pressão. Sistema Experimental I; $K_a = 3850 \text{ } \mu\text{S.cm}^{-1}$; $K_a = 7300 \text{ } \mu\text{S.cm}^{-1}$; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 57 |
| Figura 4.3 - Variação da condutividade elétrica do permeado e do concentrado com a pressão. Sistema Experimental I; $K_a = 13,5 \text{ } \mu\text{S.cm}^{-1}$; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 58 |
| Figura 4.4 - Variação da vazão do permeado com a pressão. Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 59 |
| Figura 4.5 - Variação da vazão do permeado com a pressão. Sistema Experimental II; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 60 |
| Figura 4.6 - Variação da vazão do permeado e do concentrado com a pressão. Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 61 |
| Figura 4.7 - Variação da vazão do permeado com a concentração de alimentação, para a pressão variando de 3 até 15 kgf.cm^{-2} . Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 62 |
| Figura 4.8 - Variação da vazão do permeado com a concentração de alimentação, para a pressão variando de 3 até 13 kgf.cm^{-2} . Sistema Experimental II; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 62 |
| Figura 4.9 - Variação da potência elétrica com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 4,6 até 6133 mg.L^{-1} . Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. | 63 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.10 - Variação da potência elétrica com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 62 até 10519 mg.L ⁻¹ . Sistema Experimental II; T _a = 25 ± 1 °C. | 64 |
| Figura 4.11 - Variação da potência elétrica com a tensão elétrica, para a pressão variando de 3 até 15 kgf.cm ⁻² , para a pressão variando de 3 até 15 kgf.cm ⁻² . Sistema Experimental I; T _a = 25 ± 1 °C. C _a = 2932 mg.L ⁻¹ . | 65 |
| Figura 4.12 - Variação da potência elétrica com a tensão elétrica, para a pressão variando de 3 até 13 kgf.cm ⁻² . Sistema Experimental II; T _a = 25 ± 1 °C. C _a = 1979 mg.L ⁻¹ . | 66 |
| Figura 4.13 - Variação da energia com a tensão elétrica, para a pressão variando de 3 até 15 kgf.cm ⁻² . Sistema Experimental I; T _a = 25 ± 1 °C. C _a = 4,6 mg.L ⁻¹ . | 67 |
| Figura 4.14 - Variação da energia com a tensão elétrica, para a pressão variando de 5 até 15 kgf.cm ⁻² . Sistema Experimental I; T _a = 25 ± 1 °C. C _a = 4998 mg.L ⁻¹ . | 67 |
| Figura 4.15 - Variação da energia com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 4,6 até 10272 mg.L ⁻¹ . Sistema Experimental I; T _a = 25 ± 1 °C. | 69 |
| Figura 4.16 - Variação da energia com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 62 até 10519 mg.L ⁻¹ . Sistema Experimental II; T _a = 25 ± 1 °C. | 70 |
| Figura 4.17 - Variação das energias teórica e experimental com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 4,6 até 4998 mg.L ⁻¹ . Sistema Experimental I; T _a = 25 ± 1 °C. | 70 |
| Figura 4.18 - Variação das energias teórica e experimental com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 1979 até 4900 mg.L ⁻¹ . Sistema Experimental II; T _a = 25 ± 1 °C. | 71 |
| Figura 4.19 - Variação do custo da água dessalinizada com a concentração de alimentação, utilizando-se energia convencional e fotovoltaica. Sistema Experimental I; T _a = 25 ± 1 °C. | 72 |
| Figura 4.20 - Variação do custo da água dessalinizada com a concentração de alimentação, utilizando-se energia convencional e fotovoltaica. Sistema Experimental II; T _a = 25 ± 1 °C. | 73 |

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O acesso à água potável é, desde o início dos tempos, um elemento de fundamental importância para a sobrevivência e o desenvolvimento da espécie humana. Sua função de agente de desenvolvimento econômico e social das nações, sob o binômio qualidade/quantidade, 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 brasileiro (Silveira, 1999).

Mas segundo relatório da ONU (Organização das Nações Unidas), divulgado após a Conferência Internacional Sobre a Água de Paris, realizado em março de 1998, atualmente vive-se uma crise global da maior gravidade e, se os atuais meios de exploração dos recursos hídricos da Terra não forem revistos, 2/3 da população mundial vão passar sede até o ano de 2005. No planeta há 70 regiões em confronto pelo controle de fontes de água potável e cerca de 1 bilhão de pessoas não têm acesso esse tipo de água (França, 1998).

Mas como justificar tal crise se 75% da superfície do planeta é coberta por água? O problema é que 97% da água está nos oceanos e, portanto, é salgada e de difícil utilização. Os outros 3% são de água doce. Desses, 2% estão compactados nas calotas polares em forma de geleiras; 0,3% encontra-se na atmosfera na forma de vapor de água; apenas 0,1% em rios e lagos; e 0,6% de águas subterrâneas completam a água existente no planeta (Mallevalle et alii, 1996).

Associado à pouca água potável disponível no planeta estão alguns fatores que tornam mais crítico o problema da falta de água potável, como:

- O aumento do consumo de água no mundo duplica a cada 20 anos
- 50% da água que abastece as grandes cidades é desperdiçada
- Distribuição desigual
- Salinização e poluição
- Pouca capacidade de acúmulo

Em suma, quando a água existe em certos lugares ela pode estar poluída ou com alto índice de sais dissolvidos, como ocorre na Região Nordeste do Brasil,

especificamente no Polígono das Secas, sendo imprópria para o consumo humano, animal e irrigação (a Organização Mundial de Saúde adota como valor máximo para potabilidade uma água com até 500 mg.L⁻¹ de sais dissolvidos), (World Health Organization, 1984).

Nessa Região, a capacidade de acúmulo de água das barragens e adutoras para captar a água no período das chuvas ainda é muito pequena. A solução geralmente adotada para abastecer a população é usar a água de poços tubulares profundos, mas essa água só é utilizada para algumas finalidades, menos a de cozinhar e beber, por conter, geralmente, alto índice de sais dissolvidos. A outra solução adotada é a compra de água pelas prefeituras e pela própria população, fornecida por caminhões pipa, por um preço que varia de R\$ 5,00 a R\$ 50,00 o metro cúbico de água de má qualidade e sem tratamento algum, que provoca sérias doenças na população (Barbosa, 1997).

Porém, existem tecnologias capazes de tornar essa água potável (isenta de sais, patógenos, metais pesados, organoclorados, etc.) e dentre elas citamos a da osmose inversa, que é uma operação unitária que através de membranas semipermeáveis e com auxílio de um gradiente de pressão converte uma água salobra ou do mar em água potável a um custo bem inferior ao dos processos convencionais de dessalinização, como a destilação, a eletrodialise, etc. (Manual de Dessalinização para Planejadores, 1972). A importância da osmose inversa não se faz presente apenas na dessalinização de águas. Pelo contrário, ela possui aplicações nos mais diferentes ramos de atividades como medicina, química, biotecnologia, indústria alimentícia, tratamento de despejos industriais, etc.

Os estudiosos do problema da água são unânimes em afirmar que a solução para a escassez da água só será conseguida com técnicas e tecnologias conjuntas. Acredita-se que o aumento da capacidade de acúmulo (açudes de pequeno, médio e grande porte), como são a favor autores como Pinto (1985), Almeida (1981), Guerra (1981), Portela & Andrade (1989), o corte de desperdícios, a transposição de bacias (Duarte, 1994, defende que a solução para a seca do Nordeste brasileiro seria a transposição das águas do rio São Francisco) e o uso de água subterrânea seriam a solução para o problema. Mas mesmo com a água de açude ocorre um grande problema que é a sua salinização.

José Milton Benetti Mendes, professor do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo e pesquisador do Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas (Cepas), afirma que a solução mais viável para tentar resolver o grande problema da distribuição de água doce no planeta e em especial na região Nordeste do

Brasil, está na utilização de água subterrânea. Poderia solucionar para sempre esse problema crônico. Segundo ele, cerca de 75% dos núcleos habitacionais com cerca de 20 mil habitantes poderiam ser abastecidos com este tipo de água (França, 1998).

O potencial de insolação da nossa região é da ordem de $1,0 \text{ kW.m}^{-2}$, considerado alto em relação ao de outras Regiões do Brasil. Nesse sentido a idéia de aproveitar esse recurso natural para processos de dessalinização (através da geração de eletricidade nos painéis solares para acionar o sistema de osmose inversa) vem contribuir com a região, onde existem várias localidades de difícil acesso à instalação de rede elétrica (ver Apêndice II) e a água subterrânea disponível geralmente possui alto teor de sais dissolvidos.

Assim, este trabalho tem como objetivo geral estudar um sistema de dessalinização via osmose inversa para aplicação em pequenas comunidades, onde a energia utilizada pelo sistema provenha da conversão fotovoltaica nos painéis solares; e como objetivo específico quantificar parâmetros como tensão e corrente elétrica, condutividade elétrica, vazão, potencial hidrogeniônico e pressão e a partir daí estudar parâmetros como consumo de energia, produção de permeado, custo da água dessalinizada.

Utilizou-se neste trabalho dois sistemas de osmose inversa: os Sistemas Experimentais I e II. O Sistema Experimental I é composto por três elementos de membrana, podendo apresentar uma produção de água potável de até 2000 litros por dia. Esta quantidade de água, se for utilizada apenas para cozinhar e beber, poderá suprir uma comunidade de cerca 400 pessoas (5 L/habitante/dia). O Sistema Experimental II é constituído por um único elemento de membrana, podendo apresentar uma produção de água potável de até 6800 litros por dia (podendo suprir uma comunidade de cerca de 1360 habitantes).

Por se tratar de sistemas simples e de fácil manuseio, sua manutenção tratar-se-á somente da troca dos pré-filtros, tornando-se praticamente nula em função da relação custo/benefício. Em suma, o projeto visa de forma direta contribuir com a melhoria da saúde de comunidades carentes de água de boa qualidade que sofrem com vários tipos de doenças oriundas de águas salobras e poluídas, principalmente durante as grandes estiagens.

Esta pesquisa foi desenvolvida utilizando energia elétrica convencional, porém os resultados podem ser aplicados a sistemas de osmose inversa associada a painéis solares como fonte de energia para o sistema de dessalinização.

Existe na literatura uma forma simples de como dimensionar um sistema de energia solar em função da potência requerida (Ceragioli, 1997), (IDAE, 1995), (Liebenthal et alii, 1994). Assim, a metodologia de dimensionamento é estudada no Capítulo II e no Apêndice I é dado um exemplo prático.

Tendo em vista a grande carência de água potável no Nordeste brasileiro, o Laboratório de dessalinização do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal da Paraíba, com o apoio da Secretaria de 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 para atender às comunidades carentes de água potável. Exemplos deste fato são os trabalhos de Silveira (1999) e Dias (1999).

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1– Processos de separação com membranas

A indústria química é uma indústria de transformação e para se chegar aos produtos finais, com as especificações desejadas, é necessário separar, concentrar e purificar as espécies químicas presentes nas diferentes correntes resultantes dessas transformações. Este, sem dúvida, tem sido um dos maiores desafios da indústria química, desde seus primórdios (Habert et alii, 1997).

A partir do início da década de 70, em adição aos processos clássicos de separação como destilação, filtração, absorção, troca iônica, centrifugação, extração por solvente, cristalização e outros, surge uma nova classe de processos que utilizam membranas como barreira seletiva. De maneira geral, uma membrana é uma barreira que separa duas fases e que restringe, total ou parcialmente o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes nas fases. O termo membrana inclui uma grande variedade de materiais e estruturas (Habert et alii, 1997).

Estes processos apresentam uma série de vantagens que os permite competir com as técnicas clássicas de separação:

- economia de energia
- seletividade
- separação de termolábeis
- simplicidade de operação e de “scale-up”

Os processos de separação por membranas têm sido utilizados nos mais diferentes setores de atividades como na indústria química, com a quebra de azeótropos de uma mistura de solventes orgânicos, até na área médica, com a hemodiálise e a dosagem controlada de remédios, passando pela biotecnologia, indústria de alimentos e farmacêutica

e tratamento de águas industriais e municipais. Na Tabela 2.1 são apresentados exemplos de aplicação de processos com membranas em algumas das áreas acima relacionadas.

Tabela 2.1 - Aplicações de processos com membranas (Habert et alii, 1997).

| AREA | APLICAÇÕES |
|--|--|
| QUÍMICA | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Quebra do azeótropo benzeno/hexano ◆ Recuperação de H_2 – Síntese da amônia ◆ Fracionamento CO_2/CH_4 ◆ Fracionamento do ar |
| BIOTECNOLOGIA E FARMACÊUTICA | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Separação de substâncias termolábeis ◆ Desidratação de etanol ◆ Esterilização de meios de fermentação ◆ Bio-reatores a membranas |
| ALIMENTÍCIA E BEBIDAS | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Concentração de soro de leite e sucos de frutas ◆ Clarificação de vinhos e cervejas |
| TRATAMENTOS DE ÁGUAS | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Dessalinização de águas ◆ Eliminação de traços de orgânicos ◆ Tratamento de esgotos municipais ◆ Dessalinização de águas p/ caldeiras ◆ Água ultrapura p/ indústria eletrônica |
| TRATAMENTO DE DESPEJOS INDUSTRIAIS | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Separação de água/óleo ◆ Recuperação de índigo e PVA – Têxtil ◆ Recuperação de íons metálicos – Couro ◆ Tratamento de água – Papel e Celulose |
| MEDICINA | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Rim artificial – Hemodiálise ◆ Pulmão artificial – Oxigenadores ◆ Esterilização de soluções injetáveis |

Até a alguns anos atrás, as membranas eram unicamente aplicadas como barreiras, de poros bem definidos, pelas quais se obtinha a separação dos contaminantes em virtude do seu tamanho físico. Há alguns anos, porém, pesquisas tendo por finalidade a dessalinização da água do mar levaram a utilização de membranas em que o efeito de

separação é baseado nas propriedades físico-químicas da solução e não apenas no tamanho físico das partículas.

As várias tecnologias de filtração existentes na atualidade podem ser classificadas com base no tamanho das partículas removidas da corrente de alimentação. A macrofiltração convencional de sólidos suspensos é efetuada pela passagem de uma solução de alimentação em uma direção perpendicular ao meio filtrante. Nesse caso, toda a solução atravessa o meio filtrante, criando uma única corrente de saída. Exemplos de tal disposição de filtração incluem filtros de areia, filtros de cartucho, etc. A capacidade de separação da macrofiltração é geralmente limitada a partículas suspensas de tamanho superior a 1 μm .

Para a remoção de partículas pequenas e sais dissolvidos são usados sistemas de separação por membranas, os quais utilizam um método de filtração diferente da filtração convencional: a filtração de fluxo cruzado que é uma corrente de alimentação pressurizada fluindo paralelamente à superfície da membrana. Uma parcela dessa corrente atravessa a membrana, deixando para trás as partículas rejeitadas que se juntam a parcela remanescente da corrente de alimentação. Como existe um fluxo contínuo junto a superfície da membrana, as partículas rejeitadas não se acumulam mas, pelo contrário, são levadas pela corrente que constitui o concentrado. Portanto, uma corrente de entrada ou alimentação é dividida em duas correntes de saída: a solução que passou através da superfície da membrana (permeado) e a corrente concentrada remanescente (concentrado ou rejeito), (Membrane Filtration Systems, 1996).

Existem quatro categorias de filtração de fluxo cruzado: microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI).

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 (membranas) cada vez mais fechados, ou seja, com poros cada vez menores (Dow Latin America, 1996).

2.1.1– Microfiltração

A microfiltração remove partículas na faixa de 0,1 a 1 μm . Geralmente, partículas suspensas e colóides são rejeitados enquanto macromoléculas e sólidos dissolvidos passam através da membrana. As suas aplicações principais incluem remoção de bactérias, materiais floculados ou sólidos suspensos.

2.1.2– Ultrafiltração

A ultrafiltração permite a separação de macromoléculas e de partículas na faixa de 0,002 a 0,1 μm . Novamente ocorre a passagem de moléculas menores e de todos os sais dissolvidos através da superfície da membrana. Os materiais rejeitados pela membrana incluem colóides, proteínas, contaminantes microbiológicos e grandes moléculas orgânicas.

2.1.3 – Nanofiltração

A nanofiltração compreende um processo de membranas especial, no qual as partículas rejeitadas situam-se na faixa de 1 nanometro. Este processo atua no setor entre a ultrafiltração e a osmose inversa. Todas as moléculas orgânicas com elevado peso molecular são rejeitadas. Além disso, sais dissolvidos constituídos por ânions monovalentes têm taxas de rejeição da ordem de 20 a 80%, enquanto que os constituídos por ânions bivalentes possuem taxas de rejeição da ordem de 90 a 98%. Algumas das aplicações típicas incluem a remoção de compostos orgânicos de águas superficiais, remoção de dureza de águas tratadas e redução de sólidos totais dissolvidos, especialmente em aplicações de tratamento de efluentes industriais.

2.1.4 – Osmose inversa

A osmose inversa é uma operação unitária que através de membranas semipermeáveis e com o auxílio de um gradiente de pressão, pode reter sais inorgânicos de baixo peso molecular, como também pequenas moléculas orgânicas (mesmo estes podendo ter dimensões menores que as da água, não passam pelos poros da membrana porque sofrem hidratação, aumentando assim o seu tamanho). As moléculas de água, por outro lado, passam livremente através da superfície da membrana, criando uma corrente de água purificada. O nome osmose inversa se deve ao fato de que neste tipo de processo o fluxo permeado se dá no sentido contrário ao do fluxo osmótico normal.

Quando uma solução de um determinado soluto é separada do solvente puro ou de uma solução de menor concentração, através de uma membrana semipermeável, haverá um fluxo de solvente no sentido do solvente puro para a solução ou da solução diluída para a solução concentrada até que as duas soluções atinjam o equilíbrio osmótico. O fluxo se processa porque a solução menos concentrada encontra-se em um estado de energia mais elevada (o solvente tende a diluir a solução concentrada, obedecendo à lei de Fick).

Neste ponto, o nível da coluna de solução do lado da solução mais concentrada estará acima do correspondente à coluna do lado da solução mais diluída. A esta diferença entre colunas de solução denominou-se pressão osmótica (Figura 2.1).

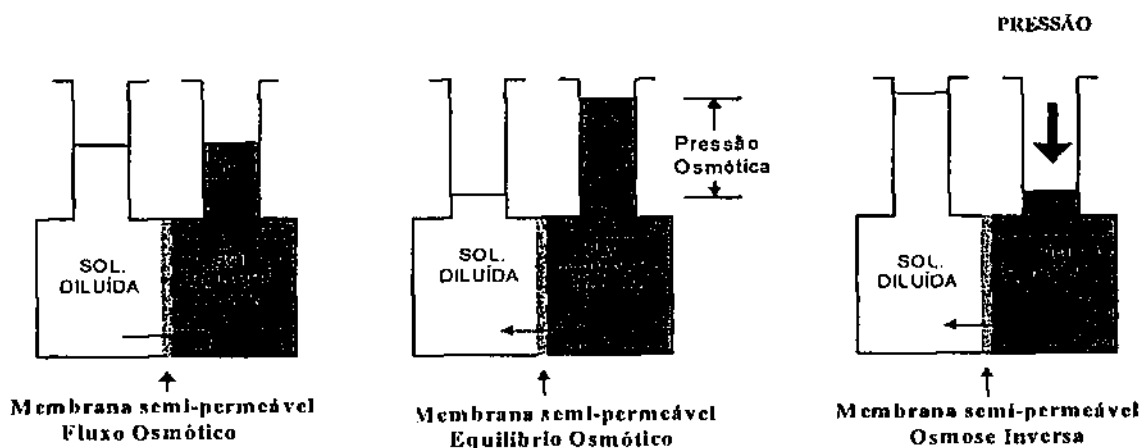


Figura 2.1- Representação esquemática do processo de osmose e osmose inversa.

A osmose inversa é obtida através da aplicação mecânica de uma pressão superior à pressão osmótica do lado da solução mais concentrada. Assim sendo, pelo processo de osmose inversa a água pode ser retirada de uma solução salina por meio de uma membrana semipermeável, contanto que a solução em questão se encontre a uma pressão superior à pressão osmótica relativa à sua concentração salina.

A água pura e a solução agora mais concentrada são retiradas de forma contínua dos dois lados da membrana, de modo que a pressão osmótica e a concentração de sais se mantenham num nível aceitável para que o processo não seja interrompido. A água assim obtida é denominada de produto ou permeado e a solução concentrada de rejeito ou concentrado.

A osmose inversa é o nível final de processos de filtração disponíveis. A membrana de osmose inversa atua como uma barreira a todos os sais dissolvidos e moléculas inorgânicas com peso molecular acima de 100 u.m.a.. As moléculas de água, por outro lado, passam livremente através da membrana. As rejeições típicas de sais dissolvidos são da ordem de 95 a 99%. As membranas de osmose inversa são capazes de separar microsolutos dissolvidos com peso molecular inferior a 500 u.m.a., através do mecanismo de solução - difusão. Quando o peso molecular das partículas do soluto exceder a este valor, o mecanismo de separação será determinado pelo tamanho das partículas presentes na solução e pelo diâmetro dos poros existentes na membrana.

2.2 – Vantagens do processo de osmose inversa

O processo de osmose inversa possui vantagens em relação aos processos tradicionais de dessalinização (Dow Latin America, 1996), como a destilação a múltiplo efeito, a eletrodialise, a troca iônica, a destilação flash com múltiplo efeito, etc. Apresenta-se como a melhor alternativa existente, para certos processos ou regiões e ainda mostra ser muito mais econômica que caminhões pipa (Dow Latin America, 1996). As principais vantagens são:

- possui baixo custo de investimento
- baixo consumo de energia
- simplicidade de operação e manutenção

- aproveitamento dos efluentes
- qualidade constante da água produzida
- processo contínuo
- ocupa área muito reduzida para instalação
- possui flexibilidade para futuras expansões

2.3- Aplicações da osmose inversa

A osmose inversa vem sendo aplicada largamente para processos de dessalinização de águas salobras e água superficiais para abastecimento humano. Atualmente esse tipo de processo vem sendo aplicado para diversas finalidades, conforme mostra a Tabela 2.2 (Perry & Green, 1984), (Schweitzer, 1979), (Amjad, 1993), (Membrane Filtration Systems, 1996), (Strathmann, 1992), nas mais diferentes localidades do planeta: Flórida, EUA; Arábia Saudita; Israel; Ilhas Canárias; Brasil; Europa; Oriente Médio, etc.

Tabela 2.2 – Principais aplicações da osmose inversa.

| Tratamento para uso industrial | Potabilização para uso humano e irrigação | Tratamento para uso farmacêutico/hospitalar |
|---|---|--|
| <p>-Produção de água ultrapura Alimentação de caldeiras, lavagem de micro-circuitos na indústria eletrônica.</p> <p>-Tratamento de efluentes terciários e industriais Reuso de água. Pintura eletrostática, processamento fotográfico, acabamento de fibras têxteis.</p> <p>-Processos alimentícios diversos Processamento de alimentos e bebidas, alimentação de sistemas de resfriamento, concentração do suco de maçã e de laranja, do soro de leite e da vinhaça na indústria do açúcar e do álcool.</p> | <p>-Dessalinização de água salobra e do mar Plataformas de exploração de petróleo, navios da marinha de guerra e mercante, barcos de recreio, hotéis e balneários. Potabilização da água do mar.</p> | <p>-Utilização em laboratórios Estudos bioquímicos e genéticos, aplicações laboratoriais gerais, água para injetáveis e fabricação de medicamentos, análises químicas, enxágue final de vidros, ampolas e batoques</p> <p>-Utilização em hospitais e farmácias Diálises, compostos farmacêuticos, alimentação de autoclaves, limpeza e lavagem de frascos.</p> |

2.4- Histórico da osmose inversa

O fenômeno da osmose inversa foi descoberto por Nollet há mais de 250 anos quando ele observou o transporte de água através de uma bexiga de porco (Nollet, 1748).

A primeira membrana sintética foi preparada por Moritz Traube em 1867 (Traube, 1867). Os processos de osmose inversa estão em crescente pesquisa desde 1950 com membranas de acetato de celulose na Universidade da Flórida (Reid & Breton, 1959), e na

Universidade da Califórnia (Loeb & Sourirajan, 1963). Embora as membranas naturais com estas características sejam muito comuns em organismos vivos e conhecidas há anos, as membranas sintéticas com possibilidades comerciais só se tornaram disponíveis em 1960 quando Loeb e Sourirajan desenvolveram uma membrana de acetato de celulose de estrutura assimétrica permitindo uma taxa aceitável de produção de permeado e rejeição de sais (Loeb & Sourirajan, 1960).

A era comercial da osmose inversa começou depois de 1960, quando algumas empresas usaram a membrana de acetato de celulose de Loeb e Sourirajan na configuração enrolada em espiral. Equipamentos e membranas de fibras ocas foram desenvolvidos e comercializados pela Du Pont e Dow Chemical Company depois de 1960 (Mahon, 1966). Em 1971, a Du Pont introduziu o permeador Permasep B-10, também usando fibras de aramida assimétrica, capazes de uma rejeição de sais muito alta para produzir água potável a partir da água do mar em um único passo.

Em meados de 1970, permeadores de fibra oca de triacetato de celulose foram introduzidos pela Dow Chemical Company, seguido pela Toyobo do Japão, e as membranas de compósito de filme fino de poliamida foram introduzidas pela Fluid Systems Corporation e Filmtec (Amjad, 1993).

Durante os anos 80, melhorias foram introduzidas nestas membranas para aumentar a rejeição de sais e o fluxo de água para água salobra e água do mar. Hoje os materiais predominantes de membranas são aramidas, poliamidas, acetato e triacetato de celulose nas configurações modelo em espiral e fibra oca (Amjad, 1993).

2.5 - Processos de dessalinização

Aristóteles foi quem primeiro descreveu a produção de água potável por destilação de água do mar praticada por marinheiros gregos no século IV antes de Cristo.

Sistemas de pequena escala, para suprir menos de 2000 pessoas tipicamente localizados em áreas remotas e comunidades costeiras, tendem a ter mais alto custo por unidade de água potável produzida; e devido ao mercado que eles servem, são geralmente menos atrativos comercialmente. Como resultado eles recebem muito pouca atenção da indústria de dessalinização (Ayoub & Alward, 1996).

Tipicamente o consumo mínimo de água (para beber e cozinhar) é de cerca de 5 litros por pessoa por dia. A Tabela 2.3 mostra o consumo de água para seres humanos, animais e irrigação. Assim, sistemas de osmose inversa acionados por energia fotovoltaica para a produção de 2000 a 5000 litros por dia de água potável são uma realidade, e que podem atender a comunidades da ordem de 400 a 1000 pessoas (Hasnain & Alajlan, 1998; Milow & Zarza, 1996; Belessiotis & Delyannis, 1996; Voros et alii, 1998; Keefer et alii, 1985).

Tabela 2.3 – Consumo de água por seres humanos, animais e irrigação.

| Consumidor | Salinidade máxima (mg.L ⁻¹) | Consumo (L.dia ⁻¹) |
|-------------------------|---|--------------------------------|
| Seres humanos | 3000 | 3,8 – 11,5 |
| Carneiro | 12500 | 6 |
| Cavalo | 6000 | 38 |
| Gado bovino | 9000 | 46 |
| Gado leiteiro | 9000 | 65 |
| Irrigação (pôr hectare) | 3000 | 17800 – 24200 |

Dentre os diversos processos de dessalinização existentes, o processo de osmose inversa é o que oferece maiores vantagens em relação aos outros processos de dessalinização.

O uso dos destiladores solares de simples e múltiplo efeito são a forma mais econômica para dessalinização da água. Porém, o uso destes destiladores oferta pequena quantidade de água dessalinizada (cerca de 4 litros por metro quadrado de área de troca térmica) sendo que este processo de dessalinização depende fortemente das condições atmosféricas (Bezerra, 1986).

A dessalinização de água do mar é uma das alternativas para a produção de água potável. Quanto ao consumo de energia este é um dos maiores problemas na instalação de usinas dessalinizadoras de água do mar, pois este é da ordem de 9,5 kWh.m⁻³ de água potável produzida, mas com o uso de turbinas de recuperação de energia este consumo

baixa para cerca de $4,75 \text{ kWh.m}^{-3}$ ficando abaixo do valor obtido pelos processos de destilação, conforme a Tabela 2.4 (Keefer et alii, 1985):

Tabela 2.4 – Energia consumida pelos processos de destilação e osmose inversa para dessalinização da água do mar (Dias, 1999).

| Processo | Energia total consumida (kWh.m^{-3}) | Temperatura máxima de operação ($^{\circ}\text{C}$) |
|---|---|---|
| Osmose inversa (IO) | 4,75 | 45 |
| Destilação múltiplo efeito (MED) | 6,87 | 75 |
| Destilação por compressão de vapor (VC) | 9,24 | 100 |
| Destilação flash com múltiplo estágio (MSF) | 9,51 | 95 |

Mas o processo de dessalinização via osmose inversa torna-se mais viável a medida que o teor de sais das águas de alimentação torna-se menor, como é o caso das águas salobras, com concentração em sais em torno de 5000 mg.L^{-1} . Para essas águas o consumo de energia fica em torno de $0,82 - 1,5 \text{ kWh.m}^{-3}$ de água potável produzida (Hydranautics, 1998), (Mallevalle et alii, 1996).

Existem maneiras de se aumentar a oferta de água potável e diminuir assim o consumo de energia por m^3 de água produzida (Hydranautics, 1998):

- misturando parte da solução de alimentação com o permeado produzido até um teor de sais aceitável da solução resultante
- fazendo recirculação do concentrado, para diminuir o consumo de energia
- otimizando o arranjo dos módulos de osmose inversa e o tipo de membrana utilizada
- evitando incrustações nas membranas, através de limpeza química e física

2.6 – Classificação das membranas poliméricas

De um modo geral as membranas podem ser classificadas em duas grandes categorias: densas e porosas (Habert et alii., 1997). As membranas porosas não apresentam interesse para a osmose inversa. 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 este motivo, apresentam um fluxo de 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 de permeado.

2.6.1 – Membranas assimétricas

Em uma membrana assimétrica, a película fina da superfície e o substrato poroso que lhe oferece suporte são feitos do mesmo polímero e possuem composição química idêntica. Estas duas estruturas são fabricadas em uma única etapa de produção, sendo que a película fina superficial possui a capacidade de rejeitar sais dissolvidos durante a permeação da água, enquanto que o substrato poroso providencia a resistência física à estrutura, não possuindo, entretanto, a capacidade de restringir o fluxo do permeado.

Este tipo de membrana possui custo de fabricação mais baixo por ser fabricada em apenas uma etapa de produção. Por este método de fabricação, entretanto, toma-se muito difícil a obtenção de um produto de elevada qualidade, devido à existência de pequenos “buracos” formados na superfície da membrana.

Este problema só pode ser resolvido com o aumento da espessura da película fina, reduzindo conseqüentemente o fluxo de solução permeada.

Outro problema que ocorre durante a utilização de tal tipo de membrana é a sua tendência de compactar-se em uma estrutura cada vez mais densa sobre a aplicação de elevadas pressões de modo contínuo, durante o regime de operação. Este fenômeno é

conhecido como compactação da membrana e seus efeitos durante a vida útil da mesma devem ser levados em consideração na fase do projeto do sistema.

As membranas de acetato de celulose são mais antigas e pertencem ao grupo das membranas assimétricas. Suas vantagens são um baixo custo de produção e resistência ao ataque por cloro

Porém, elas possuem diversas desvantagens, dentre as quais destacam-se as seguintes:

- ocorrência de hidrólise proveniente da ação de ácidos e álcalis,
- biodegradação,
- taxas de rejeição de sais baixas,
- problemas decorrentes da compactação da membrana,
- baixo fluxo de permeado, o que requer elevadas pressões de operação,
- tolerância estreita com relação à faixa de pH aceitável para operação (5 a 8 para operação contínua e 3 a 9 para limpeza) e aos limites de temperatura de operação (0 a 35 °C).

2.6.2 – Membranas de película fina composta

As membranas de película fina composta possuem, como no caso das membranas assimétricas, duas estruturas adjacentes: uma película fina responsável pela rejeição dos sais dissolvidos e uma camada ou substrato poroso responsável pela resistência física da estrutura global. Neste caso, entretanto, a diferença reside no fato de que essas duas estruturas são formadas por materiais diferentes e em duas etapas de fabricação. Este fato permite a obtenção de condições ótimas durante as etapas de produção, o que acaba por otimizar também a performance do conjunto como um todo. Assim são obtidas taxas de rejeição de sais e valores de fluxo do permeado mais elevados. O filme que funciona como suporte possui maior porosidade e resistência à compactação. Neste trabalho utilizou-se membranas de película fina composta de poliamida aromática.

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

osmose inversa. As membranas de poliamida aromática possuem diversas vantagens em relação às membranas de acetato de celulose. Entre elas destacam-se as seguintes:

- taxas de rejeição de sais e moléculas orgânicas superiores,
- não são biodegradáveis,
- baixa taxa de compactação,
- limites de temperatura de operação mais amplos (0 a 45 °C),
- elevada taxa de rejeição de sílica (98%).

Porém, o problema do ataque por cloro à estrutura da membrana ainda é importante, o que exige a decoloração da água de alimentação.

2.7 – Configurações geométricas

Existem quatro modelos usuais de configurações geométricas de membranas de osmose inversa: o plano em quadro, o elemento enrolado em espiral, o tubular e o fibras ocas.

2.7.1 – Plano em quadro

O modelo plano em quadro tem diversas variedades empregadas na indústria. A mais comum consiste em placas delgadas recobertas em ambas as faces pela membrana, seladas nas bordas para impedir vazamentos. Estas placas lembram os discos de vitrola pois em sua superfície existem ranhuras nas quais flui o permeado após passar através das membranas. O permeado chega, então a um tubo central na pilha de discos, por onde é coletado.

2.7.2 – Elemento enrolado em espiral

Este modelo é constituído por um envoltório de membrana em torno de uma matriz de contas de vidro mantidas juntas por uma resina plástica. Esta matriz é ligada a um tubo perfurado, que está numa extremidade do envoltório da membrana. Toda a estrutura do envoltório da membrana é enrolada em torno do tubo, ao modo de rocambole, e o conjunto

inserido em um vaso de pressão cilíndrico. A solução escoar sobre a membrana enquanto o solvente purificado, que passa pela mesma, flui para um sistema coletor por intermédio do tubo interno. Os cilindros são dispostos em série de modo que a solução de alimentação possa fluir através de um grande número de membranas. A membrana possui um espaçador, que é uma espécie de malha quadriculada, para aumentar a turbulência, e, assim, aumentar o coeficiente de transferência de massa do solvente. A Figura 2.2 é um exemplo deste tipo de membrana.



Figura 2.2 – Modelo de membrana elemento enrolado em espiral.

2.7.3 – Tubular

Os dispositivos tubulares consistem em feixes paralelos de tubos de paredes rígidas, porosos ou perfurados. As paredes internas estão revestidas pela membrana. A alimentação pressurizada escoar no interior dos tubos e o ultrafiltrado goteja pela superfície externa e é reunido por dutos ou vasos apropriados.

2.7.4 – Fibras ocas

O modelo de fibras ocas é constituído por fibras com um diâmetro externo de 25 a 250 μm e uma espessura de parede de 5 a 50 μm . A água afluenta, sob alta pressão, corre sobre a superfície externa das fibras. A água permeada escoar para fora, através da base destas fibras, e é coletada como produto.

Podemos classificar os quatro tipos básicos de configurações geométricas descritas em função de suas características básicas:

- susceptibilidade à incrustações: fibras ocas >> espiral >> plano em quadro >> tubular
- custo de fabricação: tubular > plano em quadro >> fibra oca, espiral
- área necessária para a instalação: tubular > plano em quadro > espiral e fibra oca

Atualmente, os modelos de configurações geométricas mais utilizados são o do elemento enrolado em espiral e o de fibras ocas, 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 de permeado mais elevadas.

2.8 - Pressão osmótica de uma solução iônica

A pressão osmótica π que uma solução iônica exerce depende da concentração do soluto, da temperatura absoluta da solução, e da espécie de íons presentes. É dada pela Equação 2.1 (Equação de van't Hoff)

$$\pi = \sum v_i c_i RT \quad (2.1)$$

Onde: \square_i é a carga elétrica do íon i , c_i sua concentração molar, R é a constante universal dos gases perfeitos e T a temperatura absoluta da solução.

Esta equação é válida para soluções diluídas. Para soluções concentradas ela é multiplicada por um coeficiente osmótico que é estimado de dados de pressão de vapor ou do ponto de congelamento da solução avaliada. Para propósitos práticos, a equação de van't Hoff pode ser usada para água salobra (Amjad, 1993).

No processo de osmose inversa tem-se que aplicar uma pressão superior à pressão osmótica na membrana para que haja produção de permeado.

2.9 - Fluxo de permeado e de soluto

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

$$J_w = k_w(\Delta P - \Delta\pi) = Q_p/A \quad (2.2)$$

Onde: J_w é a taxa de fluxo de permeado, k_w o coeficiente de transferência de massa do solvente, ΔP é o gradiente de pressão aplicada, $\Delta\pi$ é o gradiente de pressão osmótica, Q_p é a vazão de permeado e A é a área de permeação da membrana.

$$J_i = k_i\Delta C = Q_p C_p/A \quad (2.3)$$

Onde: J_i é o fluxo mássico do soluto, k_i é o coeficiente de transferência de massa do soluto, ΔC é gradiente de concentração e C_p é a concentração do permeado. Onde, ΔP , $\Delta\pi$ e ΔC são dados por

$$\Delta P = (P_n + P_c)/2 - P_p \quad (2.4)$$

$$\Delta\pi = (\pi_n + \pi_c)/2 - \pi_p \quad (2.5)$$

$$\Delta C = (C_n + C_c)/2 - C_p \quad (2.6)$$

Onde:

P_n , P_c , P_p são a pressão da alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente. π_n , π_c , π_p são a pressão osmótica da alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente.

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

$\Delta\pi$ pode ser dado ainda por

$$\Delta\pi = [(TDS_a + TDS_c)/2 - TDS_p]7,033.10^{-4} \quad (2.7)$$

Onde:

TDS_a é o total de sais dissolvidos na corrente da alimentação

TDS_c é o total de sais dissolvidos na corrente do concentrado e

TDS_p é o total de sais dissolvidos na corrente do permeado (Mallevalle et alii, 1996)

O TDS é dado em $mg.L^{-1}$ e $\Delta\pi$ é dado em $kgf.cm^{-2}$. O fator $7,033.10^{-4}$ converte a concentração para pressão.

2.10 – Taxa de rejeição de sais

A taxa de rejeição de sais TRS (%) refere-se à capacidade da membrana de rejeitar sais durante a permeação de água. O fato de que a água e os sais têm diferentes taxas de transferência de massa cria o fenômeno da rejeição de sais. É calculada de acordo com a Equação

$$TRS = [(C_a - C_p)/C_a]100 \% \quad (2.8)$$

2.11 – Recuperação

A recuperação r (%) ou conversão refere-se à percentagem da vazão da solução de alimentação Q_a convertida em água purificada ou permeada Q_p . A recuperação de um sistema pode ser definida pela Equação 2.9 ou 2.11

$$r = (Q_p/Q_a)100 \% \quad (2.9)$$

$$\text{Como} \quad \rho_a Q_a = \rho_p Q_p + \rho_c Q_c \quad (2.10)$$

Se o fluido é incompressível e a solução é diluída, a densidade ρ é constante, então

$$r = [Q_p / (Q_p + Q_c)] 100 \% \quad (2.11)$$

Onde ρ_n , ρ_p e ρ_c são a densidade da solução de alimentação, do permeado e do concentrado, respectivamente, e Q_c é o fluxo volumétrico do concentrado.

Numa planta de osmose inversa, para que o sistema seja otimizado, a recuperação deve ser máxima; porém, o limite de recuperação máximo ocorre quando qualquer espécie química dissolvida na água rejeitada chega a precipitar e causar entupimento na membrana. Assim, deve-se respeitar estes limites. A recuperação para a água do mar é em torno de 50%, enquanto para água salobra pode chegar a 85% (Hydranautics, 1998). O efeito da recuperação do sistema está relacionado com vários parâmetros, como: a condutividade elétrica da solução de alimentação, a pressão aplicada, a área efetiva de transferência de massa e tipo de membrana utilizado no processo (Silveira, 1999).

2.12 - Balanço de massa e energia no sistema de osmose inversa

Para o sistema de osmose inversa constituído por três permeadores em série podemos aplicar balanços de massa e energia globais e parciais para o solvente e os solutos (sais dissolvidos, matéria orgânica, contaminantes, etc.).

As leis de conservação ocupam um lugar especial na ciência e na engenharia. Um enunciado comum desta lei é “a massa (ou a energia) não é criada ou destruída”. Assim, os cálculos de balanço de massa e energia constituem-se quase sempre, num pré-requisito para todos os outros cálculos na resolução de problemas simples e complexos de engenharia química. Na indústria de processamento, por exemplo, estes balanços ajudam no planejamento do projeto do processo, na avaliação econômica de processos propostos ou existentes, no controle e otimização de processos, etc. (Himmelblau, 1984).

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

$$\text{acúmulo} = \text{entrada} - \text{saída} + \text{geração} - \text{consumo} \quad (2.12)$$

No estado estacionário e sem reação química, podemos aplicar um balanço de massa para o Sistema Experimental I (Figura 2.3):

- Balanço global de massa:

É definido pela Equação 2.10

- Balanço parcial de massa:

$$Q_n C_n = Q_p C_p + Q_c C_c \quad (2.13)$$

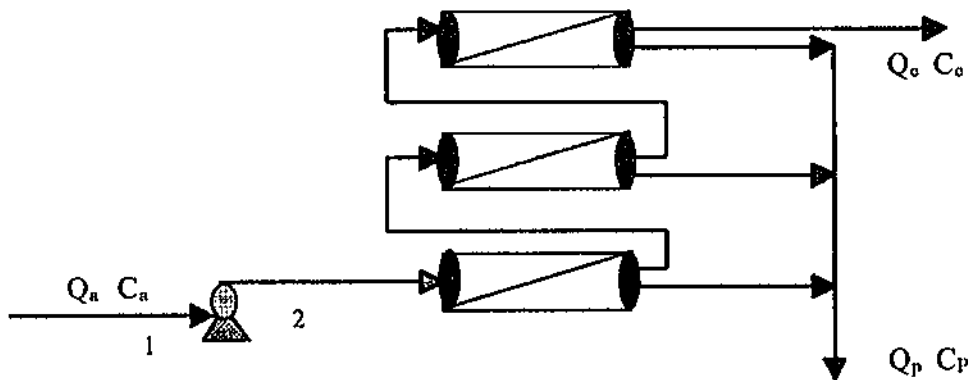


Figura 2.3- Sistema Experimental I de osmose inversa constituído por três permeadores em série.

- Balanço de energia

Este balanço de energia (Foust et alii, 1982) pode ser feito para o Sistema Experimental I de osmose inversa deste trabalho entre os pontos 1 e 2 da Figura 2.3 e tem por objetivo obter a potência da bomba. A Equação do balanço de energia é

$$\Delta E + \Delta(v^2/2g_c\varepsilon) + \Delta Z \cdot g_g/g_c + \Delta(P_a V) = Q_s - \Sigma F - W_f \quad (2.14)$$

Onde:

ΔE é a variação de energia interna, $\Delta(v^2/2g_c\varepsilon)$ é a variação da energia cinética do fluido, $\Delta Z.g_g/g_c$ é a variação de energia potencial, $\Delta(P_a V)$ é a variação da energia de volume, Q_s é o calor trocado entre o fluido e o ambiente, ΣF é o somatório das perdas de energia por atrito e W_f é o trabalho de eixo produzido.

Para o balanço de energia, fazendo-se as seguintes considerações:

$\Delta E = 0$ (não há variação de energia interna)

$\Delta(v^2/2g_c\varepsilon) = 0$ (não há variação de energia cinética do fluido escoante)

$\Delta Z.g_g/g_c = 0$ (não há variação de energia potencial do fluido escoante)

$Q_s = 0$ (não há troca de calor no sistema)

$\Sigma F = 0$ (não há perdas de energia por atrito)

A Equação 2.14 transforma-se em

$$-W_f = P_{a1}V_1 - P_{a2}V_2 \quad (2.15)$$

Onde P_{a1} e P_{a2} são a pressão nos pontos 1 e 2 da Figura 2.3 e V_1 e V_2 são os volumes específicos nestes pontos.

$$\text{Como } V_1 = 1/\rho_a \text{ e } V_2 = 1/\rho_a \quad (2.16)$$

tem-se

$$-W_f = (P_{a1} - P_{a2})/\rho_a \quad (2.17)$$

Sendo a vazão mássica w dada por

$$w = \rho_a Q_a \quad (2.18)$$

A potência elétrica P é dada pelo produto entre o trabalho realizado W_f e a vazão mássica w dividido pela eficiência do motor η_m e da bomba η_b :

$$P = (W_f w) / \eta_m \eta_b = [(P_{a2} - P_{a1}) / (\rho_a \eta_m \eta_b)] \rho_a Q_a = (P_{a2} - P_{a1}) Q_a / \eta_m \eta_b \quad (2.19)$$

2.13 – Concentração de polarização

A concentração de polarização refere-se ao fenômeno no qual a concentração local de sais dissolvidos próximo a superfície da membrana é maior do que a concentração média da solução que flui em volta da superfície considerada. Devido a este fato, a eficiência separativa da membrana diminui gradualmente a medida em que a camada de solução concentrada vai paulatinamente aumentando de espessura. Acompanhando o aumento de sais na interface, há um aumento da pressão osmótica da solução, o que, por sua vez, diminui a pressão que faz fluir a água através da membrana, leva à destruição da sua superfície sensível e aumenta a taxa de sais através da mesma.

A camada junto a superfície da membrana pode atingir uma espessura constante em consequência de dois fatores opostos: o transporte convectivo dos sais para a membrana pelo movimento global da solução e a difusão dos sais para longe da mesma, provocado pelo gradiente estabelecido na vizinhança da fronteira das fases.

Este fenômeno é normalmente considerado pelos fabricantes de membranas e projetistas de sistemas quando estão avaliando a possibilidade de formação de incrustações. Normalmente este aumento de concentração na superfície da membrana é de 10 a 20% do valor da concentração no seio do fluido, podendo atingir, porém, valores mais elevados.

A expressão para a razão de concentração de polarização β é dada por

$$\beta = C_s / C_b = [\exp(J_w / k_i)] / [\text{TRS} + (1 - \text{TRS}) \exp(J_w / k_i)] \quad (2.20)$$

Onde:

C_s é a concentração da solução na superfície da membrana; C_b é a concentração da solução no seio da alimentação, k_i é o coeficiente de transferência de massa do soluto, TRS é a taxa de rejeição de sais e J_w é o fluxo do solvente (Mallevalle et alii, 1996).

O desempenho do fluxo do produto e a retenção característica da membrana afetam a razão de concentração de polarização: mais altas concentrações de sal na interface

membrana/solução aumentam o fluxo de sal bem como a pressão osmótica, reduzindo assim a força motriz da pressão líquida e o fluxo de permeado.

2.14 - Tratamento da água

Uma planta de osmose inversa compõe-se de três seções: a seção de pré-tratamento, a seção de dessalinização e a de pós-tratamento. A seguir descreve-se a primeira e a última.

2.14.1 - Pré-Tratamento

Um pré-tratamento adequado da água de alimentação de um sistema de osmose inversa é um importante fator para a operação bem sucedida de tal processo. Os requisitos básicos de um sistema de pré-tratamento devem ser cuidadosamente avaliados, e esta etapa do processo global deve ser considerado como o subsistema de maior importância dentro do sistema que constitui a instalação completa. O tratamento adequado será feito em função da água de alimentação, da sua composição físico-química e do projeto do processo. Tem por finalidade maximizar a eficiência e a vida útil das membranas, através da minimização de “scaling”, ou seja, do depósito de substâncias inorgânicas ou óxidos que se precipitam na superfície da membrana e reduzem a produção do permeado, além de, ocasionalmente, interferirem na qualidade da água produzida; e “fouling”, ou seja de materiais acumulados na superfície da membrana, tais como partículas em suspensão, ferro ou outros metais pesados, material orgânico, bactérias e outras espécies biológicas. Uma membrana de osmose inversa pode ser degradada por materiais a ela nocivos ou pela saturação de sua capacidade de rejeição de sais.

A vida útil de uma membrana é determinada pela perda de produtividade/fluxo em função do pré - tratamento e condições de operação. Os parâmetros analisados num pré-tratamento são: cor; turbidez; matéria orgânica; ferro; cloro livre; sílica; pH e sólidos suspensos.

Um pré-tratamento adequado compõe-se do uso de filtro de areia (sólidos suspensos), carvão ativado (cloro livre), cloração (matéria orgânica), clarificação

(turbidez), aeração (ferro), acidificação com H_2SO_4 ou HCl ou alcalização com $NaOH$ (correção do pH), membranas de ultrafiltração, anti-incrustantes, filtros de cartucho, etc.

O pré-tratamento, em última análise, otimiza os seguintes fatores:

- vazão de permeado (aumenta a recuperação),
- rejeição de sais dissolvidos, ou seja, melhora da qualidade do permeado,
- custos operacionais, reduzindo a necessidade de freqüentes lavagens químicas, gastos com energia elétrica e freqüente reposição das membranas degradadas,
- tempo de parada ou de não funcionamento do sistema, que será reduzido ao mínimo imprescindível,
- menor quantidade de energia para produzir um mesmo volume de permeado.

2.14.2 - Pós-Tratamento

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

Já com o rejeito é necessário dá-lhe um destino final adequado para que não agrida o meio ambiente. As formas mais comuns de aproveitamento do rejeito são: criação de tilápias rosas; criação de plantas que suportem alta salinidade no solo; injeção em poços profundos; lagos de evaporação; evaporação até a secagem e a utilização por um processo separado; despejos diretos para águas superficiais; uso de destiladores solares (Hasnain & Alajlan, 1998).

2.15 - Consumo de energia

Estimativas de requerimentos energéticos para plantas de osmose inversa de baixa pressão podem ser feitas pelo uso da Equação 2.21. É uma equação geral para calcular energia e pode ser usada para qualquer tipo de planta, dados a pressão de alimentação, a recuperação e a eficiência da bomba e do motor (Mallevialle et alii, 1996).

$$E_{\text{teórico}} = (0,0287P_a)/(r\eta_m\eta_b) \quad (2.21)$$

Onde: $E_{\text{teórico}}$ é a energia teórica consumida na osmose inversa para a produção de 1 m³ de permeado; P_a é a pressão de alimentação do sistema; r é a recuperação; η_m é a eficiência do motor e η_b é a eficiência da bomba. A constante 0,0287 serve de fator de conversão da energia de kWh.kgal⁻¹ para kWh.m⁻³ e da pressão de ft de água (pé de água) para kgf.cm⁻².

O consumo de energia experimental, E_{exp} , é dado pela razão entre a potência elétrica P consumida pelo sistema e a vazão de permeado Q_p :

$$E_{\text{exp}} = P/(60Q_p) \quad (2.22)$$

Onde $P = VI$ (Lei de Ohm) (2.23)

V é a tensão elétrica e I é a corrente elétrica.

A potência elétrica é um importante componente do custo, já que ela fornece a energia para a operação da bomba de alimentação principal que pressuriza a solução. A necessidade de eletricidade para um simples estágio, com membrana de osmose inversa de filme de compósito fino pode ser tão baixa quanto 1,05 kWh.m⁻³, assumindo uma eficiência da bomba de 78 % e uma eficiência do motor de 93 %. Bombas secundárias para operar o pré-tratamento e unidade de pós-tratamento adicionam 0,26 a 0,53 kWh.m⁻³. Um sistema a duplo passo, incluindo todo equipamento auxiliar, pode ser operado com 2,11 kWh.m⁻³ (Amjad, 1993). As plantas modernas de osmose inversa para água salobra podem operar a pressões mais baixas que as plantas antigas (de 27 kgf.cm⁻² a 41 kgf.cm⁻²), na faixa de 13 kgf.cm⁻² a 17 kgf.cm⁻², reduzindo, assim, o consumo de energia de 2,05 para 0,82 a 1,53 kWh.m⁻³ (Amjad, 1993). As bombas para processos de osmose inversa são bombas centrífugas típicas, que são construídas de materiais não corrosivos e operam a pressão entre 12 kgf.cm⁻² e 27 kgf.cm⁻². Bombas de alta pressão podem operar a até 82 kgf.cm⁻² ou mais. Por causa de requerimentos energéticos mais altos, as bombas para operarem com água do mar são bombas de deslocamento positivo (Mallevalle et alii, 1996).

A energia usada pelo processo de osmose inversa é inteiramente destinada ao bombeamento e é geralmente fornecida sob a forma de força elétrica (o processo demanda menos energia de bombeamento por unidade de volume de produto em altos coeficientes de recuperação). Isto porque toda a solução de alimentação deve ser levada a altas pressões, seja qual for o coeficiente de recuperação (Manual de Dessalinização para Planejadores, 1972).

2.16 - Simulação de processos de osmose inversa

A simulação de processos vem alcançando um importante desenvolvimento no mundo atual e em especial na área das ciências exatas.

Na engenharia química aplicada a indústria de osmose inversa este conhecimento tem se tomado visível. A simplicidade dos modelos matemáticos que representam os fenômenos de osmose inversa observados nos experimentos é mais um fator que ajuda na simulação, dada a rapidez, eficiência e segurança nos projetos de plantas de osmose inversa, que fizeram com que as indústrias fabricantes de membranas (Dow, Filmtec, Hydranautics, Fluid Systems, Osmonics, TriSep) desenvolvessem seus próprios programas para computador. Estes programas são ferramentas para desenvolver e testar várias configurações de sistemas. Proporcionam a maneira de estimar a quantidade e qualidade da água permeada, consumo de energia, etc.

Usando um simulador e de posse de alguns dados como vazão, concentração, pH, temperatura, recuperação desejada, etc., da solução de alimentação, é possível determinar as melhores condições de operação para a planta (otimização), através da escolha adequada das membranas, arranjo, área de permeação, etc. (Mallevalle et alii, 1996).

2.17 - A conversão fotovoltaica

A tendência atual da humanidade é usar em conjunto todas as formas de energias renováveis possíveis. Dentre estas está a energia solar, que é a fonte de todas as outras.

Estudos têm sido intensificados na pesquisa deste tipo de energia, porque (Bezerra, 1986), (Goldenberg, 1979):

- as reservas de petróleo tendem a acabar num futuro próximo, além do aumento do seu preço,
- com o uso do petróleo como combustível ocorre grande poluição ambiental, em decorrência de substâncias agressivas lançadas no meio ambiente,
- derrubadas de grandes áreas verdes que provoca o desequilíbrio ecológico.

Dentre as diversas formas de conversão da energia solar, está a conversão fotovoltaica, que consiste na transformação direta da energia luminosa do sol em energia elétrica de corrente contínua, utilizando captadores denominados fotocélulas (Zegna, 1991).

As fotocélulas constituem um campo altamente promissor do aproveitamento da energia solar, cuja viabilidade técnica já foi comprovada no suprimento de energia necessária ao funcionamento de aparelhos elétricos e eletrônicos (Palz, 1981).

Apesar dos esforços despendidos pelos especialistas, as células fotovoltaicas ainda não conseguiram atingir um estágio de desenvolvimento industrial que as tornassem comercialmente competitivas, em virtude da sofisticada tecnologia ainda empregada em sua construção. Espera-se, contudo, que a redução do preço deste material continue decrescendo de tal modo que num futuro bem próximo o preço do kW produzido por este processo possa ser competitivo com os processos convencionais de produção de energia elétrica. Os módulos solares geram energia elétrica a partir da luz do sol. É um sistema alternativo de geração de energia elétrica que não polui o ar ou a água, com operação completamente silenciosa e livre de manutenção.

O princípio de funcionamento da célula fotovoltaica se baseia na propriedade que alguns materiais (principalmente os cristais) têm, quando devidamente manuseados, de gerar uma corrente elétrica quando sobre eles incide um feixe de luz.

Estes materiais são denominados de semicondutores. Quando submetidos a ação de um feixe luminoso, liberam elétrons produzindo uma corrente contínua. Para melhorar a condutibilidade se usa introduzir no cristal uma certa quantidade de impurezas (dopagem). As fotocélulas mais empregadas são as de silício mono e policristalino, mas para a sua utilização é necessário dispô-las em painéis, associando-as de acordo com a tensão/corrente desejada. A tensão típica de uma célula solar é de 0,595 V.

Para a obtenção de tensões de 14 a 17 V (típicas para utilização prática), 30 a 36 células são associadas em série.

Como o número de “junções” em série no módulo é definido pela tensão desejada, módulos menores e de menor potência não podem ser construídos com menos células, mas sim com células menores ou pedaços de células maiores: pedaço de uma célula (cortada ao meio ou em quatro partes) continuam a gerar a mesma tensão de 0,595 V. Ocorre que, com uma menor área para absorção de luz, cada pedaço terá menor capacidade de potência (e corrente) que a célula original. A tensão varia logaritmicamente com a temperatura de -2 mV/°C.

A corrente, por outro lado, aumenta proporcionalmente com a área da célula e com a intensidade da irradiação incidente, sendo praticamente constante com a temperatura e da ordem de 30 mA/cm² com irradiação AM1 (irradiação ao nível do mar em dia claro com céu límpido, a 25 °C).

A maior parte dos painéis presentes no mercado estão projetados para trabalhar com baterias de 12 V de tensão nominal. Para garantir a carga completa de uma bateria de chumbo-ácido de 12 V é necessário uma tensão nos bornes da bateria de 14 V. Esta tensão, mais a queda nos elementos de regulação e controle e mais a queda ôhmica nas interconexões, deve ser menor ou igual a tensão do módulo no ponto de potência máxima à temperatura de funcionamento (25 °C), o que se consegue com uma série de 30 a 36 células dependendo da qualidade destas e da configuração do sistema.

2.18 – Histórico da conversão fotovoltaica

Henrich Hertz realizou em 1886 e 1887 experimentos que comprovavam pela primeira vez a existência das ondas eletromagnéticas. Hertz notou durante estes experimentos que a incidência de luz ultra-violeta facilitava a ocorrência de descargas entre dois eletrodos submetidos à tensão elétrica. Posteriormente outros físicos mostraram que isto ocorria porque a incidência de luz ultra-violeta fazia com que elétrons fossem emitidos da superfície do cátodo.

A construção de módulos solares para a obtenção de energia elétrica só foi possível com o desenvolvimento da tecnologia dos semicondutores após os anos 50. Assim, a

conversão direta da energia solar em energia elétrica tem sido estudada desde o final do século XIX . A preocupação inicial foi com algumas ligas térmicas metálicas, mas a eficiência eram muito baixa, geralmente menor do que 1%. Em 1953 pensava-se que poucas melhorias poderia se conseguir e que aquela eficiência naquelas condições era inadequada para a geração de eletricidade.

Todavia, em 1954, os Laboratórios Telefônicos Bell nos Estados Unidos descobriram que fatias finas de silício, quando dopadas com certos traços de impurezas, tornavam-se dez vezes ou mais eficientes na conversão da irradiação em eletricidade, do que os materiais fotosensíveis usados inicialmente nas fotocélulas. Desde então tem sido uma história de aperfeiçoamento e eficiência mais alta de conversão tem sido alcançada – acima de 16% para células de silício e abaixo de 20% para células de arsenieto de gálio sob condições laboratoriais. O silício mostrou-se ser o material mais barato e eficiente para a produção de eletricidade através do efeito fotovoltaico.

A energia irradiada pelo sol atinge a superfície da terra à uma razão de 1000 W.m^{-2} . Atualmente a eficiência dos módulos solares comerciais chegam aos 14%. Isto significa que um painel com área de célula equivalente a 1 m^2 com esta eficiência pode produzir 140 W de potência elétrica sob estas condições de insolação. Células solares experimentais já chegaram a eficiência maiores que 30%. O custo porém não viabiliza, por enquanto, o uso comercial da tecnologia empregada.

Nos últimos anos com a redução dos custos e melhoria da eficiência dos módulos, cargas e inversores, estão se viabilizando as mais diversas aplicações de alimentação de sistemas por energia solar.

Levando em consideração a vida útil do sistema (25 anos) e o consumo em aplicações típicas, o custo final por kWh de energia elétrica “solar” fica entre US\$ 0,30 e US\$ 1,00 (R\$ 0,59 e R\$ 1,96). Como comparação, o preço do kWh da rede de distribuição do Estado da Paraíba para o consumidor final é de US\$ 0,09 (R\$ 0,18), (CELB- Companhia de Eletricidade da Borborema - março, 2000), (Sweedler, 1985).

Na grande maioria dos casos esta disparidade de preços faz com que apenas em áreas remotas, e não servidas pela rede de distribuição elétrica, seja economicamente viável a implementação de sistemas de energia solar. Outras soluções existem para estes casos, como motogeradores ou geradores eólicos (Jorge, 1999) mas estes não apresentam a

confiabilidade, nem o custo operacional zero dos sistemas de energia solar. A geração de energia fotovoltaica é uma das mais confiáveis formas de se obter energia elétrica.

Diversos fatores podem influenciar na potência final entregue pelo módulos, entre eles: temperatura, condições climáticas, ângulo de incidência dos raios solares, etc.

2.19 – Aplicações da energia solar fotovoltaica

As fotocélulas possuem os mais diversos empregos, tanto no campo espacial quanto no campo terrestre. No campo espacial possuem aplicação na geração de eletricidade para equipamentos lançados ao espaço, como o satélite artificial Skylab. No campo terrestre é utilizada na geração de energia elétrica para: utilização em cerca elétrica; bombeamento d'água; refrigeração; iluminação; televisores; telefonia rural; recarga de baterias automotivas; acionamento de bombas de sistemas de dessalinização de águas; etc. Porém, seu uso ainda está limitado a regiões remotas e em pequena escala, como já foi citado anteriormente (McVeigh, 1979), (Palz, 1981), (Heliodinamica, 1999).

2.20 – Sistema de geração fotovoltaico

Neste tópico descreve-se os elementos principais de um conjunto de geração fotovoltaica, ou seja, o conjunto de equipamentos capazes de proporcionar energia elétrica de forma útil. O sistema fotovoltaico esta formado pelos seguintes elementos:

- subsistema de captação composto principalmente pelos módulos fotovoltaicos, que transformam a irradiação solar em eletricidade,
- subsistema de armazenamento, necessário para armazenar a energia quando for necessário consumi-la nos momentos em que não exista suficiente produção energética por parte do sistema de captação, já que a irradiação solar não esta disponível continuamente (ciclos dia-noite, variações de estação, variações meteorológicas, etc.),
- subsistema de regulação, necessário para regular a entrada da energia procedente do campo de captação dentro da instalação,
- subsistema de adaptação de corrente, cuja função e adequar as características da energia as demandas das aplicações,

- outros equipamentos, como fiação, diodos de proteção, sistemas de consumo da energia obtida (cargas).

2.20.1-Subsistema de captação energética

A captação energética é feita pelo painel solar, que está constituído por várias células iguais conectadas eletronicamente em série e em paralelo de forma que a tensão e a corrente fornecida por ele se ajustem ao valor desejado

Além do conjunto de células, o painel contém outros elementos que tornam possível a adequada proteção do conjunto frente aos agentes exteriores. Estes elementos são:

- coberta exterior de vidro, que tem como função principal proteger as células e deve facilitar ao máximo a transmissão da irradiação solar. Caracterizam-se por sua resistência, alta transmissividade e baixo conteúdo em ferro
- encapsulante, de silicone ou mais frequentemente EVA (acetato de etileno vinil). É especialmente importante que não seja afetado em sua transparência pela contínua exposição ao sol, buscando-se ademais um índice de refração semelhante ao do vidro protetor para não alterar as condições de irradiação incidente
- lâmina ou proteção posterior que igualmente deve prestar uma grande proteção frente aos agentes meteorológicos. Usualmente se empregam lâminas formadas por distintas chapas de materiais, de diferentes características
- marco metálico de alumínio ou aço inoxidável, que assegure uma suficiente rigidez ao conjunto, incorporando os elementos de captação e proteção à estrutura exterior do painel
- fiação e bornes de conexão habituais nas instalações elétricas, protegidos da intempérie por coberturas de material isolante
- diodo de proteção contra sobrecargas ou outras alterações de funcionamento do painel

O comportamento e as características elétricas de um painel fotovoltaico são determinadas pela curva tensão versus corrente (V-I). Além da potência pico do painel é necessário especificar certos parâmetros desta curva com a finalidade de avaliar o tipo de módulo melhor adaptado a aplicação para que se trate. Estas características do painel estão definidas para condições padrão de medida. Ao se curto circuitarem os terminais do painel

($\Delta V = 0$) através do circuito circulará uma intensidade de corrente máxima I_{sc} denominada de corrente de curto circuito. Ao se deixar os terminais do painel em circuito aberto ($I = 0$), entre eles aparecerá uma tensão máxima V_{oc} chamada de tensão de circuito aberto.

Ao se conectar uma certa carga elétrica ao painel, o ponto de trabalho será determinado pela corrente I e a tensão V existentes no circuito. Estes serão menores do que I_{sc} e V_{oc} . A potência P que o painel entrega a carga é determinado pela Equação 2.27. Ao seu valor mais alto se denomina potência máxima ou potência pico ($P_{m\acute{a}x}$). Os valores da corrente e tensão correspondentes a este ponto se conhecem respectivamente como corrente no ponto de máxima potência ($I_{pm\acute{a}x}$) e tensão no ponto de máxima potência ($V_{pm\acute{a}x}$).

Neff et alii (1999), determinaram a curva característica dos painéis que se encontram no Laboratório de Engenharia Química da UFPB e encontraram uma potência de pico de cerca de 29 W_{pico} por painel.

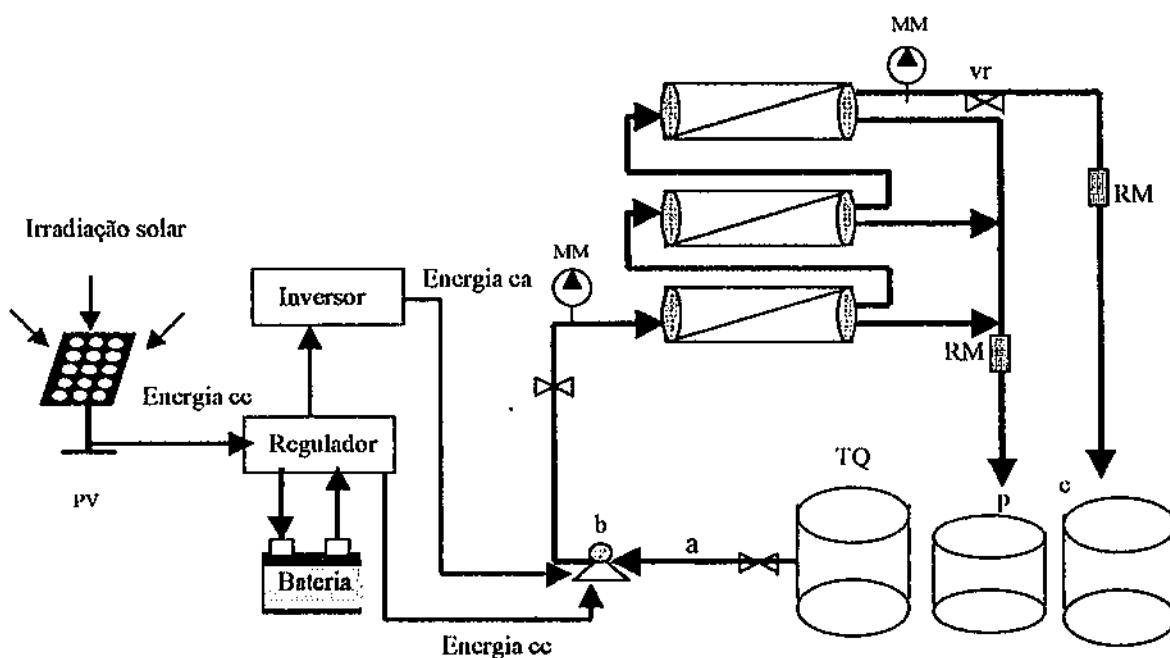
2.20.2 - Subsistema de acumulação

Nas instalações fotovoltaicas pode-se utilizar a energia captada pelos painéis diretamente, que é a forma de melhor aproveitamento desta energia. Mas, desta forma, tem-se que a potência fornecida à bomba é variável de acordo com a hora do dia (potencial de insolação), nebulosidade, clima, etc. (IDAE, 1995), (Keefer et alii, 1985). Sabe-se também que o período de aproveitamento da energia direta é curto, sendo em torno de 5 horas por dia, necessitando-se de um maior dessalinizador para uma dada produção de água potável.

Assim, nas instalações fotovoltaicas, o meio mais habitual é utilizar um conjunto de baterias para armazenar a energia elétrica fornecida pelos painéis durante as horas de irradiação disponível, para sua utilização posterior nos momentos de insolação baixa ou nula (Heliodinamica, 1999). A Figura 2.4 mostra um sistema de energia solar associado a um sistema de osmose inversa. O sistema de energia solar está constituído por painéis solares, baterias, regulador de carga, inversor e anexos como cabos, diodos de proteção, fiação, etc. O sistema de osmose inversa é constituído por membranas, vasos de pressão, bomba de alta pressão e equipamentos auxiliares como válvulas, manômetros, rotâmetros, canos, mangueiras, etc. Neste sistema a irradiação solar é captada pelos painéis e transformada em energia de corrente contínua. Uma parte desta energia é armazenada pelo

banco de baterias e a outra parte é utilizada pela bomba de pressão na forma de corrente contínua ou de corrente alternada, depois de ter sido transformada em energia de corrente alternada pelo inversor. O regulador possui a função de não deixar as baterias se descarregarem em excesso ou receberem carga além de sua capacidade (Heliodinamica, 1999).

Figura 2.4 - Esquema geral de instalação fotovoltaica associada a sistema de osmose inversa.



Onde : b - Bomba de pressão de corrente alternada ou contínua; TQ - Tanque; MM - Manômetro; vr - Válvula de retenção; p - Permeado; c - Concentrado; a - Alimentação; RM - Rotâmetro; PV - Painel fotovoltaico.

Nos sistemas de osmose inversa pode-se utilizar motores de corrente contínua (cc) ou de corrente alternada (ca). No caso de se utilizar motores de corrente alternada, necessita-se de um inversor.

Um avaliação técnico-econômica de cada tipo de configuração da Figura 2.4 indicará a que melhor se adapta para o caso em estudo do sistema de osmose inversa.

Quando se trabalha com baterias é necessário conhecer alguns termos que fazem parte do dimensionamento da quantidade de carga de que o sistema necessita:

- capacidade: é a quantidade de eletricidade que pode obter-se mediante a descarga total de uma bateria inicialmente carregada ao máximo
- eficiência de carga: é a relação entre a energia empregada para carregar a bateria e a energia realmente armazenada. Uma eficiência de 100% significa que toda a energia empregada para armazenar pode ser reutilizada na descarga posterior. Se a eficiência de descarga é baixa, é necessário dotar-se de um maior número de painéis para realizar as mesmas aplicações
- autodescarga: é o processo pelo qual o acumulador, sem estar em uso, tende a descarregar-se
- profundidade de descarga: é o valor percentual da energia que se toma de uma bateria plenamente carregada em uma descarga

A partir da profundidade de descarga podemos ter descargas superficiais (de menos de 20%) ou profundas (de até 80%). Quanto menos profundos forem os ciclos de carga/descarga, maior será a vida útil da bateria.

Em diferentes fases de desenvolvimento encontram-se baterias de distintos tipos, como: zinco-cloro, níquel-cádmio, etc. Dentre todas elas, mais de 90% do mercado corresponde as baterias de chumbo-ácido, que são as de menor custo.

2.20.3 - Subsistema de regulação

Para um funcionamento satisfatório da instalação na união de painéis solares com baterias temos que instalar um sistema de regulação de carga. Este sistema é sempre necessário, salvo no caso de painéis autoregulados. O regulador tem como missão fundamental impedir que a bateria continue recebendo energia do painel já tendo alcançado

sua carga máxima. Se nesse caso tentar se introduzir mais energia, inicia-se na bateria processos de gaseificação (hidrólise da água em hidrogênio e oxigênio) ou de aquecimento, que podem chegar a ser perigosos e, em qualquer caso, prejudicariam a vida útil da bateria. Outra função do regulador é prevenir que a bateria se descarregue em excesso, sendo que este um fenômeno pode provocar uma sensível diminuição na vida útil da bateria em sucessivos ciclos.

2.20.4 - Subsistema de adaptação de corrente

Aqui faz-se referência aos conversores e inversores, elementos cuja finalidade é adaptar as características da corrente gerada a demanda total ou parcial pelas aplicações.

Em determinadas aplicações que trabalham em corrente contínua, não é possível fazer coincidir as tensões proporcionadas pelo acumulador com a solicitada por todos os elementos de consumo. Neste caso a melhor solução é um conversor de tensão contínua-contínua.

Em outras aplicações, a utilização inclui elementos que trabalham em corrente alternada. Como tanto os painéis como as baterias trabalham em corrente contínua é necessário a presença de um inversor que transforme a corrente contínua em corrente alternada. Um inversor caracteriza-se principalmente pela tensão de entrada, que deve se adaptar a do gerador, a potência máxima que pode proporcionar e a eficiência. Esta última se define como a potência elétrica que o inversor entrega a utilização (potência de saída) e a potência elétrica que extrai do gerador (potência de entrada).

A eficiência do inversor varia em função da potência consumida pela carga. Esta variação é necessário conhecê-la, sobretudo se a carga em corrente alternada é variável a fim de que o ponto de trabalho do equipamento se ajuste o melhor possível a um valor médio especificado. Se pode considerar a eficiência de 70% da carga como um parâmetro de eficiência significativo do inversor, porém na atualidade a eficiência dos inversores é da ordem de 90% (Ceragioli, 1997).

Outros aspectos importantes que devem possuir os inversores são:

- possuir uma eficiência alta, pois em caso contrário se terá de aumentar desnecessariamente o número de painéis para alimentar a carga. Nem todos os inversores

existentes no mercado cumprem esta característica, mas é cada vez mais simples encontrar equipamentos especificamente projetados para cobrir plenamente estas aplicações,

- está adequadamente protegidos contra curto-circuitos e sobrecargas,
- incorporar alarme e desconexão automática quando não se está empregando nenhum equipamento de corrente alternada,
- admitir demandas instantâneas de potências maiores do que 200% de sua potência máxima,
- em qualquer caso, a escolha do inversor a utilizar deve realizar-se em função das características da carga. Em função desta última se poderá necessitar de equipamentos mais ou menos complexos.

2.21 – Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos

O dimensionamento é um processo pelo qual se determina o tamanho das instalações, adequando-as a dois parâmetros fundamentais, que são a demanda a cobrir e a energia disponível para cobrir esta demanda (irradiação disponível). Outros dois fatores importantes são a necessidade de garantir um suprimento constante mesmo nas piores condições e um baixo custo dos equipamentos.

Um adequado dimensionamento das instalações supõe assegurar a confiabilidade das mesmas e a sua utilização ao longo do tempo, evitando que se tomem obsoletas ao cabo de poucos anos, ao utilizar-se para fins para os quais não haviam sido concebidas.

Neste tópico propõe-se um sistema de dimensionamento que permite estimar de modo aproximado as características de uma instalação dada, a partir dos consumos previstos e da irradiação disponível. A informação dada é suficiente para calcular a ordem de magnitude das instalações, sendo necessário, porém, que o projeto seja elaborado por um especialista, já que o método proposto não leva em consideração determinados fatores, específicos para cada tipo de instalação, que podem ter incidência na hora de determinar as características finais da mesma.

O sistema proposto está baseado nos sistemas denominados de “o pior mês”, e que supõe que se a instalação é capaz de assegurar a eficácia do sistema no período em que a relação de irradiação disponível e o consumo de energia são mais críticos, não haverá

problemas com a instalação no restante do ano. Para sistemas de osmose inversa o consumo de energia é praticamente constante, ficando o método apenas em função da disponibilidade da irradiação disponível. Existem outros métodos de dimensionamento, mediante métodos probabilísticos e de simulação e são baseados na denominada “probabilidade de perda de carga”, que é um fator que relaciona o déficit de energia com a sua demanda. Um exemplo deste método para o cálculo do número de painéis necessários ao processo pode ser feito pelo programa computacional “software” denominado de TRNSYS (sigla para Transient System Simulation Program). Pode ser utilizado para construir modelos matemáticos e realizar simulação em sistemas que operem no regime transiente (Grilo, 1998). Dado o grande volume de informações necessárias para realizar o dimensionamento segundo este método, optou-se pelo do “pior mês”, que por outro lado, resulta muito mais intuitivo na maioria dos casos.

A hipótese básica de dimensionamento é a de abastecer em sua totalidade as necessidades definidas no mês de menor irradiação, contando com a segurança de uma capacidade de acumulação necessária para cobrir um certo número de dias de baixo nível de irradiação.

A partir do consumo previsto e da irradiação disponível, estabelece-se o tamanho da instalação para o equipamento de captação (painéis) e acumulação (baterias). A energia que a aplicação considerada necessita consumir cada mês irá depender exclusivamente dos tipos de equipamentos utilizados que compõe a carga, assim como o tempo de utilização das mesmas. Os dados de que necessita-se conhecer de cada equipamento será a sua potência, que é tomada como a nominal dos equipamentos e que aparece nas características dos mesmos, e o número de horas de funcionamento diário.

Para a avaliação do consumo total devemos levar em consideração dois fatores que são:

- margem de segurança de captação M_s (%), que corresponde às perdas nos cabos, conexões, variações nos consumos inicialmente previstos, etc. Em princípio, pode estimar-se em 15% para a maioria dos casos
- eficiência do inversor η_i (%), que é a relação entre a energia que se entrega ao inversor e a realmente disponível para o consumo. Em princípio, pode tomar-se como valor médio 90%.

O dimensionamento de um sistema fotovoltaico é dado como segue.

a) Consumo de energia em corrente contínua mais em corrente alternada.

O consumo de energia em corrente contínua E_{cc} mais em corrente alternada E_{ca} é dado pelas seguintes Equações:

$$E_{cc} = [(100 + M_s)/100]P_{cc}N_{cc}H_{cc} \quad (2.24)$$

Onde:

E_{cc} é o consumo de energia em corrente contínua, M_s é a margem de segurança de captação, P_{cc} é a potência dos equipamentos de corrente contínua, N_{cc} é o número de equipamentos de corrente contínua e H_{cc} é o número de horas de funcionamento dos equipamento de corrente contínua.

$$E_{ca} = [(100 + M_s)/\eta_i]P_{ca}N_{ca}H_{ca} \quad (2.25)$$

Onde:

E_{ca} é o consumo de energia em corrente alternada, M_s é a margem de segurança de captação, η_i é a eficiência do inversor, P_{ca} é a potência dos equipamentos de corrente alternada, N_{ca} é o número de equipamentos de corrente alternada e H_{ca} é o número de horas de funcionamento dos equipamento de corrente alternada.

O consumo total de energia em corrente contínua mais o consumo em corrente alternada E_t é dado por

$$E_t = E_{cc} + E_{ca} \quad (2.26)$$

$$E_t = [(100 + M_s)/100]P_{cc}N_{cc}H_{cc} + [(100 + M_s)/\eta_i]P_{ca}N_{ca}H_{ca} \quad (2.27)$$

Caso o sistema possua apenas equipamentos de corrente alternada a Equação 2.27 torna-se:

$$E_t = [(100 + M_s)/\eta_i]P_{ca}H_{ca}N_{ca} \quad (2.28)$$

b) Energia fornecida por 1 painel (E_{1p})

A energia fornecida por um painel é o produto entre a tensão de máxima potência $V_{pmáx}$, a corrente de potência máxima $I_{pmáx}$ e o número de horas de irradiação g

$$E_{1p} = V_{pmáx}I_{pmáx}g \quad (2.29)$$

c) Número de painéis (N_p)

O número total de painéis necessários ao processo é a razão entre a energia total consumida E_t pela energia que 1 painel fornece, multiplicada pelo fator de segurança 1,1

$$N_p = 1,1E_t/E_{1p} \quad (2.30)$$

d) Capacidade mínima do banco de baterias (Q_b)

A capacidade mínima do banco de baterias Q_b é o produto entre a energia total consumida E_t pelo número de dias de autonomia D_a pelo fator de segurança 110% divididos pela tensão do sistema T_s e pela profundidade de descarga das baterias M

$$Q_b = 110(E_t D_a)/(T_s M) \quad (2.31)$$

e) Número de baterias (N_b)

É a razão entre a capacidade mínima total Q_b e a carga de uma bateria Q_{1b}

$$N_b = Q_b/Q_{1b} \quad (2.32)$$

A energia que capta num painel solar fotovoltaico depende tanto da climatologia do lugar como do ângulo de inclinação do painel em relação aos raios solares.

Assim, o cálculo exato da energia solar incidente em uma determinada localidade é um complicado problema estatístico e físico, mas, pode-se realizar aproximações suficientemente aceitáveis supondo que a energia recebida pelo painel é a correspondente a média da localidade onde se instala o sistema fotovoltaico.

A energia disponível corresponde a energia recebida durante um certo período por unidade de superfície correspondente para diferentes meses do ano. Geralmente costuma-se expressar esta energia em forma de $\text{kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$.

A Equipe de Estudos de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul elaborou um “software” denominado “Radiasol” que fornece a irradiação ao longo de todo o ano para localidades do mundo inteiro. Abaixo mostra-se a Tabela 2.5 que fornece a energia disponível para várias localidades do Brasil, elaborada a partir deste “software” (Radiasol, 1997). Nesta Tabela, observa-se que os algarismos marcados indicam que o potencial de insolação de Campina Grande é maior do que o potencial de insolação de São Paulo, por exemplo.

Tabela 2.5 – Potencial de insolação médio mensal de algumas cidades do Brasil (em $\text{kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), para uma irradiação de 1000 W.m^{-2} .

| Mês Local | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| C. Grande (PB) | 5,47 | 5,39 | 5,71 | 5,87 | 5,27 | 5,37 | 5,34 | 5,02 | 5,27 | 5,89 | 6,08 | 5,69 |
| Patos (PB) | 5,78 | 5,72 | 6,03 | 5,58 | 5,42 | 4,81 | 5,19 | 6,06 | 6,19 | 6,64 | 6,50 | 6,03 |
| J. Pessoa (PB) | 5,36 | 5,72 | 5,50 | 5,03 | 5,06 | 4,28 | 4,56 | 5,39 | 5,69 | 6,42 | 6,61 | 6,33 |
| São Paulo (SP) | 4,50 | 3,00 | 4,02 | 3,21 | 3,12 | 2,31 | 1,22 | 3,72 | 3,7 | 4,03 | 3,00 | 4,1 |
| P. Alegre (RS) | 5,97 | 5,50 | 4,67 | 3,86 | 2,92 | 2,42 | 2,83 | 3,33 | 4,08 | 5,25 | 6,03 | 6,50 |
| Picos (PI) | 4,97 | 4,89 | 5,19 | 5,11 | 5,25 | 5,14 | 4,83 | 6,33 | 6,08 | 6,31 | 6,08 | 5,69 |
| Petrolina (PE) | 5,61 | 6,50 | 5,47 | 5,00 | 4,86 | 4,50 | 4,67 | 5,19 | 5,42 | 5,97 | 5,72 | 5,56 |
| Palmas (TO) | 5,25 | 4,69 | 4,50 | 4,00 | 3,53 | 2,78 | 3,11 | 3,64 | 4,08 | 4,92 | 5,67 | 5,83 |

Para efeito de projeto de sistemas fotovoltaicos deve-se tomar o menor valor médio mensal da energia disponível e conseqüentemente de g (g é a razão entre o potencial de insolação e a irradiação). Tomando por exemplo o mês de julho em Campina Grande, da Tabela 2.5, tem-se para g :

$$g = (3,83 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}) / (1000 \text{ W.m}^{-2}) = 3,83 \text{ h.dia}^{-1}$$

2.22 – Custo da energia fotovoltaica

O custo da energia fotovoltaica deve-se aos vários equipamentos de energia solar como os painéis solares, às baterias, os equipamentos de adaptação, conversão, medidas, cabos e conexões, etc.

Assim, o custo da energia fotovoltaica é dado como segue:

a) Custo da energia devido aos painéis (CE_p)

É a razão entre o custo do painel C_{1p} , a energia fornecida por ele, E_{1p} , e sua vida útil, F_p :

$$CE_p = C_{1p}/(E_{1p}F_p) \quad (2.33)$$

b) Custo da energia devido aos equipamentos (CE_e)

O custo de energia devido aos equipamentos CE_e , é dado pela razão entre o custo dos equipamentos C_e (monitor de bateria, controlador de carga, inversor, cabos, diodos de proteção, conexões, etc.), o número de painéis N_p , a energia fornecida por um painel, E_{1p} , e a vida útil dos equipamentos F_e :

$$CE_e = C_e/(N_p E_{1p} F_e) \quad (2.34)$$

c) Custo da energia devido às baterias (CE_b)

O custo da energia devido às baterias, CE_b , é dado pelo produto do número total de baterias N_b pelo custo de cada bateria, C_{1b} , dividido pelo número total de painéis, N_p , pela energia fornecida por um painel, E_{1p} , e pela vida útil das baterias, F_b :

$$CE_b = (N_b C_{1b})/(N_p E_{1p} F_b) \quad (2.35)$$

d) Custo da energia fotovoltaica

Assim, o custo total da energia fotovoltaica CE_{pv} do sistema é dado por:

$$CE_{pv} = CE_p + CE_c + CE_b \quad (2.36)$$

$$CE_{pv} = C_{1p}/(E_{1p}F_p) + C_c/(N_p E_{1p} F_c) + (N_b C_{1b})/(N_p E_{1p} F_b) \quad (2.37)$$

e) Custo da água dessalinizada (CAD)

O custo da água dessalinizada CAD deve-se principalmente ao sistema de energia solar e ao sistema de osmose inversa. O custo da água dessalinizada é o produto do custo da energia fotovoltaica CE_{pv} pelo consumo de energia experimental E_{exp} mais o custo da água devido ao sistema de osmose inversa, que é a razão entre o custo do sistema de osmose inversa C_o , a vazão de permeado produzido Q_p , e a vida útil do sistema de osmose inversa F_o :

$$CAD = CE_{pv} E_{exp} + C_o/(Q_p F_o) \quad (2.38)$$

No caso da energia utilizada ser a energia convencional CE_{conv} , o custo da água dessalinizada CAD fica sendo:

$$CAD = CE_{conv} E_{exp} + C_o/(Q_p F_o) \quad (2.39)$$

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Este Capítulo trata da descrição dos materiais e equipamentos utilizados na fase experimental deste trabalho, bem como da metodologia utilizada.

Este trabalho experimental foi desenvolvido no âmbito do Laboratório de Dessalinização do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal da Paraíba e concentrou-se em estudar o desempenho de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa com água salina (solução de NaCl preparada com cloreto de sódio P.A, do Laboratório Vetec). As diferentes soluções salinas estudadas e preparadas tinham concentração variando de 4,6 a 10519 mg.L⁻¹.

3.1 - Equipamentos

3.1.1 - Sistemas de osmose inversa

No trabalho experimental utilizou-se dois sistemas de osmose inversa: os Sistemas Experimentais I e II. O Sistema Experimental I (Figura 3.1) está constituída por três membranas de osmose inversa de 6,35 cm de diâmetro por 35,56 cm de comprimento, da Fluid Systems Corporation e três vasos de pressão (permeadores) da Advanced Structures International, modelo 2.5S Seawater, onde cada vaso suporta uma pressão máxima de 69 kgf.cm⁻². As membranas foram inseridas nos permeadores e estes foram instalados em série em uma estrutura de PVC na seguinte ordem: a primeira membrana é do tipo HF (membrana de alta filtração), a Segunda é do tipo ULP (membrana de ultra baixa pressão), e a terceira é do tipo HR (membrana de alta rejeição).

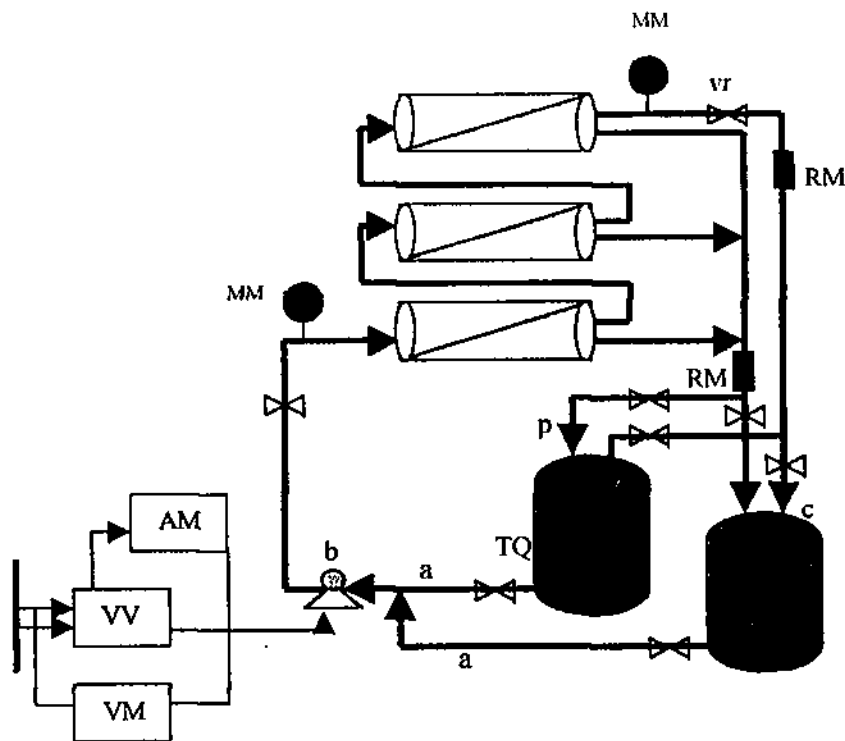


Figura 3.1 – Sistema Experimental I de osmose inversa utilizado na pesquisa.

Onde : b - Bomba de pressão; TQ - Tanque; MM - Manômetro; AM - Amperímetro; VM - Voltímetro; VV- Varivolt; vr - Válvula de retenção; p - Permeado; c - Concentrado; a – Alimentação; RM - Rotâmetro

Os três tipos (HF, ULP, e HR) são de configuração em espiral e de composição de poliamida aromática, com as respectivas características:

Vazão (Q_p): 1,08; 0,68; e 0,68 $m^3 \cdot dia^{-1}$;

Taxa de rejeição de sais (TRS): 98,2; 99,0; e 99,4 %;

Mesma área nominal: 5760 cm^2 (cada membrana);

Faixa de operação normal de temperatura: 25 – 45 $^{\circ}C$ (cada membrana);

Faixa de pressão de operação: 14,0; 3,5-10,3; 10,3-19,7 $kgf \cdot cm^{-2}$ (cada membrana);

Intervalo de pH padrão da solução de alimentação: 4,0 – 11,0 (cada membrana);

O Sistema Experimental II possui uma única membrana de osmose inversa (tipo BW30-4040) de poliamida aromática de configuração em espiral de 10,16 cm de diâmetro por 101,60 cm de comprimento para água salobra da Filmtec.

Vazão (Q_p): $6,8 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$;

Taxa de rejeição de sais (TRS): 98,0 %;

Área nominal: 65032 cm^2 ;

Pressão de operação: $15 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$;

Intervalo de pH padrão da solução de alimentação: 4,0 – 11,0;

Faixa de operação normal de temperatura: 25 – 45 °C.

3.1.1.1 – Subsistema hidráulico

O subsistema hidráulico para os Sistemas Experimentais I e II está constituído por uma bomba Procon acionada por um motor de corrente alternada de indução monofásico Weg de 1/4 hp de potência nominal, conectada a um tanque da solução de alimentação (solução de NaCl) de capacidade volumétrica 60 L, e a um outro tanque de capacidade volumétrica 50 L para receber o concentrado e o permeado durante o processo. Tubos e conexões de PVC de 1,27 cm, quatro válvulas de retenção tipo esfera da Deca de 1,27 cm, conexões de bronze de 1,27 cm, e mangueiras plásticas de baixa e de alta pressão completam o dispositivo.

3.1.1.2 – Subsistema de geração de energia

A energia elétrica utilizada para a realização dos experimentos para os Sistemas Experimentais I e II foi a energia da rede elétrica que está a 220 V em corrente alternada com frequência de 60 Hz. 1 varivolt (0-240 V, 60 Hz) tipo VM 215 da Sociedade Técnica Paulista Ltda., foi utilizado com a finalidade de variar a tensão elétrica fornecida ao motor. Um motor Weg de 1/4 de hp, modelo B480596, de indução monofásico de corrente alternada, de 1725 rpm a 60 Hz. A Tabela 3.1 fornece a eficiência do motor para as cargas de 50; 75 e 100%.

Tabela 3.1 - Eficiência do motor usado no trabalho experimental.

| % da potência nominal | 50 | 75 | 100 |
|--------------------------|------|------|------|
| Eficiência (η_m %) | 40,0 | 50,0 | 58,5 |

Conforme a Tabela 3.1, tomou-se a eficiência de 40% como uma boa aproximação para a eficiência do motor. Já para a eficiência da bomba tomou-se o valor de 55%. Os dados de eficiência do motor e da bomba, juntamente com os dados de pressão e recuperação (Tabelas 4.1 a 4.26, no Apêndice III) foram substituídos na Equação 2.21 e assim calculou-se os dados de consumo de energia teórico. Com os dados das Tabelas 4.1 a 4.26 do Apêndice III foi calculado os dados de energia experimental do sistema. Observa-se que os dados experimentais possuem uma boa concordância com os dados teóricos. Para os motores grandes a eficiência destes é da ordem de 93%. Porém, como percebe-se pela Tabela 3.1, a eficiência para motores de indução de corrente contínua de potência menor do que 1 hp é da ordem de 50%. Isto é ruim para os sistemas de energia solar porque quanto menor o sistema, menor a eficiência. A eficiência é uma função direta do percentual da potência nominal: quanto menor o percentual da potência nominal, menor a eficiência do motor (Weg, 1993).

Ao se trabalhar com motores menores do que 2 hp deve-se usar uma eficiência variável para melhor quantificar a energia consumida pelo motor, pois esta varia muito em função da carga imposta a este (Tabela 3.1). Assim, nos sistemas onde a carga é variável como nos sistemas de osmose inversa, deve-se tomar uma função do rendimento da forma

$$\eta_m = \eta_m(P) \quad (3.1)$$

Para sistemas onde a potência do motor é maior do que 2 hp, a eficiência do motor sofre pouca influência da carga imposta sobre ele, sendo aproximadamente constante (Weg, 1993).

3.1.1.3 – Subsistema de unidades de registro

Foram utilizados 2 manômetros de Bourdon Lubefer (0 – 16 kgf.cm²), para medição da pressão da solução de alimentação e da solução do concentrado; 1

condutivímetro CD-21 da Digimed, para medição da condutividade elétrica da solução de alimentação, do concentrado e do permeado; 1 pHmetro digital Hanna para medição do potencial hidrogeniônico; 2 rotâmetros modelo F-45375 Blue White Ind., para registrar o fluxo volumétrico do concentrado e do permeado; 1 multímetro digital Lutron modelo DM9090 para registrar a tensão e um outro multímetro digital UNI-T modelo M3900 para medição da corrente elétrica fornecida pela fonte geradora.

A Tabela 3.2 indica a conversão da condutividade elétrica em $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ para concentração em $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Tabela 3.2 – Conversão da condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) para concentração ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

| Condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) | Concentração ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) |
|---|--|
| 50 | 19 |
| 100 | 36 |
| 500 | 212 |
| 1000 | 453 |
| 2000 | 968 |
| 5000 | 2641 |
| 10000 | 5643 |

3.2 - Metodologia

Cada batelada foi realizada em duas etapas:

3.2.1 – 1ª Etapa: Determinação de Q_p e Q_c ; P_n e P_c ; I ; K_n , K_p e K_c ; pH_n , pH_p e pH_c ; e de T_n .

Na primeira etapa foi estudado o efeito da variação da pressão aplicada ao sistema sob os seguintes parâmetros: pressão, potência elétrica, recuperação, potencial hidrogeniônico, condutividade elétrica, consumo de energia, etc. Este procedimento foi usado para várias concentrações de alimentação (variando de 4,6 a 10519 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Um exemplo é mostrado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3- Comportamento da pressão (P_c), das vazões (Q_p e Q_c) e da corrente elétrica (I), ao variar a pressão P_a . Sistema Experimental I; $V = 220 \text{ V}$; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $K_a = 5500 \text{ } \mu\text{S.cm}^{-1}$ (2932 mg.L^{-1}).

| P_a (kgf.cm^{-2}) | P_c (kgf.cm^{-2}) | Q_p (L.min^{-1}) | Q_c (L.min^{-1}) | I (A) |
|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------|
| 3 | 2,6 | 0,12 | 3,30 | 2,03 |
| 4 | 3,6 | 0,20 | 3,10 | 2,04 |
| 5 | 4,6 | 0,27 | 3,0 | 2,07 |
| 6 | 5,6 | 0,34 | 2,80 | 2,09 |
| 7 | 6,6 | 0,43 | 2,70 | 2,11 |
| 8 | 7,6 | 0,59 | 2,60 | 2,13 |
| 9 | 8,6 | 0,73 | 2,40 | 2,14 |
| 10 | 9,6 | 0,88 | 2,30 | 2,17 |
| 11 | 10,5 | 0,97 | 2,20 | 2,21 |
| 12 | 11,5 | 1,10 | 2,00 | 2,27 |
| 13 | 12,5 | 1,20 | 1,90 | 2,32 |
| 14 | 13,4 | 1,30 | 1,80 | 2,37 |
| 15 | 14,3 | 1,40 | 1,70 | 2,41 |

3.2.2 – 2ª Etapa: Determinação da potência mínima

Com o objetivo de quantificar a potência e a energia mínima que ainda fizesse o sistema funcionar, procurou-se variar a tensão elétrica no varivolt. Neste sentido ajustou-se a pressão de 2 em 2 kgf.cm^{-2} a partir de 3 kgf.cm^{-2} , até 15 kgf.cm^{-2} e abaixou-se a tensão no varivolt de 10 em 10 V para o Sistema Experimental I e de 15 em 15 V para o Sistema Experimental II, a partir de 220 V. Parou-se este procedimento quando se notou que o fluxo do permeado começava a declinar. Para cada tensão fornecida, tomou-se amostras do permeado e do concentrado totais, anotou-se a vazão do concentrado e do permeado total, a pressão do concentrado e a corrente fornecida pela fonte geradora (Tabela 3.4). Tomou-se também dados da temperatura, do pH e da condutividade elétrica da solução de alimentação. As bateladas duravam cerca de 40

minutos. Buscou-se com este procedimento determinar a tensão e a corrente elétrica mínima onde o sistema pudesse funcionar (ponto de consumo mínimo de energia pelo motor).

Tabela 3.4- Comportamento das vazões do permeado e do concentrado (Q_p e Q_c), da corrente elétrica (I), da condutividade elétrica do permeado e do concentrado (K_p e K_c), ao variar a tensão (ΔV). Sistema Experimental I; $P_a = 9 \text{ kgf.cm}^{-2}$; $T_n = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $K_n = 5500 \text{ } \mu\text{S.cm}^{-1}$ (2932 mg.L^{-1}).

| ΔV (V) | Q_p (L.min^{-1}) | Q_c (L.min^{-1}) | I (A) | K_p ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | K_c ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) |
|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 220 | 0,74 | 2,40 | 2,17 | 184 | 6970 |
| 210 | 0,74 | 2,40 | 2,06 | 184 | 6970 |
| 200 | 0,74 | 2,40 | 1,97 | 184 | 6970 |
| 190 | 0,74 | 2,40 | 1,88 | 184 | 6970 |
| 180 | 0,73 | 2,40 | 1,83 | - | - |
| 170 | 0,73 | 2,40 | 1,75 | - | - |
| 160 | 0,73 | 2,40 | 1,70 | - | - |
| 150 | 0,69 | 2,40 | 1,69 | - | - |
| 140 | 0,69 | 2,40 | 1,70 | - | - |
| 130 | 0,65 | 2,40 | 1,75 | - | - |
| 120 | 0,63 | 2,40 | 1,87 | - | - |

Realizou-se este procedimento para as pressões de 3; 5; 7; 9; 11; 13 e 15 kgf.cm^{-2} . Pela Tabela 3.4 percebe-se que a vazão do permeado declina enquanto a do concentrado permanece constante. Como sabemos que a vazão da alimentação é constante, era de se esperar que a vazão do concentrado aumentasse para que houvesse conservação da massa. Realmente ocorre conservação da massa, porém o rotâmetro que mede a vazão do concentrado é menos preciso do que aquele que mede a vazão do permeado. Assim, não foi possível perceber este fato (aumento da vazão do concentrado).

Pela Tabela 3.4 percebe-se que só mediu-se a condutividade do permeado e do concentrado até o ponto onde as vazões foram constantes.

3.3 – Determinação de parâmetros

3.3.1 – Condutividade elétrica e potencial hidrogeniônico

A condutividade elétrica e o pH da solução de alimentação, do permeado e concentrado estão expostas nas Tabelas 4.1 a 4.13 e 4.28 e 4.29.

3.3.2 – Potência elétrica

A potência elétrica foi calculada a partir de dados de tensão e corrente elétrica das Tabelas 4.1 a 4.26, pela Equação 2.23 do Capítulo II.

3.3.3 - Consumo de energia experimental e teórico

O energia consumida pelo processo de osmose inversa foi calculada pela Equação 2.22 do Capítulo II utilizando-se dados de potência elétrica e de vazão do permeado expostos nas Tabelas 4.1 a 4.26.

O consumo de energia teórico foi determinado a partir da Equação 2.21. Para isso utilizou-se dados de rendimento teórico do motor e da bomba e dados de pressão de operação e recuperação do sistema. Para o motor tomou-se o rendimento de 40% (Weg, 1993) e para a bomba o de 55% (Foust et alii, 1982).

3.3.4 – Custo da água dessalinizada

Calculou-se o custo da água dessalinizada utilizando-se os dados de consumo de energia e o custo das energias fotovoltaica e convencional, pelas Equações 2.38 e 2.39, respectivamente.

3.3.5 – Temperatura de operação

A temperatura de operação manteve-se constante em 25 ± 1 °C para todas as bateladas realizadas.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste Capítulo são apresentados e discutidos os resultados encontrados na fase experimental deste trabalho. Os principais parâmetros estudados foram:

- Variação do potencial hidrogeniônico com a pressão
- Variação da condutividade elétrica com a pressão
- Variação da vazão do permeado e do concentrado com a pressão
- Variação da vazão do permeado (e recuperação) com a concentração de alimentação
- Variação da potência elétrica com a pressão
- Variação da potência elétrica com a tensão elétrica
- Variação da energia com a tensão elétrica
- Variação da energia com a pressão
- Custo da água dessalinizada

Para melhor compreensão do comportamento destes parâmetros, utilizou-se Figuras que encontram-se neste Capítulo e as Tabelas referentes a estas Figuras, que encontram-se no Apêndice III.

4.1 - Variação do potencial hidrogeniônico com a pressão

Na faixa de pressão estudada, o pH não mostrou variação significativa com a pressão. A variação do pH é mais significativa nos sistemas onde a solução de alimentação possui componentes como cálcio, magnésio, carbonato, bicarbonato, dióxido de carbono, etc. Isto devido haver na membrana uma extração preferencial de certos compostos em relação a outros. Pela Figura 4.1 correspondente a Tabela 4.27, observa-se que o pH do permeado é menor do que o pH do concentrado e o pH da alimentação. Este mesmo fato já foi observado por Dias (1999) e Silveira (1999). O pH também não mostrou ter uma

variação significativa com a concentração da solução de alimentação, provavelmente devido a solução de alimentação ser formada apenas por cloreto de sódio e água. Do ponto de vista da potabilidade, a água permeada mostrou excelente qualidade, ficando o pH do permeado entre 6,0 e 7,5. Este valor encontra-se na faixa do valor máximo permissível ou recomendável (6,5 a 8,5) pela Legislação Brasileira para que a água destinada ao consumo humano seja considerada potável (Portaria 36/90 do Ministério da Saúde).

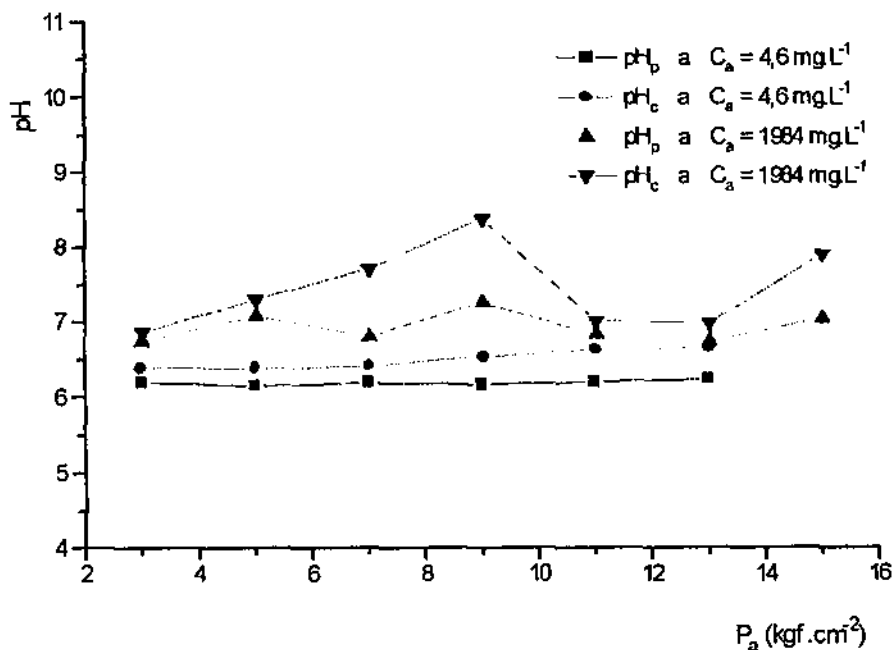


Figura 4.1 - Variação do pH do permeado e do concentrado com a pressão. pH_a a C_a = 4,6 mg.L⁻¹ ⇒ 6,40; pH_a a C_a = 1984 mg.L⁻¹ ⇒ 7,15; Sistema Experimental I; T_a = 25 ± 1 °C.

4.2 - Variação da condutividade elétrica com a pressão

Pelas Figuras 4.2 e 4.3 correspondente aos dados da Tabela 4.28 observa-se que a condutividade elétrica do permeado diminui com o aumento da pressão, até ficar em um valor aproximadamente constante. Uma maior pressão de operação conduz a uma menor condutividade elétrica do permeado, porém existe uma pressão acima da qual a qualidade

do permeado permanece constante. Assim, pode-se concluir que nos sistemas de osmose inversa o ponto ótimo de qualidade do permeado dá-se num certo valor da pressão, acima da qual não há melhora da qualidade do permeado.

A passagem de sais pela membrana depende do gradiente de concentração estabelecido, como mostra a Equação 2.3 e do tipo de membrana utilizada. Porém, com o aumento da pressão, mais água atravessa a membrana, diluindo o permeado e baixando assim a sua condutividade elétrica. Mesmo para concentrações da solução de alimentação altas (5000 mg.L^{-1}), as membranas dos Sistemas Experimentais I e II mostraram um desempenho satisfatório, apresentando um permeado de alta qualidade com uma concentração em sais da ordem de 150 mg.L^{-1} , bem inferior ao valor máximo recomendável pela Organização Mundial da Saúde que é de 500 mg.L^{-1} (World Health Organization, 1984). Isto mostra que membranas de poliamida aromática de película fina composta se adaptam bem ao processo de osmose inversa. O segundo ponto da curva que aparece na Figura 4.2 para a condutividade elétrica da alimentação de $K_a = 7300 \mu\text{S.cm}^{-1}$ ficou fora do comportamento normal da curva provavelmente devido a um erro na coleta ou medição do dado experimental.

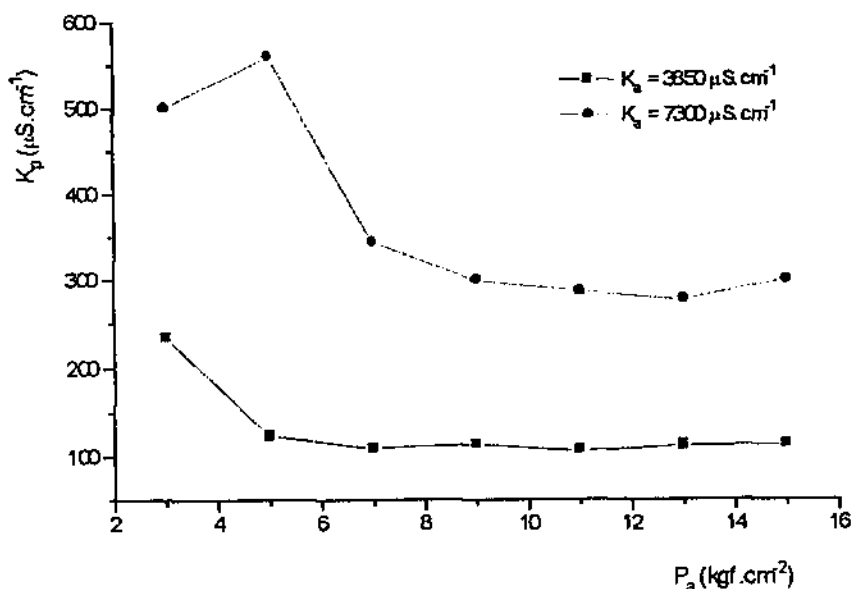


Figura 4.2 – Variação da condutividade elétrica do permeado com a pressão. Sistema Experimental I; $K_a = 3850 \mu\text{S.cm}^{-1}$; $K_a = 7300 \mu\text{S.cm}^{-1}$; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

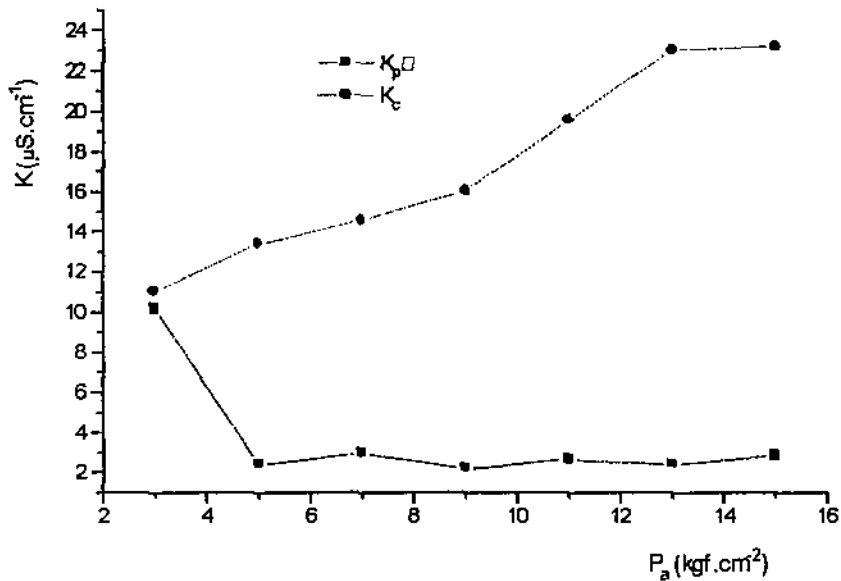


Figura 4.3 – Variação da condutividade elétrica do permeado e do concentrado com a pressão. Sistema Experimental I; $K_a = 13,5 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

A Figura 4.3 mostra que a condutividade elétrica do permeado diminui com o aumento da pressão, enquanto a condutividade elétrica do concentrado aumenta.

4.3 – Variação da vazão do permeado e concentrado com a pressão

Pelas Figuras 4.4 e 4.5 correspondentes às Tabelas 4.29 e 4.30, observa-se que um aumento da pressão provoca um aumento da vazão de permeado, portanto, um aumento na recuperação como mostram as equações 2.2 e 2.9 do Capítulo II.

$$Q_p = Ak_w(\Delta P - \Delta\pi) \quad (2.2)$$

$$r = (Q_p/Q_a)100\% \quad (2.9)$$

Sendo A constante e k_w e $\Delta\pi$ aproximadamente constantes, a vazão do permeado é função da pressão de alimentação. Sendo a recuperação dada pela Equação 2.9, um aumento da pressão provoca um aumento da vazão do permeado e conseqüentemente um aumento da recuperação. Assim, para a osmose inversa, o sistema produz mais água permeada se funcionar na pressão máxima permissível de operação. Não deve-se ultrapassar o limite de pressão máxima porque pode provocar problemas de compactação e precipitação de sais na membrana, aumentando-se, assim, a concentração de polarização e conseqüente diminuição da produção de permeado.

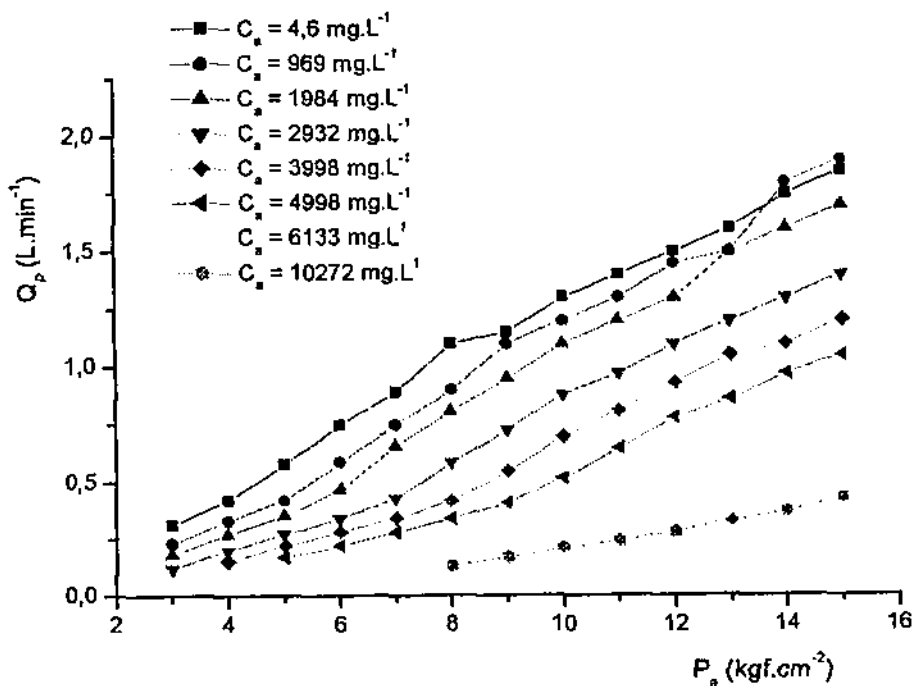


Figura 4.4 – Variação da vazão do permeado com a pressão. Sistema Experimental I; $T_m = 25 \pm 1$ °C.

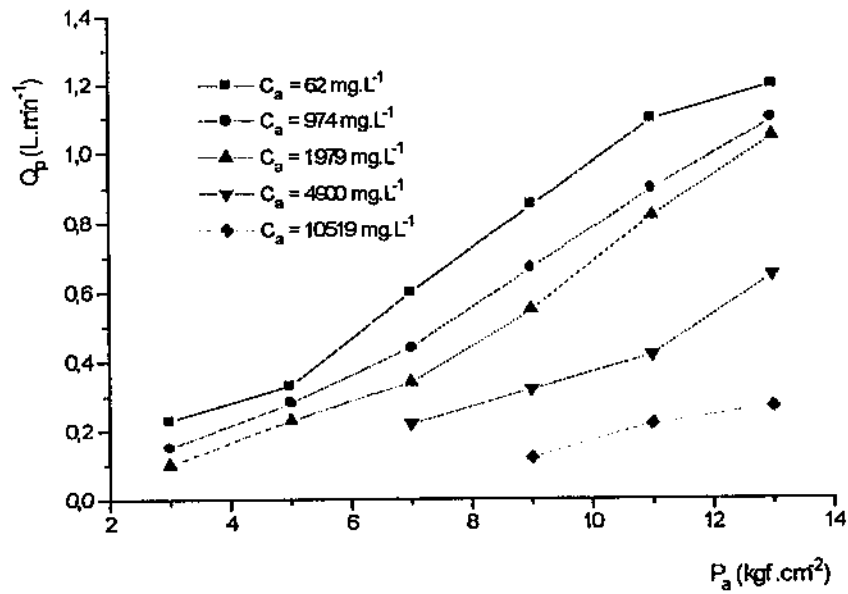


Figura 4.5 – Variação da vazão do permeado com a pressão. Sistema Experimental II; $T_a = 25 \pm 1$ °C.

A Figura 4.6 (correspondente à Tabela 4.31) mostra que enquanto a vazão do permeado aumenta com a pressão, a vazão do concentrado diminui de igual proporção com o aumento desta.

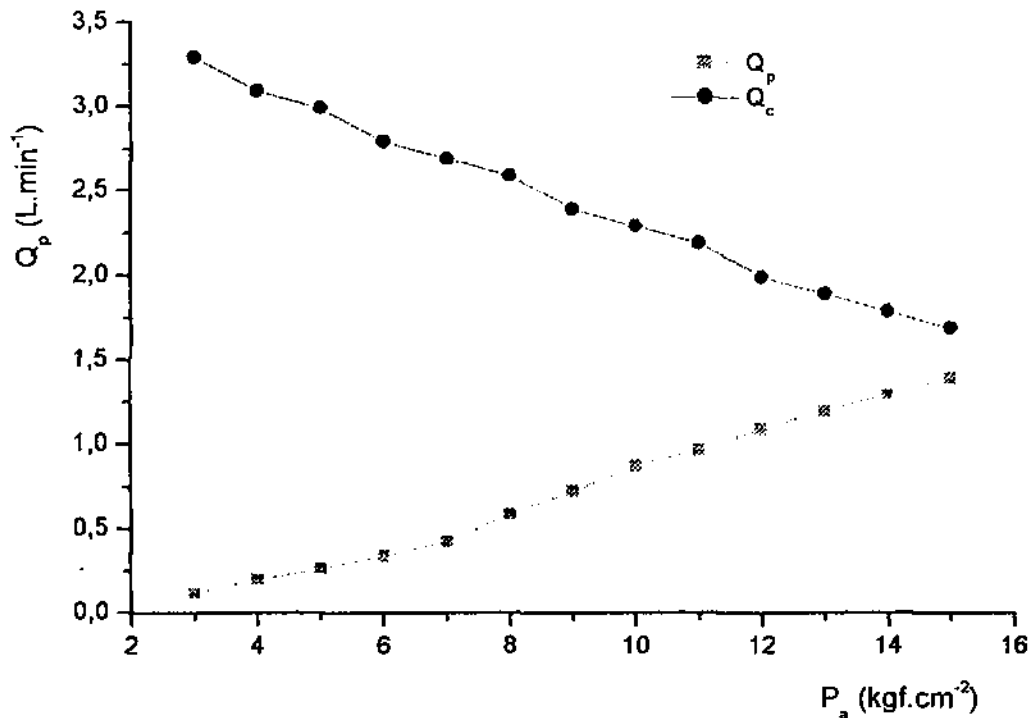


Figura 4.6 – Variação da vazão do permeado e do concentrado com a pressão. Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1$ °C.

4.4 – Variação da vazão do permeado (e recuperação) com a concentração de alimentação

A vazão do permeado apresentou um decréscimo com o aumento da concentração da solução de alimentação à pressão constante (Figuras 4.7 e 4.8, correspondente às Tabelas 4.32 e 4.33, respectivamente). Em função do aumento da concentração da solução de alimentação, a taxa de acumulação de sais na superfície da membrana aumenta, formando assim uma camada, a qual oferece resistência à permeação da água. Esta elevação da concentração aumenta a diferença de pressão osmótica da solução, restando um menor gradiente de pressão líquida ($\Delta P - \Delta \pi$) para fazer com que a água permeie a membrana,

passando a ser um fator que contribui para o decréscimo do fluxo do permeado e aumento da sua condutividade elétrica.

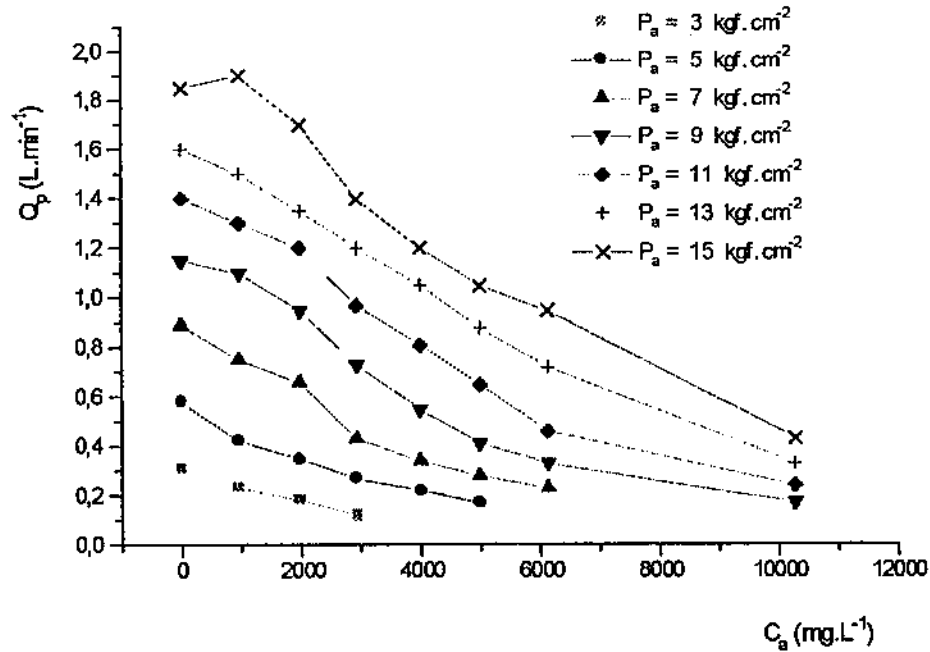


Figura 4.7 - Variação da vazão do permeado com a concentração de alimentação, para a pressão variando de 3 até 15 kgf.cm⁻². Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1$ °C.

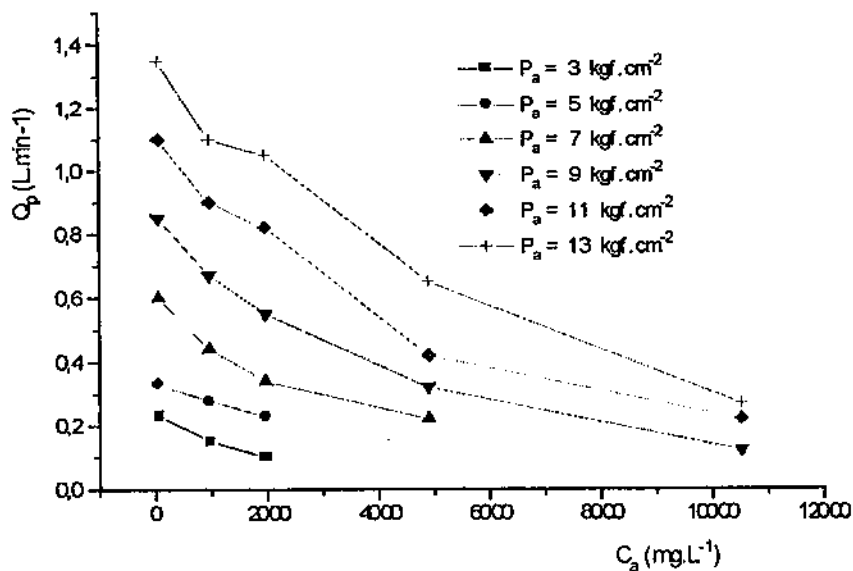


Figura 4.8- Variação da vazão do permeado com a concentração de alimentação, para a pressão variando de 3 até 13 kgf.cm⁻². Sistema Experimental II; $T_a = 25 \pm 1$ °C.

4.5 – Variação da potência elétrica com a pressão

Pelas Figuras 4.9 e 4.10, correspondentes às Tabelas 4.34 e 4.35, respectivamente, observa-se que a potência elétrica do motor da bomba de alta pressão aumenta linearmente com a pressão aplicada. Sabe-se que a potência requerida pelo motor da bomba depende da pressão de descarga e da vazão de alimentação. Nesse caso, a vazão de alimentação é constante, portanto, para fornecer uma pressão maior ao sistema de osmose inversa, a bomba necessita de mais potência.

A Figura 4.9 mostra que para o sistema funcionar a uma pressão de 5 kgf.cm^{-2} necessita-se de uma potência elétrica de cerca de 130 W ; já para uma pressão de 11 kgf.cm^{-2} a potência elétrica requerida é de cerca de 280 W .

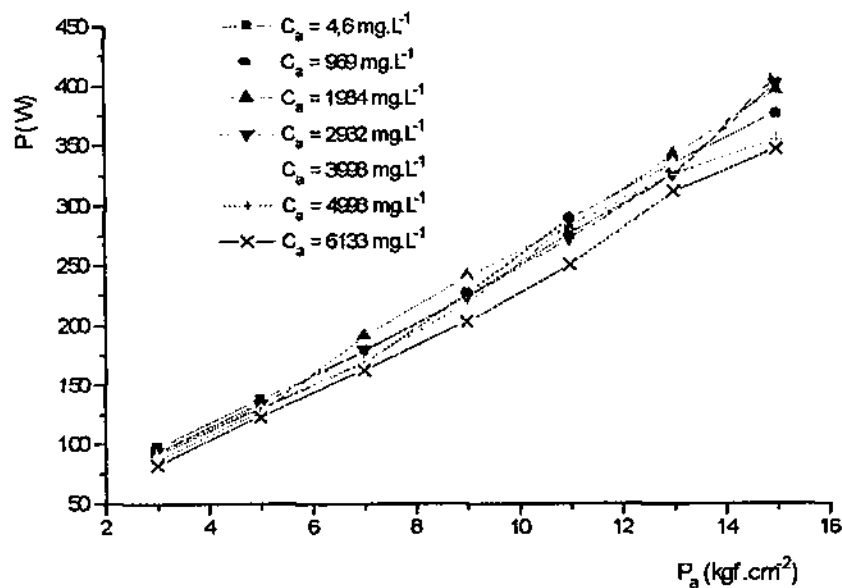


Figura 4.9 – Variação da potência elétrica com a pressão, para a concentração de alimentação variando de $4,6$ até 6133 mg.L^{-1} . Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

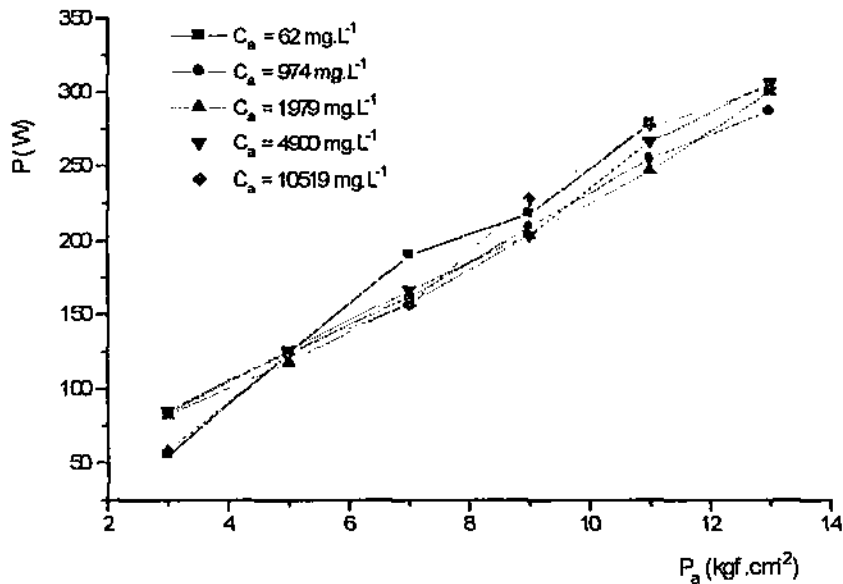


Figura 4.10 – Variação da potência elétrica com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 62 até 10519 mg.L⁻¹. Sistema Experimental II; $T_m = 25 \pm 1$ °C.

Para os sistemas de osmose inversa alimentados por energia solar fotovoltaica é importante e necessário trabalhar com sistemas bastante otimizados no que diz respeito ao consumo de energia, devido ao custo mais elevado da energia fotovoltaica. A membrana é um elemento de fundamental importância na economia de energia, já que existem tipos de membranas que produzem mais permeado a uma pressão mais baixa, e conseqüentemente, a um consumo de potência e energia menores (Hydranautics, 1998). Outro elemento importante é a bomba de alta pressão. Nesse sentido, estudou-se a variação da tensão aplicada ao motor da bomba usando um variômetro para procurar a potência mínima que deve ser fornecida ao sistema para que ele pudesse funcionar nas mesmas condições de pressão, vazão, condutividade elétrica, pH, etc.

4.6 – Variação da potência elétrica com a tensão elétrica

Ao se abaixar a tensão elétrica V , a potência elétrica de trabalho do motor da bomba, dada pela Equação $P = VI$ (2.23), diminui até chegar a um valor mínimo que é a potência mínima que ainda faz o sistema funcionar, mantendo a pressão constante, portanto, a mesma produção de permeado. Essa potência mínima corresponde a tensão mínima necessária para que o sistema funcione sem alterações. Abaixo desta tensão mínima, as medidas mostram que a pressão aplicada diminui, o que significa que o motor não tem potência suficiente para fornecer a pressão desejada. Consequentemente, com a diminuição da pressão, a vazão do permeado diminui (Figura 4.4). Então, essa tensão mínima corresponde à potência mínima de funcionamento do motor da bomba.

Para cada pressão de operação regulada, obtém-se uma potência mínima a partir das curvas representadas nas Figuras 4.11 e 4.12 (correspondentes às Tabelas 4.36 e 4.37, respectivamente) para os dois sistemas experimentais estudados (I e II), respectivamente.

Com este procedimento chegou-se a quantificar a potência mínima, o que permite calcular a energia mínima de funcionamento do sistema de osmose inversa.

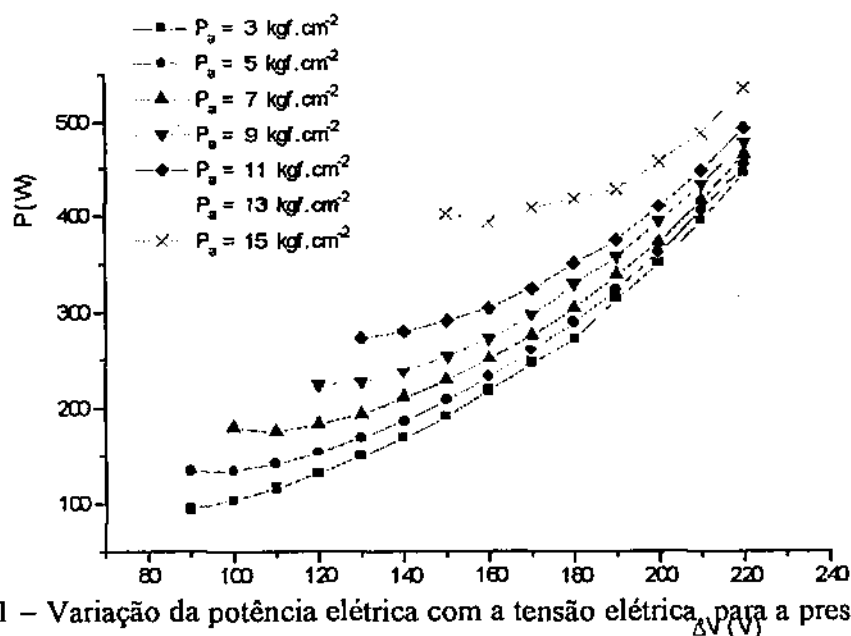


Figura 4.11 – Variação da potência elétrica com a tensão elétrica, para a pressão variando de 3 até 15 kgf.cm^{-2} . Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $C_a = 2932 \text{ mg.L}^{-1}$.

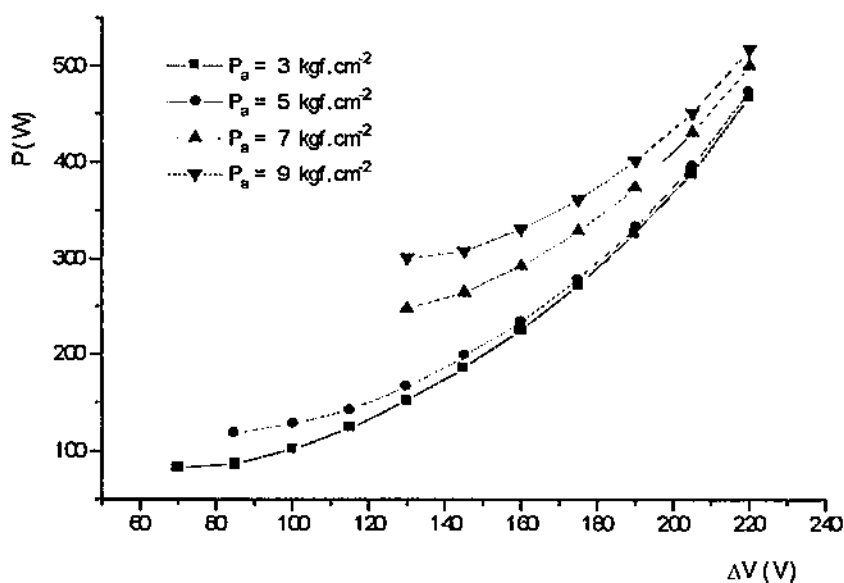


Figura 4.12 - Variação da potência elétrica com a tensão elétrica, para a pressão variando de 3 até 13 kgf.cm⁻². Sistema Experimental II; T_n = 25 ± 1 °C; C_n = 1979 mg.L⁻¹.

4.7 – Variação da energia com a tensão elétrica

A energia consumida pelo sistema é calculada de acordo com a Equação 2.22:

$$\text{Energia (E}_{\text{exp}}) = \text{Potência elétrica (P)} / \text{vazão de permeado (Q}_p) \quad (2.22)$$

ou seja, a energia experimental E_{exp} obtida é a razão entre a potência elétrica P e a vazão de permeado Q_p. Como a vazão de permeado permanece constante e a potência elétrica diminui ao se variar a tensão elétrica no varivolt (Figuras 4.11 e 4.12), a energia experimental calculada pela Equação 2.22 diminui como mostrada nas Figuras 4.13 e 4.14, correspondentes ao Sistema Experimental I estudado (Tabelas 4.38 e 4.39)

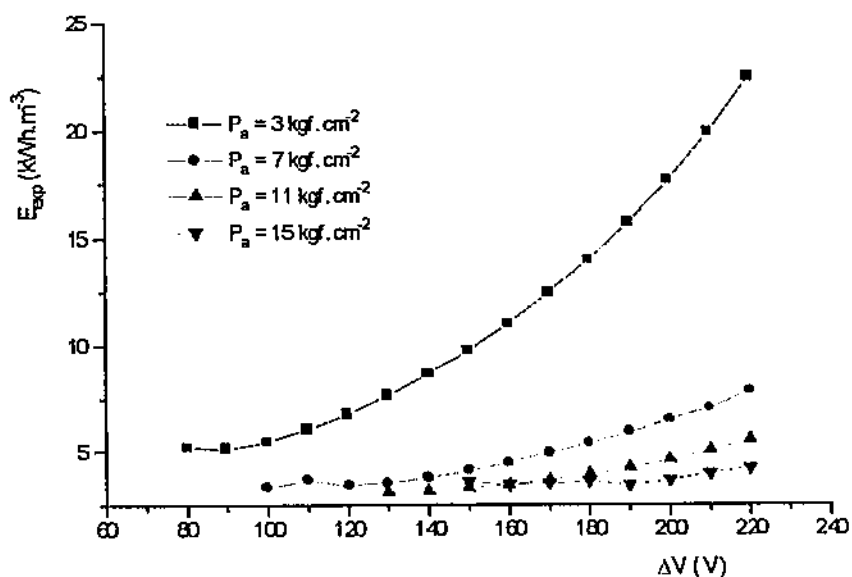


Figura 4.13 – Variação da energia com a tensão elétrica, para a pressão variando de 3 até 15 kgf.cm⁻². Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1$ °C; $C_a = 4,6$ mg.L⁻¹

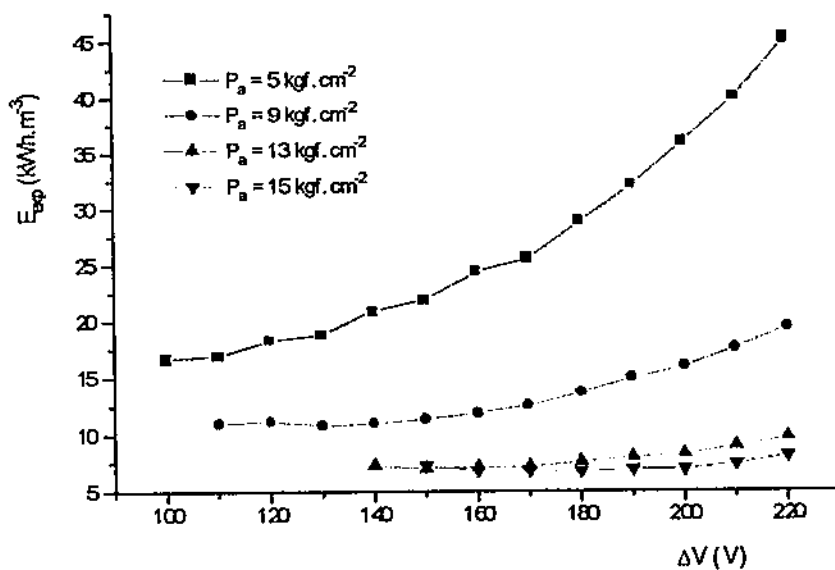


Figura 4.14 – Variação da energia com a tensão elétrica, para a pressão variando de 5 até 15 kgf.cm⁻². Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1$ °C; $C_a = 4998$ mg.L⁻¹

As Figuras mostram que a energia experimental calculada a partir da equação 2.22 atinge um valor mínimo correspondente ao valor mínimo da potência.

4.8 - Variação da energia com a pressão

Pelos dados das Figuras 4.9 e 4.10, um aumento da pressão de operação requer um aumento de potência elétrica requerida pela bomba de pressão. Pela Equação 2.2 e pelas Figuras 4.4 e 4.5, um aumento de pressão provoca um aumento da vazão de permeado:

$$Q_p = Ak_w(\Delta P - \Delta\pi) \quad (2.2)$$

Assim, a energia consumida por metro cúbico de água dessalinizada dada por

$$E_{exp} = P/(60Q_p) \quad (2.22)$$

diminui em função da pressão aplicada, como mostram as Figuras 4.15 e 4.16, correspondentes às Tabelas 4.40 e 4.41.

De maneira análoga, relacionando os dados de pressão e recuperação na Equação teórica para o cálculo de energia,

$$E_{teórico} = (0,0287P_n)/(r \eta_m \eta_b) \quad (2.21)$$

também mostra que a energia é função direta do aumento da pressão e inversa do aumento da recuperação. Porém, o que se observou na prática usando dados experimentais foi que um aumento de pressão provoca uma diminuição global da energia consumida por metro cúbico de água dessalinizada tanto utilizando a Equação 2.22 para energia experimental quanto a Equação 2.21, para energia teórica.

Assim, a energia mínima obtida para cada concentração dá-se na pressão máxima de operação permitida pelo fabricante da membrana, conforme observa-se nas Figuras 4.15 e 4.16 (referentes às Tabelas 4.40 e 4.41, respectivamente).

O menor consumo de energia experimental obtido neste trabalho para uma solução de cloreto de sódio de concentração 2932 mg.L⁻¹ foi de 4,84 kWh.m⁻³, valor bastante alto quando comparado com valores da literatura (0,82-1,50 kWh.m⁻³), (Amjad, 1993).

Atribui-se que este valor alto seja devido a pequena área de permeação das membranas em relação a potência da bomba usada, ao tipo de membrana utilizado e ao rendimento baixo do motor. A maneira para diminuir-se o consumo de energia seria

aumentar a área de permeação e, assim, aumentar o volume de permeado, utilizar membranas que requerem baixa pressão de operação e/ou operar com motores mais eficientes.

Os valores experimentais de energia obtidos concordaram bem com os valores de energia obtidos a partir da Equação teórica 2.21, e de dados de simulação obtidos do programa computacional da Hydranautics (Hydranautics, 1998). As Figuras 4.17 e 4.18 correspondentes às Tabelas 4.42 e 4.43, respectivamente, mostram estes resultados.

Na Equação 2.27 tomou-se o valor de eficiência para o motor de 40%, conforme a Tabela 3.1, que mostra a eficiência do motor dada pelo fabricante. Para a bomba adotou-se o valor de eficiência de 55%.

Motores mais eficientes consomem menos energia para um mesmo trabalho fornecido ao sistema; assim, a busca de motores e equipamentos mais eficientes para um sistema de energia solar é um fato importante a ser levado em consideração. Sugere-se verificar a eficiência de motores de corrente contínua, que podem ter uma eficiência maior do que os motores pequenos de corrente alternada, além de não necessitarem de inversor, que é um equipamento bastante caro.

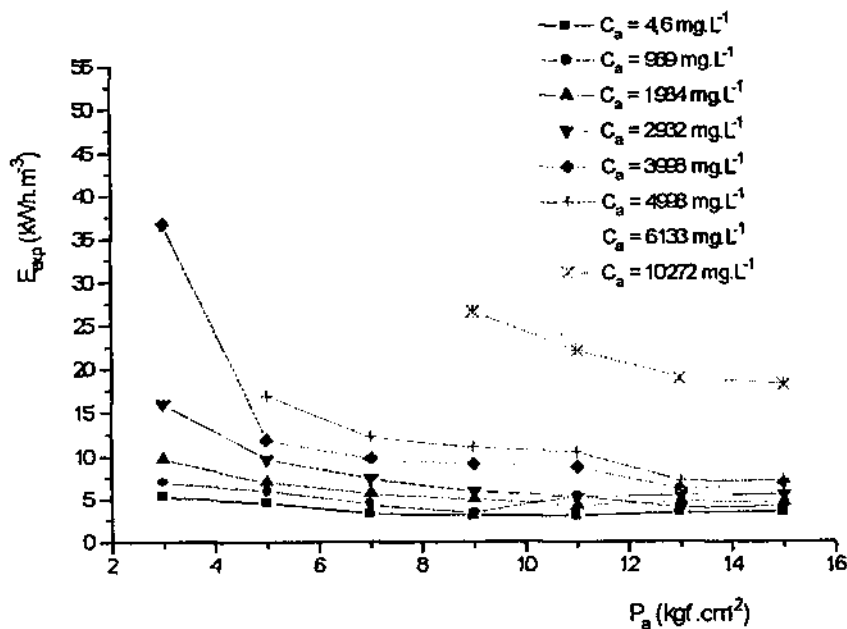


Figura 4.15 – Variação da energia com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 4,6 até 10272 mg.L⁻¹. Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1$ °C.

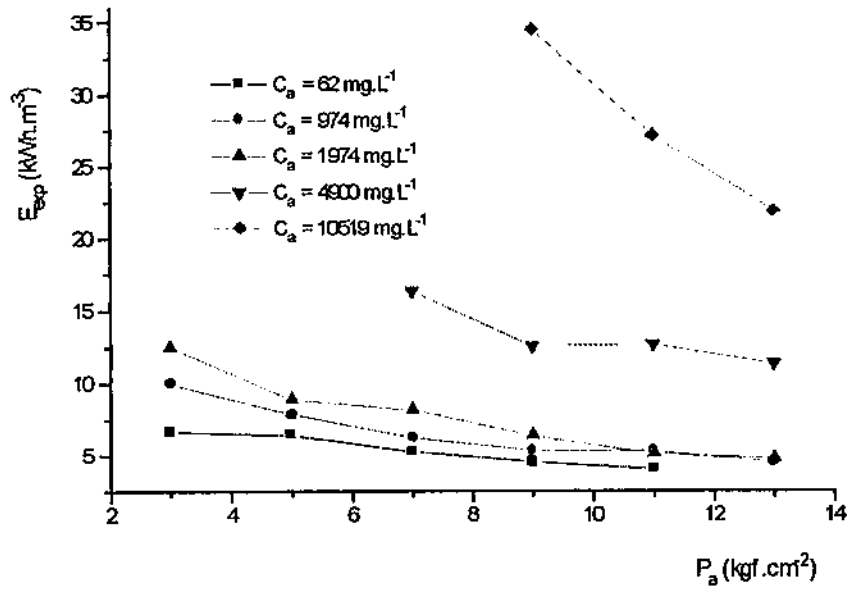


Figura 4.16 - Variação da energia com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 62 até 10519 mg.L^{-1} . Sistema Experimental II; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

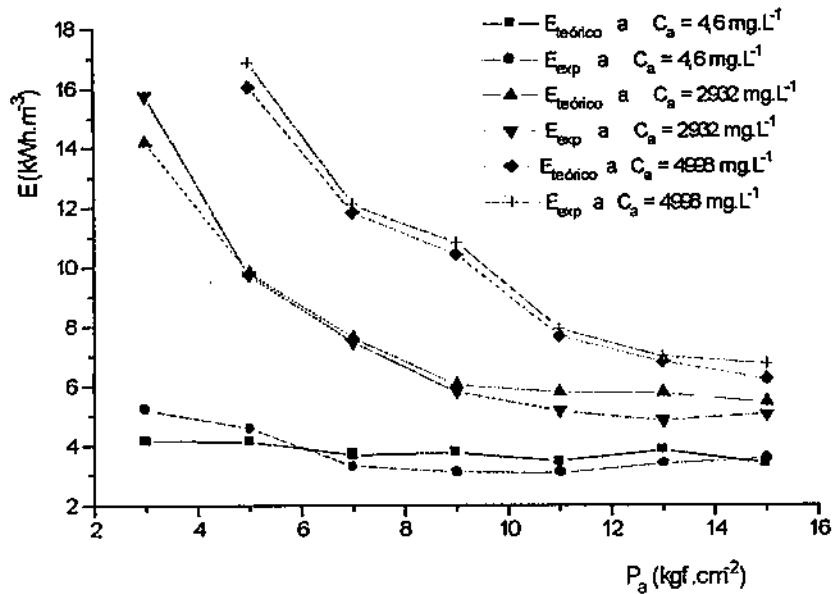


Figura 4.17 - Variação das energias teórica e experimental com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 4,6 até 4998 mg.L^{-1} . Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

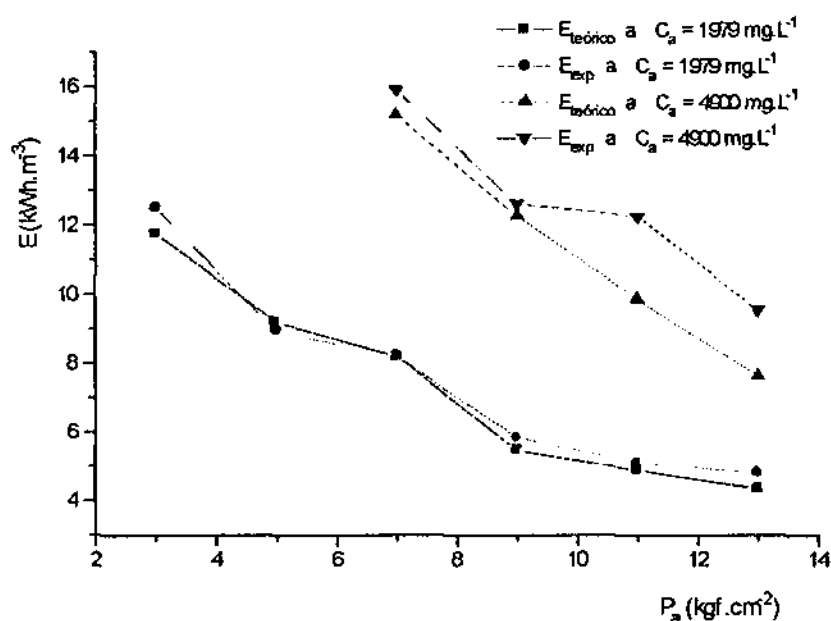


Figura 4.18 - Variação das energias teórica e experimental com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 1979 até 4900 mg.L⁻¹. Sistema Experimental II; $T_a = 25 \pm 1$ °C.

4.9 - Custo da água dessalinizada

O custo da energia solar fotovoltaica foi calculado no Apêndice I. É um valor aproximado pois depende de inúmeros fatores, como número e custo de painéis e baterias, custo dos equipamentos de energia solar como inversor, controlador de carga, etc., número de horas de irradiação solar por dia, etc. Porém, o valor encontrado de 0,73 R\$.kWh⁻¹ mostrou estar próximo aos valores da literatura e ser um valor considerado bom para propósitos práticos. O custo do kWh de energia convencional é aproximadamente R\$ 0,18 (CELB – Companhia de Eletricidade da Borborema, março – 2000). Significa que a energia fotovoltaica é cerca de 305% mais cara que a energia convencional. Assim, o custo do metro cúbico da água dessalinizada utilizando energia elétrica convencional, para uma concentração de alimentação de 2932 mg.L⁻¹, foi de R\$ 1,53 e utilizando energia

fotovoltaica foi de R\$ 6,25 (ver Apêndice I). Estes custos foram calculados utilizando-se as Equações 2.38 e 2.39 do Capítulo II. Mesmo com o sistema estudado, que se mostrou bastante ineficiente, o custo da água dessalinizada mostrou ficar abaixo do custo da água de caminhões pipa (cerca de R\$ 10,00/m³). Assim, os sistemas de dessalinização acionados por energia solar fotovoltaica somente são viáveis nas localidades onde ainda não existe energia convencional devido o custo alto da energia fotovoltaica e também ao fato de o sistema de energia solar necessitar de um investimento inicial alto. Outro fator que pode tornar inviável um sistema de osmose inversa acionado por energia fotovoltaica é a concentração da solução de alimentação ser muito alta. Como pode-se observar pelas Figuras 4.19 e 4.20 (correspondentes às Tabelas 4.44 e 4.45, respectivamente) o custo da água dessalinizada aumenta com o aumento da concentração da solução de alimentação.

Caso o sistema experimental estudado fosse eficiente em relação à energia, este apresentaria um consumo de cerca de 50% menor e, assim, um custo da água dessalinizada cerca de 50% menor.

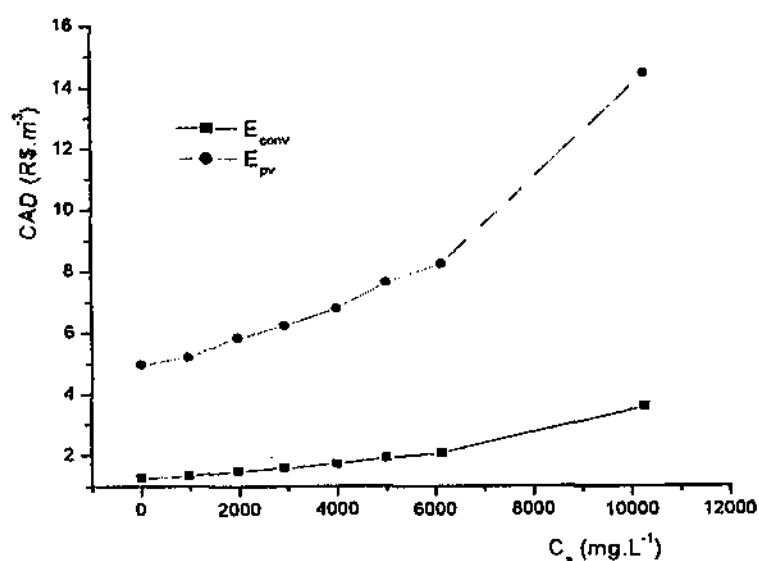


Figura 4.19 - Variação do custo da água dessalinizada com a concentração de alimentação, utilizando-se energia convencional e fotovoltaica. Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

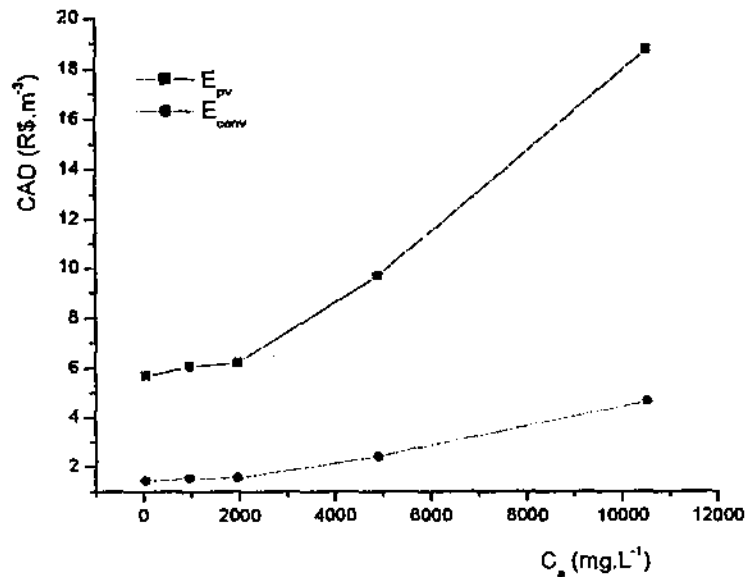


Figura 4.20 - Variação do custo da água dessalinizada com a concentração de alimentação, utilizando-se energia convencional e fotovoltaica. Sistema Experimental II; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

As águas salobras encontradas na Região Nordeste possuem uma salinidade média da ordem de 3000 a 5000 mg.L⁻¹. Desta forma este trabalho procurou estudar um sistema de dessalinização via osmose inversa com concentrações de cloreto de sódio variando de 4,6 mg.L⁻¹ a 10519 mg.L⁻¹. No exemplo prático (dado no Apêndice I) utilizou-se uma salinidade de 2932 mg.L⁻¹, que é condizente com a realidade da Região Nordeste do Brasil. O Sistema Experimental II apresentou resultados semelhantes aos do Sistema Experimental I em relação a todos os parâmetros estudados e, conseqüentemente, ao custo da água dessalinizada.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se concluir que:

- A condutividade elétrica do permeado diminuiu e a do concentrado aumentou com o aumento da pressão.
- A produção de permeado aumentou e a do concentrado diminuiu com o aumento da pressão.
- A produção de permeado decresceu e a do concentrado aumentou com o aumento da condutividade elétrica da solução de alimentação.
- Com o aumento da pressão, houve um aumento da potência elétrica requerida pelo motor.
- Com a diminuição da tensão elétrica, houve diminuição da potência elétrica requerida pelo motor e, conseqüentemente, diminuição da energia necessária para o processo.
- A taxa de recuperação do sistema como também o custo da água dessalinizada dependem da concentração das espécies presentes na solução de alimentação e da pressão aplicada.
- Ocorreu menor consumo de energia na pressão máxima de operação.
- Com os sistemas de osmose inversa acionados por energia solar fotovoltaica, é muito importante que se utilize equipamentos os mais eficientes possíveis, para a viabilidade do processo.
- O consumo de energia experimental apresentou resultados satisfatórios quando comparados com os resultados teóricos.

CAPÍTULO VI

PERSPECTIVAS

Para a continuidade desta pesquisa, sugerimos desenvolver o seguinte:

- Em função da potência da bomba de alta pressão, determinar o número máximo de membranas que o sistema possa operar apresentando maior produção de água potável e menor consumo de energia.
- Estudar a diminuição do custo da energia e do aumento da oferta de água potável que se pode obter com a mistura da água permeada com parte da solução de alimentação.
- Estudar como varia o consumo energético com o tipo de arranjo das membranas e com o tipo de membrana utilizada.
- Em função da aplicação do trabalho procurar usá-lo diretamente no campo no sentido de beneficiar pequenas comunidades com água de boa qualidade e a um custo aceitável.
- Fazer um estudo comparativo dos dados acima citados com dados de simulação de programas computacionais de empresas do ramo de osmose inversa.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAWAJI, S. H., SMIAI, M. S., RAFIQUE, S., STAFFORD, B. *PV – Powered Water Pumping and Desalination Plant for Remote Areas in Saudi Arabia for Remote Areas in Saudi Arabia*. Applied Energy, 52, p.283-289. 1995.
- ALMEIDA, J. A. de. *As Secas do Nordeste*. 2ª edição. Coleção Mossoroense. v. CLXXVII. Coedição da Fundação Casa de José Américo e Fundação Guimarães Duque, 1981.
- AMJAD, Z. *Reverse Osmosis. Membrane Technology, Water Chemistry, and Industrial Applications*. New York, USA, 1993.
- AYOUB, J. & ALWARD, R. *Water Requirements and Remote Arid Areas: The Need for Small-Scale Desalination*. Desalination. v.107, p.131-147, 1996.
- BARBOSA, A. *Venda de Água Vira Bom Negócio na Paraíba*. Folha de São Paulo Free-lance para a Agência Folha em João Pessoa. São Paulo, 12/11/1997.
- BELESSIOTIS, V. & DELYANNIS, E. *Solar Energy: Some Proposals for Future Development and Application to Desalination*. Desalination v.105, p.151-158, 1996.
- BEZERRA, A. M. *Aplicações Térmicas da Energia Solar*. Universitária/UFPB, João Pessoa, 1986.
- CERAGIOLLI, P. C. *Manual de Energia Solar Fotovoltáica*. RF Comércio de Sistemas LTDA. São José dos Campos, São Paulo, 1997.
- DIAS, A. B. S. *Estudo e Desempenho de um Protótipo de um Reator para Dessalinização de Soluções Salinas Via Osmose Inversa*. Campina Grande, 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba.
- DOW LATIN AMÉRICA. *Conceitos Básicos sobre Osmose Reversa*, 1996.

- DUARTE, R. *Transposição das Águas do Rio São Francisco: Riquezas para o Semi-Árido*. Discursos. Brasília, DF. Senado Federal, 1994.
- FOUST, A. S., WENZEL, L. A., CLUMP, C. W., MAUS, L., ANDERSEN, L.B. *Princípio das Operações Unitárias*. 2ª edição. Guanabara Dois S.A Rio de Janeiro, 1982.
- FRANÇA, D. *O Planeta Água Está Secando*. Revista Globo Ciência nº 85. Agosto/1998.
- GOLDENBERG, J. *Energia no Brasil*. Livros Técnicos e Científicos S.A. Rio de Janeiro, 1979.
- GRILO, M. B. *Estudos para Modificações dos Parâmetros no Modelo do Coletor Solar Bifásico*. Campina Grande, 1998. Projeto e Pesquisa de Doutorado em Engenharia Elétrica – Universidade Federal da Paraíba.
- GUERRA, P. B. *A Civilização da Seca*. Ministério do Interior/DNOCS. Fortaleza, Ceará, 1981.
- HABERT, A. C., BORGES, C. P., NÓBREGA, R. *Processos de Separação com Membranas*. Escola Piloto em Engenharia Química, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1997.
- HASNAIN, S. M. & ALAJLAN, S. A. *Coupling of PV – Powered RO Brackish Water Desalination Plant with Solar Stills*. Desalination. v.116, p.57-64, 1998.
- HELIODINAMICA S.A *Manual Técnico de Instalação de Placas Solares*. São Paulo, 1999.
- HIMMELBLAU, D. M. *Engenharia Química: Princípios e Cálculos*. 4ª edição. Prentice-Hall do Brasil, Rio de Janeiro, 1984.
- HYDRANAUTICS. *RO System Design Software*. version 64(c), 1998.
- IDAE- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. *Manuales de Energías Renovables*, v.6. *Energia solar fotovoltaica*. Edição especial Cinco Dias. Gráfica Internacional, S.A. Espanha, 1995.
- JORGE, J.; *Energia Eólica*. Coleção Educação, Ciência e Tecnologia. nº 4. Senado Federal. Brasília, DF, 1999.

- KEEFER, B. G., HEMBREE, R. D., SCHARACK, F. C. *Optimized Matching of Solar Photovoltaic Power with Reverse Osmosis Desalination*. Desalination. v.54, p.89 – 103, 1985.
- LIEBENTHAL, A., MATHUR, S., WADE, H. *Solar Energy. Lessons from the Pacifica Island Experience*. World Bank Technical Paper Number 244. Energy Series. Washington, D.C., USA, 1994.
- LOEB, S. & SOURIRAJAN, S. UCLA Department of Engineering Report 60-60, July 1960.
- LOEB, S. & SOURIRAJAN, S. *Saline Water Conversion II*. Advances in Chemistry Series, nº 38, American Chemistry Soc., p.117, Washington, D. C., 1963.
- LONSDALE, H. K. *The Growth of Membrane Technology*. Journal of Membrane Science. v.10, p.81-181, 1982.
- MALLEVIALLE, J., ODENDAAL, P. E., WIESNER, M. R. *Water Treatment Membrane Processes*. American Water Works Association Research Foundation; Lyonnaise des Eaux; Water Research Comission of South Africa. McGraw-Hill. Washington, DC, USA, 1996
- MANUAL DE DESSALINIZAÇÃO PARA PLANEJADORES. Secretaria de Recuperação, Engenharia e Centro de Pesquisas de Denver, Colorado, EUA, 1972.
- MAHON, H. I. *Permeability Separating Apparatus and Process Utilizing Hollow Fibers*. US Patent 3, 228, 877. January 11, 1966.
- MCVEIGH, J.C. *Sun Power - an Introduction to the Applications of Solar Energy*. Pergamon International Library. England, 1979.
- MEMBRANE FILTRATION SYSTEMS. Conceitos Básicos. Sistemas e Membranas de Osmose Reversa. 1996.

- MILOW, B. & ZARZA, E.- *Advanced MED Solar Desalination Plants. Configurations, Costs, Future – Seven Years of Experience at the Plataforma Solar de Almeria (Spain)*. Desalination. v.108, p.51-58, 1996.
- MORENO, M. *Compesa Avalia Dessalinização da Água*. Diário de Pernambuco, edição de 09/05/1999. Recife, 1999. Caderno Vida Urbana.
- MULDER, M. *Membrane Process, Basic Principle of Membrane*. Klumer Academic Publishers, Netherlands, 1991.
- NEFF, H. F., DEEP, G. S., GOMES, F. S. V. *Aplicação da Energia Solar como Fonte de Alimentação para Sistemas Dessalinizadores*. Campina Grande, 1999. Relatório Parcial PIBIC-CNPQ. Universidade Federal da Paraíba.
- NOLLET, J.A. *Leçons de Physique Expérimentale*. Paris, 1748.
- PALZ, W. *Energia Solar e Fontes Alternativas*. Hemus. São Paulo, 1981.
- PERRY, R. H. & GREEN, D. W. *Chemical Engineering Handbook*. McGraw-Hill Seção 17; p.36-45. USA, 1984.
- PINTO, M. S. *As Secas do Nordeste*. Fundação Salim Farah Maluf. Rio de Janeiro, 1985.
- PORTELA, F. & ANDRADE, J. C. de. *Secas no Nordeste*. Ática. 2ª edição. São Paulo, 1989.
- PORTER, M. C. *Handbook of Industrial Membrane Technology*. Noyes Publications. New Jersey, USA, 1990.
- RADIASOL – *Radiação Solar, versão 1.1*. GESTE: Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos – Escola de Engenharia. Janeiro/1998. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- REID, C. E. & BRETON, E. J. *Journal of Appl. Polymer Science*. p.133, 1959.
- SCHWEITZER, P. A. *Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers*. McGraw-Hill. 1979.
- SILVEIRA, M. C. da. *Avaliação de um Sistema Híbrido para Dessalinização de Águas Salinas pelo Processo de Osmose Inversa*. Campina Grande, 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba.
- STRATHMANN, H. Economic Assessment of Membrane Processes. Teti-Napole-Italia, dezembro de 1992. In: *Proceedings of the CEE – Brazil. Workshop on Membrane Separation Processes*. Rio de Janeiro, mar. 3-8, 1992.
- SWEEDLER, A. R. Photovoltaics: Assessment and Opportunities for Brazil. In: ROVERE, Emílio Lèbre La. & ROBERT, Marcelo. *Capacitação para a Tomada de Decisões na Área de Energia*. Escritório Regional de Ciências e Tecnologia da Unesco para a América Latina e o Caribe. Montevideu, Uruguai, 1985.
- TRAUBE, M. Physiologie und Wisseischlafliche Medicin, in: *Reischert and Dubois-Reynolds*, eds., *Archiv fuz Anatomie*, Leipzig, 1867.
- VOROS, N. G., KIRANOUDIS, C. T., MAROULIS, Z. B. *Solar Energy Exploitation for Reverse Osmosis Desalination Plants*. *Desalination*. v.115, p.83-101, 1998.
- WEG. *Motores Trifásicos e Monofásicos: Manual de Especificações Técnicas*. Santa Catarina. Julho/1997.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Guidelines for Drinking Water Quality*, v.1, Recommendations, Genebra, 1984.
- ZEGNA, G. *Fontes de Energia*. Ática S.A. Série Ponto por Ponto. São Paulo, 1991.

APÊNDICE I

DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE ENERGIA SOLAR PARA OSMOSE INVERSA

DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE ENERGIA SOLAR PARA OSMOSE INVERSA

Neste exemplo de dimensionamento, utilizou-se dados experimentais para o sistema de osmose inversa acionado por um motor de corrente alternada. Apenas como comparação, para se verificar qual sistema é mais viável, se aquele utilizado por um motor de corrente alternada ou aquele formado por um motor de corrente contínua (neste caso os dados utilizados são teóricos), se fez o dimensionamento também para um sistema de osmose inversa com um motor de corrente contínua.

Dados:

- Sistema Experimental I
- $C_a = 2932 \text{ mg.L}^{-1}$
- $P_a = 15 \text{ kgf.cm}^{-2}$
- $r = 41,2\%$
- $Q_p = 0,504 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ ou $2,016 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$.
- $P_{ca} = P_{cc} = 427,5 \text{ W}$
- $H_{ca} = H_{cc} = 6 \text{ h.dia}^{-1}$
- $N_{ca} = N_{cc} = 1$ (motor)
- Módulos de $110 \text{ W}_{\text{pico}}$
- $E_{\text{exp}} = 4,84 \text{ kWh.m}^{-3}$
- $I_{\text{pmáx}} = 6,67 \text{ A}$
- $V_{\text{pmáx}} = 16,5 \text{ V}$
- $\eta_i = 90\%$
- $D_a = 1 \text{ dia}$
- $Q_{1b} = 150 \text{ Ah}$
- $T_s = 12 \text{ V}$
- $M = 70\%$
- $g = 3,83 \text{ h.dia}^{-1}$ (mês de julho, em Campina Grande – PB, da Tabela 2.5)
- $M_s = 20\%$
- $F_p = 9125 \text{ dias}$
- $F_v = 3650 \text{ dias}$
- $F_b = 1095 \text{ dias}$
- $C_{1p} = \text{R\$ } 979,00$
- $C_v = \text{R\$ } 5000,00$
- $C_{1b} = \text{R\$ } 150,00$

- $C_o = R\$ 4000,00$
- $F_o = 2920$ dias
- $CE_{conv} = 0,18 R\$.kWh^{-1}$

CÁLCULOS

a) Energia consumida pelo motor (E_t)

No sistema, como equipamento de consumo de energia, só existe um motor de corrente alternada. Assim, utiliza-se a Equação 2.25:

$$E_t = [(100 + M_s)/\eta_i]P_{cn}H_{cn}N_{ca} \quad (2.25)$$

Substituindo-se os valores numéricos nesta Equação, tem-se:

$$E_t = [(100 + 20)/90]427,5 \times 6 \times 1 = 3,42 \text{ kWh.dia}^{-1}$$

Caso fosse utilizado um motor de corrente contínua, teríamos que a Equação utilizada seria a Equação 2.24:

$$E_t = [(100 + M_s)/100]P_{cc}H_{cc}N_{cc} \quad (2.24)$$

Substituindo-se os valores numéricos nesta Equação resulta:

$$E_t = [(100 + 20)/100]427,5 \times 6 \times 1 \quad (2.25)$$

$$E_t = 3,08 \text{ kWh.dia}^{-1}$$

b) Energia fornecida por um painel (E_{1p})

É dada pela Equação 2.29:

$$E_{1p} = V_{pm\acute{a}s}I_{pm\acute{a}s}g \quad (2.29)$$

Substituindo-se os valores numéricos nesta Equação resulta:

$$E_{1p} = 16,5 \times 6,67 \times 3,83 = 0,42 \text{ kWh.dia}^{-1}$$

c) Número total de painéis (N_p)

É dado pela Equação 2.30:

$$N_p = 1,1E_i/E_{1p} \quad (2.30)$$

Substituindo-se os valores numéricos do sistema de corrente alternada, tem-se:

$$N_p = 1,1 \times 3,42 / 0,42 = 8,96 \approx 9 \text{ painéis}$$

Substituindo-se os dados do sistema de corrente contínua na Equação 2.30, resulta:

$$N_p = 1,1 \times 3,08 / 0,42 = 8,07 \approx 8 \text{ painéis}$$

d) Capacidade mínima do banco de baterias (Q_b)

É dada pela Equação 2.31:

$$Q_b = (110 \cdot E_i \cdot D_n) / (T_b \cdot M) \quad (2.31)$$

Substituindo-se os valores numéricos para os dados de corrente alternada, tem-se:

$$Q_b = 110(3,42 \times 1) / (12 \times 70) = 448 \text{ Ah.dia}^{-1}$$

Utilizando os dados do sistema de corrente contínua na Equação 2.31, resulta:

$$Q_b = 110(3,08 \times 1) / (12 \times 70) = 403 \text{ Ah.dia}^{-1}$$

e) Número de baterias (N_b)

É dado pela Equação 2.32:

$$N_b = Q_b / Q_{1b} \quad (2.32)$$

Substituindo-se os valores numéricos do sistema de corrente alternada nesta Equação, tem-se:

$$N_b = 448 \text{ Ah.dia}^{-1} / 150 \text{ Ah.dia}^{-1} = 2,98 \approx 3 \text{ baterias}$$

Substituindo-se os valores numéricos do sistema de corrente contínua nesta Equação, tem-se:

$$N_b = 403 \text{ Ah.dia}^{-1} / 150 \text{ Ah.dia}^{-1} = 2,69 \approx 3 \text{ baterias}$$

f) Custo da energia fotovoltaica

O custo da energia fotovoltaica CE_{pv} do sistema é dada por:

$$CE_{pv} = C_{1p}/(E_{1p}F_p) + (C_c)/(N_pE_{1p}F_c) + (N_bC_{1b})/(N_pE_{1p}F_b) \quad (2.37)$$

Substituindo-se os valores numéricos para o sistema de corrente alternada, tem-se:

$$CE_{pv} = (979)/(0,42 \times 9125) + (5000)/(9 \times 0,42 \times 3650) +$$

$$(3 \times 150)/(9 \times 0,42 \times 1095)$$

$$CE_{pv} = 0,2554 + 0,3624 + 0,1087 = 0,73 \text{ R\$} \cdot \text{kWh}^{-1}$$

$$CE_{pv} = (979)/(0,42 \times 9125) + (2000)/(8 \times 0,42 \times 3650) +$$

$$(3 \times 150)/(8 \times 0,42 \times 1095) = 0,53 \text{ R\$} \cdot \text{kWh}^{-1}$$

Comparando os dois sistemas, pode-se concluir que a energia fotovoltaica é mais cara quando se utiliza um sistema de corrente alternada. Assim, a melhor opção seria um sistema a corrente contínua.

l) Custo da água dessalinizada (CAD)

O custo da água dessalinizada devido a energia fotovoltaica é dado pela Equação 2.38:

$$CAD_{pv} = CE_{pv}E_{csp} + C_o/(Q_pF_o) \quad (2.38)$$

Substituindo-se os valores numéricos para o sistema de corrente alternada na Equação 2.38, tem-se:

$$CAD_{pv} = 0,73 \times 4,84 + 4000/(0,504 \times 2920) = 6,25 \text{ R\$} \cdot \text{m}^{-3}$$

Substituindo-se os valores numéricos para o sistema de corrente contínua na Equação 2.38, tem-se:

$$CAD_{pv} = 0,53 \times 4,84 + 4000/(0,504 \times 2920) = 5,28 \text{ R}\$.m^{-3}$$

No caso da energia utilizada ser a energia convencional, o custo da água dessalinizada é calculado pela Equação 2.39:

$$CAD_{conv} = CE_{conv} E_{exp} + C_o/(Q_p F_o) \quad (2.39)$$

Substituindo-se os valores numéricos nesta Equação, tem-se:

$$CAD_{conv} = 0,18 \times 4,84 + 4000/(2,016 \times 2920) = 1,53 \text{ R}\$.m^{-3}$$

APÊNDICE II

COMUNIDADES CARENTES DE ÁGUA POTÁVEL E ENERGIA ELÉTRICA

COMUNIDADES CARENTES DE ÁGUA POTÁVEL E ENERGIA ELÉTRICA

Segundo dados do Projeto COOPERAR– Paraíba, há falta de eletrificação em cerca de 20% da zona rural do Estado, sendo que a zona urbana está 100% eletrificada. Porém, boa parte da eletrificação realizada na zona rural é de baixa potência servindo apenas para o acionamento de eletrodomésticos, não permitindo o acionamento de máquinas de maior potência. Assim, não serve para acionar os sistemas de osmose inversa, que possui uma bomba de alta pressão. Abaixo é apresentada uma Tabela que mostra algumas, das milhares de comunidades do Estado da Paraíba, carentes de água potável e energia elétrica, onde um sistema de dessalinização é justificável. Quando existe água nestas comunidades, geralmente é salobra, imprópria para o consumo humano, animal e irrigação.

Tabela Anexo – Comunidades carentes de água potável e energia elétrica da Paraíba.

* Dados não coletados.

| MUNICÍPIO | COMUNIDADE | HABITANTES | TIPO DE ÁGUA UTILIZADA |
|---------------------|------------------|------------|----------------------------|
| Cabacciras | Vaca Brava | 10 | Água de poço |
| Barra de São Miguel | Mulungu | 250 | Água de poço/caminhão pipa |
| | Macacos | 200 | Água de poço/caminhão pipa |
| | Melancia | 140 | Água de poço/caminhão pipa |
| Arociras | Jurema | 100 | Água de poço |
| Campina Grande | Santa Cruz | 300 | Água de açude |
| | Várzea do Arroz | 300 | Água de açude |
| | Jardim Surubim | 30 | Água de açude |
| Alcantil | Serra Verde | 145 | Água de poço |
| Fagundes | Sítio Costa | 138 | * |
| | Surrão dos Poços | 120 | * |
| Gado Bravo | Alto Grande | 90 | * |

APÊNDICE III

TABELAS REFERENTES AOS GRÁFICOS DO CAPÍTULO IV

TABELAS REFERENTES AOS GRÁFICOS DO CAPÍTULO IV

Tabela 4.1 – Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental I; $K_a = 13,5 \mu\text{S.cm}^{-1}$ ($4,6 \text{ mg.L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta V = 220 \text{ V}$; $\text{pH}_a = 6,36$.

| P_a (kgf.cm^{-2}) | Q_p (L.min^{-1}) | Q_o (L.min^{-1}) | K_p ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | K_o ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | pH_p | pH_o | I (A) |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|---------------|----------|
| 3 | 0,31 | 3,0 | 10,1 | 11,0 | 6,20 | 6,40 | 2,05 |
| 4 | 0,42 | 2,8 | | | | | 2,07 |
| 5 | 0,58 | 2,7 | 2,5 | 13,4 | 6,15 | 6,39 | 2,08 |
| 6 | 0,75 | 2,5 | | | | | 2,09 |
| 7 | 0,89 | 2,4 | 3,0 | 14,6 | 6,19 | 6,42 | 2,11 |
| 8 | 1,10 | 2,3 | | | | | 2,13 |
| 9 | 1,15 | 2,1 | 2,2 | 16,8 | 6,17 | 6,52 | 2,15 |
| 10 | 1,30 | 1,9 | | | | | 2,23 |
| 11 | 1,40 | 1,8 | 2,7 | 19,6 | 6,20 | 6,56 | 2,26 |
| 12 | 1,50 | 1,6 | | | | | 2,28 |
| 13 | 1,60 | 1,5 | 2,4 | 23,2 | 6,23 | 6,50 | 2,33 |
| 14 | 1,75 | 1,4 | | | | | 2,37 |
| 15 | 1,85 | 1,2 | 2,8 | 23,4 | 6,25 | 6,56 | 2,41 |

Tabela 4.2 – Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental I; $K_a = 2000 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (969 mg.L^{-1}); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta V = 220 \text{ V}$; $\text{pH}_a = 6,33$. * Dados não coletados.

| P_a (kgf.cm^{-2}) | Q_p (L.min^{-1}) | Q_o (L.min^{-1}) | K_p ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | K_o ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | pH_p | pH_o | I (A) |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|---------------|----------|
| 3 | 0,23 | 3,20 | 68 | 2070 | 6,26 | 6,38 | 2,05 |
| 4 | 0,33 | 3,00 | | | | | 2,07 |
| 5 | 0,42 | 2,90 | 50 | 2300 | 6,21 | 6,51 | 2,08 |
| 6 | 0,59 | 2,65 | | | | | 2,10 |
| 7 | 0,75 | 2,50 | 50 | 2510 | * | * | 2,11 |
| 8 | 0,90 | 2,30 | | | | | 2,13 |
| 9 | 1,10 | 2,20 | 51 | 2850 | * | * | 2,15 |
| 10 | 1,20 | 2,00 | | | | | 2,17 |
| 11 | 1,30 | 1,90 | 52 | 3280 | * | * | 2,20 |
| 12 | 1,45 | 1,75 | | | | | 2,24 |
| 13 | 1,50 | 1,50 | 54 | 3900 | * | * | 2,28 |

| | | | | | | | |
|----|------|------|----|------|---|---|------|
| 14 | 1,80 | 1,40 | | | | | 2,31 |
| 15 | 1,90 | 1,20 | 63 | 4280 | * | * | 2,37 |

Tabela 4.3 – Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental I; $K_a = 3850 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (1984 mg.L^{-1}); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta V = 220 \text{ V}$; $\text{pH}_a = 7,05$. * Dados não coletados.

| P_a (kgf.cm^{-2}) | Q_p (L.min^{-1}) | Q_c (L.min^{-1}) | K_p ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | K_c ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | pH_p | pH_c | I (A) |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|---------------|------------|
| 3 | 0,18 | 3,20 | 235 | 3940 | * | * | 2,05 |
| 4 | 0,27 | 2,90 | | | | | 2,06 |
| 5 | 0,35 | 2,80 | 123 | 4260 | * | * | 2,08 |
| 6 | 0,47 | 2,65 | | | | | 2,10 |
| 7 | 0,66 | 2,50 | 109 | 4840 | * | * | 2,12 |
| 8 | 0,81 | 2,40 | | | | | 2,16 |
| 9 | 0,95 | 2,25 | 113 | 5320 | * | * | 2,19 |
| 10 | 1,10 | 2,10 | | | | | 2,23 |
| 11 | 1,20 | 1,90 | 106 | 5830 | * | * | 2,26 |
| 12 | 1,30 | 1,80 | | | | | 2,30 |
| 13 | 1,50 | 1,60 | 112,2 | 6460 | * | * | 2,35 |
| 14 | 1,60 | 1,50 | | | | | 2,39 |
| 15 | 1,70 | 1,40 | 112,6 | 7460 | * | * | 2,46 |

Tabela 4.4 – Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental I; $K_a = 5500 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (2932 mg.L^{-1}); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta V = 220 \text{ V}$; $\text{pH}_a = 6,82$.

| P_a (kgf.cm^{-2}) | Q_p (L.min^{-1}) | Q_c (L.min^{-1}) | K_p ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | K_c ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | pH_p | pH_c | I (A) |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|---------------|------------|
| 3 | 0,12 | 3,30 | 716 | 6460 | 6,46 | 6,79 | 2,03 |
| 4 | 0,20 | 3,10 | | | | | 2,04 |
| 5 | 0,27 | 3,00 | 293 | 6030 | 6,39 | 6,91 | 2,07 |
| 6 | 0,34 | 2,80 | | | | | 2,09 |
| 7 | 0,43 | 2,70 | 197 | 6510 | 6,33 | 6,83 | 2,11 |
| 8 | 0,59 | 2,60 | | | | | 2,13 |
| 9 | 0,73 | 2,40 | 184 | 6970 | 6,06 | 6,88 | 2,14 |
| 10 | 0,88 | 2,30 | | | | | 2,17 |
| 11 | 0,97 | 2,20 | 187 | 7580 | 6,22 | 6,97 | 2,21 |
| 12 | 1,10 | 2,00 | | | | | 2,27 |
| 13 | 1,20 | 1,90 | 182 | 8390 | 6,18 | 7,04 | 2,32 |
| 14 | 1,30 | 1,80 | | | | | 2,37 |
| 15 | 1,40 | 1,70 | 199 | 9270 | 6,46 | 6,97 | 2,41 |

Tabela 4.5 – Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental I; $K_a = 7300 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (3998 mg.L^{-1}); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta V = 220 \text{ V}$; $\text{pH}_a = 6,70$. * Dados não coletados.

| P_a (kgf.cm^{-2}) | Q_p (L.min^{-1}) | Q_e (L.min^{-1}) | K_p ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | K_e ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | pH_p | pH_e | I (A) |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|---------------|----------|
| 3 | < 0,10 | 3,30 | * | 7350 | * | 6,79 | 2,05 |
| 4 | 0,15 | 3,00 | | | | | 2,06 |
| 5 | 0,22 | 2,90 | 560 | 7800 | * | * | 2,07 |
| 6 | 0,28 | 2,80 | | | | | 2,08 |
| 7 | 0,34 | 2,70 | 343 | 8330 | 6,55 | 6,85 | 2,10 |
| 8 | 0,42 | 2,60 | | | | | 2,12 |
| 9 | 0,55 | 2,50 | 299 | 8890 | 6,22 | 6,92 | 2,15 |
| 10 | 0,70 | 2,40 | | | | | 2,18 |
| 11 | 0,81 | 2,30 | 287 | 9710 | * | * | 2,21 |
| 12 | 0,93 | 2,20 | | | | | 2,25 |
| 13 | 1,05 | 2,10 | 277 | 10420 | 5,93 | 6,96 | 2,28 |
| 14 | 1,10 | 2,00 | | | | | 2,34 |
| 15 | 1,20 | 1,85 | 300 | 11320 | 6,00 | 6,99 | 2,42 |

Tabela 4.6 – Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental I; $K_a = 8950 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (4998 mg.L^{-1}); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta V = 220 \text{ V}$; $\text{pH}_a = 6,77$. * Dados não coletados.

| P_a (kgf.cm^{-2}) | Q_p (L.min^{-1}) | Q_e (L.min^{-1}) | K_p ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | K_e ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | pH_p | pH_e | I (A) |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|---------------|----------|
| 3 | < 0,10 | 3,40 | * | 9030 | * | 6,77 | 2,07 |
| 4 | < 0,10 | 3,20 | | | | | 2,08 |
| 5 | 0,17 | 3,10 | 1560 | 9230 | 6,51 | 6,81 | 2,09 |
| 6 | 0,22 | 3,00 | | | | | 2,11 |
| 7 | 0,28 | 2,80 | 580 | 9890 | 6,29 | 6,84 | 2,15 |
| 8 | 0,34 | 2,70 | | | | | 2,17 |
| 9 | 0,41 | 2,60 | 481 | 10520 | 6,33 | 6,84 | 2,19 |
| 10 | 0,52 | 2,50 | | | | | 2,22 |
| 11 | 0,65 | 2,40 | 391 | 11240 | 6,16 | 6,86 | 2,25 |
| 12 | 0,78 | 2,30 | | | | | 2,28 |
| 13 | 0,88 | 2,20 | 438 | 12110 | 5,93 | 6,89 | 2,31 |
| 14 | 0,97 | 2,10 | | | | | 2,37 |
| 15 | 1,05 | 1,95 | 391 | 12860 | 5,90 | 6,92 | 2,43 |

Tabela 4.7 – Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental I; $K_a = 10790 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (6133 mg.L^{-1}); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta V = 220 \text{ V}$; $\text{pH}_a = 6,74$. * Dados não coletados.

| P_a (kgf.cm^{-2}) | Q_p (L.min^{-1}) | Q_c (L.min^{-1}) | K_p ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | K_c ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | pH_p | pH_c | I (A) |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|---------------|------------|
| 3 | < 0,10 | 3,40 | * | * | * | * | 2,07 |
| 4 | < 0,10 | 3,30 | | | | | 2,08 |
| 5 | < 0,10 | 3,20 | * | * | * | * | 2,09 |
| 6 | 0,18 | 3,10 | | | | | 2,11 |
| 7 | 0,23 | 3,00 | 1050 | 11220 | * | * | 2,13 |
| 8 | 0,28 | 2,80 | | | | | 2,15 |
| 9 | 0,33 | 2,70 | 694 | 12000 | * | * | 2,18 |
| 10 | 0,40 | 2,65 | | | | | 2,21 |
| 11 | 0,46 | 2,60 | 612 | 12710 | * | * | 2,24 |
| 12 | 0,60 | 2,50 | | | | | 2,28 |
| 13 | 0,72 | 2,40 | 549 | 13560 | * | * | 2,32 |
| 14 | 0,85 | 2,30 | | | | | 2,37 |
| 15 | 0,95 | 2,20 | 529 | 14540 | * | * | 2,41 |

Tabela 4.8 – Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental I; $K_a = 17280 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (10272 mg.L^{-1}); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta V = 220 \text{ V}$; $\text{pH}_a = 6,80$. * Dados não coletados.

| P_a (kgf.cm^{-2}) | Q_p (L.min^{-1}) | Q_c (L.min^{-1}) | K_p ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | K_c ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | pH_p | pH_c | I (A) |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|---------------|------------|
| 3 | < 0,10 | 3,70 | * | * | * | * | 2,08 |
| 4 | < 0,10 | 3,60 | | | | | 2,08 |
| 5 | < 0,10 | 3,40 | * | * | * | * | 2,09 |
| 6 | < 0,10 | 3,30 | | | | | 2,10 |
| 7 | < 0,10 | 3,20 | * | * | * | * | 2,13 |
| 8 | 0,13 | 3,15 | | | | | 2,15 |
| 9 | 0,17 | 3,10 | 4690 | 18280 | * | * | 2,16 |
| 10 | 0,21 | 3,05 | | | | | 2,18 |
| 11 | 0,24 | 2,90 | 1980 | 18310 | * | * | 2,20 |
| 12 | 0,28 | 2,80 | | | | | 2,25 |
| 13 | 0,33 | 2,70 | 1380 | 20700 | * | * | 2,29 |
| 14 | 0,37 | 2,65 | | | | | 2,32 |
| 15 | 0,43 | 2,60 | 1350 | 25500 | * | * | 2,38 |

Tabela 4.9 – Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental II; $K_a = 163 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (62 mg.L^{-1}); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta V = 220 \text{ V}$; $\text{pH}_a = 7,86$. * Dados não coletados.

| P_a (kgf.cm^{-2}) | Q_p (L.min^{-1}) | Q_o (L.min^{-1}) | K_p ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | K_o ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | pH_p | pH_o | I (A) |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|---------------|------------|
| 3 | 0,23 | 2,90 | 9,9 | 175 | 6,89 | 7,94 | 2,20 |
| 5 | 0,33 | 2,60 | 6,5 | 191 | 7,00 | 7,90 | 2,18 |
| 7 | 0,60 | 2,25 | 8,5 | 210 | 7,22 | 7,99 | 2,22 |
| 9 | 0,85 | 1,90 | 10,1 | 230 | 7,10 | 7,98 | 2,28 |
| 11 | 1,10 | 1,60 | 9,2 | 220 | 7,00 | 8,05 | 2,34 |
| 13 | 1,35 | 1,40 | 9,0 | 222 | 7,03 | 7,98 | 2,42 |

Tabela 4.10 – Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental II; $K_a = 2010 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (974 mg.L^{-1}); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta V = 220 \text{ V}$; $\text{pH}_a = 7,81$. * Dados não coletados.

| P_a (kgf.cm^{-2}) | Q_p (L.min^{-1}) | Q_o (L.min^{-1}) | K_p ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | K_o ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | pH_p | pH_o | I (A) |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|---------------|------------|
| 3 | 0,15 | 3,10 | 74,5 | 2150 | 6,86 | 7,94 | 2,15 |
| 5 | 0,28 | 2,70 | 94,5 | 2300 | 6,79 | 7,96 | 2,16 |
| 7 | 0,44 | 2,30 | 70,5 | 2690 | 6,84 | 7,99 | 2,20 |
| 9 | 0,67 | 2,00 | 68,5 | 2710 | 6,64 | 8,01 | 2,23 |
| 11 | 0,90 | 1,65 | 73,5 | 3410 | 6,65 | 8,05 | 2,31 |
| 13 | 1,10 | 1,45 | 68,6 | 3020 | 6,82 | 8,04 | 2,40 |

Tabela 4.11 – Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental II; $K_a = 3840 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (1979 mg.L^{-1}); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta V = 220 \text{ V}$; $\text{pH}_a = 7,75$. * Dados não coletados.

| P_a (kgf.cm^{-2}) | Q_p (L.min^{-1}) | Q_o (L.min^{-1}) | K_p ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | K_o ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | pH_p | pH_o | I (A) |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|---------------|------------|
| 3 | 0,10 | 3,10 | 196 | 3940 | 7,30 | 8,06 | 2,17 |
| 5 | 0,23 | 2,70 | 310 | 4070 | 7,41 | 7,81 | 2,17 |
| 7 | 0,34 | 2,40 | 175 | 4400 | 7,38 | 8,04 | 2,20 |
| 9 | 0,55 | 2,15 | 142 | 4790 | 7,04 | 7,90 | 2,23 |
| 11 | 0,82 | 1,75 | 131 | 5190 | 7,04 | 8,16 | 2,29 |
| 13 | 1,10 | 1,50 | 144 | 5950 | 6,98 | 7,92 | 2,39 |

Tabela 4.12 – Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental II; $K_a = 8790 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($4900 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta V = 220 \text{ V}$; $\text{pH}_a = 7,58$. * Dados não coletados.

| P_a ($\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$) | Q_p ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$) | Q_c ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$) | K_p ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) | K_c ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) | pH_p | pH_c | I (A) |
|--|---|---|---|---|---------------|---------------|------------|
| 3 | <0,10 | 3,20 | * | 8720 | * | 7,58 | 2,15 |
| 5 | <0,10 | 3,20 | * | 9010 | * | 7,61 | 2,19 |
| 7 | 0,22 | 2,60 | 640 | 9660 | 7,12 | 7,80 | 2,21 |
| 9 | 0,32 | 2,30 | 490 | 10620 | 7,16 | 7,70 | 2,25 |
| 11 | 0,42 | 2,15 | 410 | 10690 | 6,99 | 7,67 | 2,31 |
| 13 | 0,65 | 1,85 | 390 | 11650 | 6,86 | 7,69 | 2,38 |

Tabela 4.13 – Variação da vazão, da condutividade elétrica, do pH e da corrente elétrica de uma solução de NaCl com a pressão. Sistema Experimental II; $K_a = 17660 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($10519 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta V = 220 \text{ V}$; $\text{pH}_a = 7,86$. * Dados não coletados.

| P_a ($\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$) | Q_p ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$) | Q_c ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$) | K_p ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) | K_c ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) | pH_p | pH_c | I (A) |
|--|---|---|---|---|---------------|---------------|------------|
| 3 | <0,10 | 3,30 | * | 17240 | * | * | 2,17 |
| 5 | <0,10 | 3,00 | * | 17620 | * | * | 2,18 |
| 7 | <0,10 | 2,80 | * | 17470 | * | * | 2,22 |
| 9 | 0,12 | 2,65 | 8480 | 17940 | * | * | 2,26 |
| 11 | 0,22 | 2,40 | 3500 | 19030 | * | * | 2,35 |
| 13 | 0,27 | 2,30 | 1480 | 20700 | * | * | 2,40 |

Tabela 4.14 – Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental I; $K_a = 13,5 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($4,6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

| ΔV (V) | I_3 (A) | I_5 (A) | I_7 (A) | I_9 (A) | I_{11} (A) | I_{13} (A) | I_{15} (A) |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 220 | 2,09 | 2,12 | 2,15 | 2,20 | 2,27 | 2,35 | 2,42 |
| 210 | 1,94 | 1,99 | 2,02 | 2,07 | 2,17 | 2,28 | 2,38 |
| 200 | 1,81 | 1,85 | 1,90 | 1,97 | 2,08 | 2,19 | 2,30 |
| 190 | 1,69 | 1,75 | 1,81 | 1,89 | 2,01 | 2,14 | 2,27 |
| 180 | 1,59 | 1,65 | 1,73 | 1,82 | 1,97 | 2,11 | 2,29 |
| 170 | 1,50 | 1,57 | 1,66 | 1,77 | 1,94 | 2,12 | 2,36 |
| 160 | 1,41 | 1,50 | 1,61 | 1,75 | 1,93 | 2,13 | 2,46 |
| 150 | 1,33 | 1,43 | 1,56 | 1,73 | 1,97 | 2,20 | 2,71 |
| 140 | 1,27 | 1,39 | 1,54 | 1,74 | 2,01 | 2,33 | |
| 130 | 1,20 | 1,35 | 1,53 | 1,78 | 2,13 | | |

| | | | | | | | |
|-----|------|------|------|------|--|--|--|
| 120 | 1,15 | 1,33 | 1,56 | 1,87 | | | |
| 110 | 1,12 | 1,34 | 1,80 | | | | |
| 100 | 1,11 | 1,39 | 1,79 | | | | |
| 90 | 1,13 | 1,53 | | | | | |
| 80 | 1,21 | | | | | | |

Tabela 4.15 – Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental I; $K_a = 2000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($969 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

| ΔV (V) | I_3 (A) | I_5 (A) | I_7 (A) | I_9 (A) | I_{11} (A) | I_{13} (A) | I_{15} (A) |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 220 | 2,04 | 2,09 | 2,14 | 2,16 | 2,23 | 2,33 | 2,43 |
| 210 | 1,90 | 1,94 | 2,01 | 2,03 | 2,17 | 2,25 | 2,35 |
| 200 | 1,77 | 1,83 | 1,90 | 1,93 | 2,05 | 2,18 | 2,32 |
| 190 | 1,66 | 1,72 | 1,80 | 1,84 | 2,03 | 2,14 | 2,30 |
| 180 | 1,56 | 1,63 | 1,70 | 1,79 | 2,00 | 2,11 | 2,28 |
| 170 | 1,47 | 1,53 | 1,65 | 1,74 | 1,95 | 2,12 | 2,29 |
| 160 | 1,38 | 1,46 | 1,57 | 1,71 | 1,96 | 2,16 | 2,36 |
| 150 | 1,30 | 1,40 | 1,53 | 1,73 | 2,00 | 2,25 | 2,51 |
| 140 | 1,23 | 1,34 | 1,50 | 1,71 | 2,07 | 2,40 | |
| 130 | 1,16 | 1,30 | 1,49 | 1,74 | | | |
| 120 | 1,11 | 1,28 | 1,49 | 1,89 | | | |
| 110 | 1,07 | 1,29 | 1,56 | | | | |
| 100 | 1,06 | 1,32 | 1,69 | | | | |
| 90 | 1,07 | 1,45 | | | | | |
| 80 | 1,15 | | | | | | |
| 70 | | | | | | | |

Tabela 4.16 – Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental I;
 $K_a = 3850 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($1984 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

| ΔV (V) | I_3 (A) | I_5 (A) | I_7 (A) | I_9 (A) | I_{11} (A) | I_{13} (A) | I_{15} (A) |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 220 | 2,02 | 2,06 | 2,10 | 2,16 | 2,24 | 2,33 | 2,42 |
| 210 | 1,88 | 1,92 | 1,98 | 2,06 | 2,15 | 2,24 | 2,37 |
| 200 | 1,75 | 1,80 | 1,85 | 1,96 | 2,07 | 2,21 | 2,34 |
| 190 | 1,64 | 1,70 | 1,76 | 1,89 | 2,01 | 2,18 | 2,31 |
| 180 | 1,54 | 1,60 | 1,68 | 1,83 | 1,97 | 2,15 | 2,33 |
| 170 | 1,45 | 1,51 | 1,61 | 1,81 | 1,96 | 2,17 | 2,34 |
| 160 | 1,37 | 1,44 | 1,55 | 1,79 | 1,94 | 2,22 | 2,43 |
| 150 | 1,29 | 1,37 | 1,48 | 1,79 | 2,00 | 2,30 | 2,64 |
| 140 | 1,21 | 1,32 | 1,46 | 1,81 | 2,04 | 2,45 | |
| 130 | 1,15 | 1,27 | 1,49 | 1,87 | 2,17 | | |
| 120 | 1,09 | 1,24 | 1,56 | 2,01 | | | |
| 110 | 1,06 | 1,24 | 1,74 | | | | |
| 100 | 1,04 | 1,28 | | | | | |
| 90 | 1,00 | 1,41 | | | | | |
| 80 | 1,06 | | | | | | |
| 70 | 1,24 | | | | | | |

Tabela 4.17 – Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental I;
 $K_a = 5500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($2932 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

| ΔV (V) | I_3 (A) | I_5 (A) | I_7 (A) | I_9 (A) | I_{11} (A) | I_{13} (A) | I_{15} (A) |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 220 | 2,02 | 2,06 | 2,11 | 2,17 | 2,24 | 2,29 | 2,43 |
| 210 | 1,88 | 1,93 | 1,98 | 2,06 | 2,13 | 2,21 | 2,32 |
| 200 | 1,75 | 1,81 | 1,86 | 1,97 | 2,05 | 2,15 | 2,28 |
| 190 | 1,65 | 1,70 | 1,78 | 1,88 | 1,97 | 2,09 | 2,25 |
| 180 | 1,54 | 1,61 | 1,69 | 1,83 | 1,95 | 2,06 | 2,32 |
| 170 | 1,45 | 1,53 | 1,62 | 1,75 | 1,91 | 2,04 | 2,40 |
| 160 | 1,37 | 1,46 | 1,57 | 1,70 | 1,90 | 2,07 | 2,46 |
| 150 | 1,28 | 1,39 | 1,53 | 1,69 | 1,94 | 2,14 | 2,68 |
| 140 | 1,21 | 1,34 | 1,51 | 1,70 | 2,00 | 2,28 | |
| 130 | 1,15 | 1,30 | 1,49 | 1,75 | 2,10 | 2,51 | |
| 120 | 1,10 | 1,28 | 1,53 | 1,87 | | | |
| 110 | 1,06 | 1,29 | 1,60 | | | | |
| 100 | 1,04 | 1,35 | 1,80 | | | | |
| 90 | 1,05 | 1,49 | | | | | |

Tabela 4.18 – Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental I;
 $K_a = 7300 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($3998 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

| ΔV (V) | I_3 (A) | I_5 (A) | I_7 (A) | I_9 (A) | I_{11} (A) | I_{13} (A) | I_{15} (A) |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 220 | 2,03 | 2,06 | 2,11 | 2,16 | 2,22 | 2,32 | 2,42 |
| 210 | 1,89 | 1,93 | 1,98 | 2,04 | 2,13 | 2,25 | 2,36 |
| 200 | 1,75 | 1,81 | 1,87 | 1,94 | 2,04 | 2,19 | 2,31 |
| 190 | 1,64 | 1,70 | 1,77 | 1,88 | 1,98 | 2,14 | 2,30 |
| 180 | 1,55 | 1,61 | 1,69 | 1,82 | 1,94 | 2,12 | 2,31 |
| 170 | 1,46 | 1,53 | 1,62 | 1,77 | 1,92 | 2,12 | 2,34 |
| 160 | 1,36 | 1,45 | 1,56 | 1,75 | 1,90 | 2,16 | 2,41 |
| 150 | 1,28 | 1,38 | 1,51 | 1,74 | 1,95 | 2,21 | 2,58 |
| 140 | 1,21 | 1,33 | 1,48 | 1,76 | 2,04 | 2,39 | 2,94 |
| 130 | 1,15 | 1,29 | 1,47 | 1,81 | 2,17 | | |
| 120 | 1,09 | 1,27 | 1,48 | 1,97 | 2,54 | | |
| 110 | 1,05 | 1,27 | 1,55 | | | | |
| 100 | 1,03 | 1,31 | 1,70 | | | | |
| 90 | 1,04 | 1,43 | | | | | |
| 80 | 1,10 | | | | | | |

Tabela 4.19 – Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental I;
 $K_a = 8950 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($4998 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

| ΔV (V) | I_3 (A) | I_5 (A) | I_7 (A) | I_9 (A) | I_{11} (A) | I_{13} (A) | I_{15} (A) |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 220 | 2,04 | 2,06 | 2,11 | 2,17 | 2,24 | 2,32 | 2,42 |
| 210 | 1,89 | 1,93 | 1,99 | 2,05 | 2,13 | 2,24 | 2,33 |
| 200 | 1,77 | 1,81 | 1,89 | 1,96 | 2,05 | 2,17 | 2,29 |
| 190 | 1,65 | 1,71 | 1,79 | 1,88 | 1,90 | 2,14 | 2,28 |
| 180 | 1,55 | 1,61 | 1,71 | 1,82 | 1,95 | 2,12 | 2,25 |
| 170 | 1,46 | 1,53 | 1,64 | 1,77 | 1,91 | 2,13 | 2,28 |
| 160 | 1,37 | 1,45 | 1,59 | 1,74 | 1,92 | 2,15 | 2,27 |
| 150 | 1,29 | 1,39 | 1,54 | 1,73 | 1,93 | 2,21 | 2,37 |
| 140 | 1,22 | 1,33 | 1,52 | 1,74 | 2,01 | 2,33 | |
| 130 | 1,15 | 1,29 | 1,53 | 1,80 | 2,12 | | |
| 120 | 1,10 | 1,27 | 1,55 | 1,90 | 2,37 | | |
| 110 | 1,06 | 1,27 | 1,65 | 1,99 | | | |
| 100 | 1,03 | 1,31 | 1,70 | | | | |
| 90 | 1,04 | | | | | | |

Tabela 4.20 – Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental I;
 $K_a = 10790 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($6133 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

| ΔV (V) | I_3 (A) | I_5 (A) | I_7 (A) | I_9 (A) | I_{11} (A) | I_{13} (A) | I_{15} (A) |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 220 | 2,01 | 2,03 | 2,07 | 2,12 | 2,16 | 2,34 | 2,33 |
| 210 | 1,86 | 1,90 | 1,94 | 2,00 | 2,06 | 2,25 | 2,26 |
| 200 | 1,74 | 1,78 | 1,83 | 1,89 | 1,96 | 2,17 | 2,20 |
| 190 | 1,63 | 1,67 | 1,74 | 1,81 | 1,91 | 2,11 | 2,20 |
| 180 | 1,52 | 1,58 | 1,66 | 1,74 | 1,84 | 2,07 | 2,17 |
| 170 | 1,43 | 1,49 | 1,58 | 1,68 | 1,81 | 2,06 | 2,18 |
| 160 | 1,34 | 1,42 | 1,53 | 1,64 | 1,79 | 2,05 | 2,21 |
| 150 | 1,26 | 1,35 | 1,48 | 1,62 | 1,79 | 2,10 | 2,30 |
| 140 | 1,18 | 1,30 | 1,44 | 1,61 | 1,84 | 2,21 | 2,48 |
| 130 | 1,11 | 1,25 | 1,43 | 1,64 | 1,91 | 2,40 | |
| 120 | 1,05 | 1,23 | 1,44 | 1,71 | 2,09 | | |
| 110 | 1,01 | 1,23 | 1,50 | 1,85 | | | |
| 100 | 0,98 | 1,27 | 1,63 | | | | |
| 90 | 0,97 | 1,37 | | | | | |
| 80 | 1,01 | | | | | | |
| 70 | 1,18 | | | | | | |

Tabela 4.21 – Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental I;
 $K_a = 17280 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($10272 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. * Dados não coletados.

| ΔV (V) | I_3 (A) | I_5 (A) | I_7 (A) | I_9 (A) | I_{11} (A) | I_{13} (A) | I_{15} (A) |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 220 | * | * | * | 2,17 | 2,20 | 2,29 | 2,38 |
| 210 | * | * | * | 2,04 | 2,09 | 2,18 | 2,31 |
| 200 | * | * | * | 1,94 | 2,01 | 2,10 | 2,25 |
| 190 | * | * | * | 1,85 | 1,94 | 2,04 | 2,20 |
| 180 | * | * | * | 1,78 | 1,90 | 2,05 | 2,23 |
| 170 | * | * | * | 1,72 | 1,85 | 2,01 | 2,25 |
| 160 | * | * | * | 1,67 | 1,82 | 2,02 | 2,29 |
| 150 | * | * | * | 1,65 | 1,85 | 2,06 | 2,38 |
| 140 | * | * | * | 1,64 | 1,90 | 2,18 | 2,58 |
| 130 | * | * | * | 1,67 | 1,98 | 2,28 | |
| 120 | * | * | * | 1,74 | 2,10 | | |
| 110 | * | * | * | 1,88 | | | |

Tabela 4.22 – Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental II; $K_a = 163 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($62 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. * Dados não coletados.

| ΔV (V) | I_3 (A) | I_5 (A) | I_7 (A) | I_9 (A) | I_{11} (A) | I_{13} (A) |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|
| 220 | 2,15 | 2,18 | 2,27 | 2,29 | 2,35 | * |
| 205 | 1,91 | 1,96 | 2,05 | 2,09 | 2,19 | * |
| 190 | 1,72 | 1,77 | 1,89 | 1,94 | 2,07 | * |
| 175 | 1,55 | 1,62 | 1,76 | 1,84 | 2,02 | * |
| 160 | 1,41 | 1,50 | 1,67 | 1,77 | 2,00 | * |
| 145 | 1,30 | 1,39 | 1,61 | 1,72 | 2,02 | * |
| 130 | 1,19 | 1,31 | 1,59 | 1,76 | 2,15 | * |
| 115 | 1,10 | 1,27 | 1,65 | 1,90 | | * |
| 100 | 1,05 | 1,29 | 1,91 | | | * |
| 85 | 1,06 | 1,46 | | | | * |
| 70 | 1,26 | | | | | * |

Tabela 4.23 – Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental II; $K_a = 2010 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($974 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

| ΔV (V) | I_3 (A) | I_5 (A) | I_7 (A) | I_9 (A) | I_{11} (A) | I_{13} (A) |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|
| 220 | 2,14 | 2,15 | 2,19 | 2,23 | 2,29 | 2,36 |
| 205 | 1,91 | 1,94 | 1,98 | 2,03 | 2,11 | 2,20 |
| 190 | 1,71 | 1,76 | 1,82 | 1,90 | 1,99 | 2,09 |
| 175 | 1,55 | 1,62 | 1,68 | 1,78 | 1,91 | 2,03 |
| 160 | 1,41 | 1,50 | 1,58 | 1,73 | 1,87 | 2,01 |
| 145 | 1,29 | 1,39 | 1,50 | 1,70 | 1,88 | 2,06 |
| 130 | 1,18 | 1,32 | 1,46 | 1,73 | 1,97 | 2,22 |
| 115 | 1,09 | 1,28 | 1,48 | 1,83 | 2,23 | |
| 100 | 1,03 | 1,31 | 1,62 | | | |
| 85 | 1,03 | 1,46 | | | | |
| 70 | 1,20 | | | | | |

Tabela 4.24 – Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental II; $K_a = 3840 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($1979 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

| ΔV (V) | I_3 (A) | I_5 (A) | I_7 (A) | I_9 (A) | I_{11} (A) | I_{13} (A) |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|
| 220 | 2,13 | 2,16 | 2,18 | 2,24 | 2,28 | 2,36 |
| 205 | 1,90 | 1,94 | 1,98 | 2,05 | 2,11 | 2,21 |
| 190 | 1,72 | 1,75 | 1,81 | 1,90 | 1,97 | 2,12 |
| 175 | 1,56 | 1,60 | 1,68 | 1,78 | 1,88 | 2,07 |
| 160 | 1,41 | 1,47 | 1,56 | 1,70 | 1,83 | 2,07 |
| 145 | 1,28 | 1,37 | 1,48 | 1,66 | 1,83 | 2,13 |
| 130 | 1,17 | 1,28 | 1,44 | 1,67 | 1,91 | 2,32 |
| 115 | 1,07 | 1,24 | 1,44 | 1,78 | | |
| 100 | 1,02 | 1,25 | 1,58 | | | |
| 85 | 1,02 | 1,39 | | | | |
| 70 | 1,18 | | | | | |

Tabela 4.25 – Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental II; $K_a = 8790 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($4900 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

| ΔV (V) | I_3 (A) | I_5 (A) | I_7 (A) | I_9 (A) | I_{11} (A) | I_{13} (A) |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|
| 220 | 2,14 | 2,18 | 2,20 | 2,24 | 2,29 | 2,38 |
| 205 | 1,92 | 1,94 | 1,98 | 2,04 | 2,13 | 2,22 |
| 190 | 1,73 | 1,77 | 1,82 | 1,88 | 2,00 | 2,13 |
| 175 | 1,56 | 1,61 | 1,69 | 1,77 | 1,93 | 2,08 |
| 160 | 1,41 | 1,49 | 1,59 | 1,70 | 1,90 | 2,08 |
| 145 | 1,28 | 1,39 | 1,51 | 1,65 | 1,93 | 2,16 |
| 130 | 1,17 | 1,31 | 1,48 | 1,67 | 2,06 | 2,37 |
| 115 | 1,08 | 1,27 | 1,50 | 1,78 | | |
| 100 | 1,02 | 1,29 | 1,67 | | | |
| 85 | 1,03 | 1,48 | | | | |
| 70 | 1,22 | | | | | |

Tabela 4.26 – Variação da corrente elétrica com a tensão elétrica. Sistema Experimental II; $K_a = 17660 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($10519 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

| ΔV (V) | I_3 (A) | I_5 (A) | I_7 (A) | I_9 (A) | I_{11} (A) | I_{13} (A) |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|
| 220 | 2,17 | 2,18 | 2,22 | 2,26 | 2,35 | 2,40 |
| 205 | 1,90 | 1,96 | 1,99 | 2,09 | 2,16 | 2,26 |
| 190 | 1,73 | 1,79 | 1,82 | 1,95 | 2,05 | 2,16 |
| 175 | 1,56 | 1,62 | 1,68 | 1,85 | 1,98 | 2,12 |
| 160 | 1,41 | 1,49 | 1,57 | 1,79 | 1,96 | 2,12 |
| 145 | 1,29 | 1,39 | 1,49 | 1,77 | 2,00 | 2,19 |
| 130 | 1,18 | 1,31 | 1,45 | 1,81 | 2,14 | 2,34 |
| 115 | 1,09 | 1,27 | 1,45 | 1,99 | | |
| 100 | 1,03 | 1,24 | 1,57 | | | |
| 85 | 1,03 | 1,46 | | | | |
| 70 | 1,20 | | | | | |

Tabela 4.27 – Variação do pH do permeado e do concentrado com a pressão. Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. * Dados não coletados.

| P_a ($\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$) | $\text{pH}_o = 6,40$; $C_a = 4,6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | | $\text{pH}_o = 7,15$; $C_a = 1984 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | | $\text{pH}_o = 6,79$; $C_a = 3998 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | | $\text{pH}_o = 6,71$; $C_a = 6133 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | |
|--|---|---------------|--|---------------|--|---------------|--|---------------|
| | pH_p | pH_o | pH_p | pH_o | pH_p | pH_o | pH_p | pH_o |
| 3 | 6,20 | 6,40 | 6,74 | 6,86 | 6,12 | 6,79 | * | 7,06 |
| 5 | 6,15 | 6,39 | 7,08 | 7,30 | 6,20 | 6,79 | 6,54 | 6,74 |
| 7 | 6,19 | 6,42 | 6,81 | 7,72 | 6,49 | 6,85 | 6,89 | 7,01 |
| 9 | 6,17 | 6,54 | 7,26 | 8,38 | 5,97 | 6,87 | 6,79 | 7,17 |
| 11 | 6,20 | 6,63 | 6,83 | 7,01 | 6,22 | 6,92 | 6,79 | 7,21 |
| 13 | 6,23 | 6,66 | 6,74 | 6,98 | 5,93 | 6,96 | 6,49 | 6,74 |
| 15 | * | * | 7,03 | 7,90 | 6,00 | 6,99 | 6,45 | 7,24 |

Tabela 4.28 - Variação da condutividade elétrica do permeado e do concentrado com a pressão. Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. * Dados não coletados.

| P_a (kgf.cm^{-2}) | $\text{pH}_a = 6,40; K_a = 13,5 \text{ } \mu\text{s.cm}^{-1}$ | | $\text{pH}_a = 7,15; K_a = 3850 \text{ } \mu\text{s.cm}^{-1}$ | | $\text{pH}_a = 6,79; K_a = 7300 \text{ } \mu\text{s.cm}^{-1}$ | | $\text{pH}_a = *; K_a = 17280 \text{ } \mu\text{s.cm}^{-1}$ | |
|-----------------------------------|---|--------------------------------|---|--------------------------------|---|--------------------------------|---|--------------------------------|
| | K_p $\mu\text{s.cm}^{-1}$ | K_c $\mu\text{s.cm}^{-1}$ | K_p $\mu\text{s.cm}^{-1}$ | K_c $\mu\text{s.cm}^{-1}$ | K_p $\mu\text{s.cm}^{-1}$ | K_c $\mu\text{s.cm}^{-1}$ | K_p $\mu\text{s.cm}^{-1}$ | K_c $\mu\text{s.cm}^{-1}$ |
| 3 | 10,15 | 11,00 | 235 | 3940 | 501 | 7350 | * | * |
| 5 | 2,41 | 13,40 | 123,20 | 4260 | 560 | 7800 | * | * |
| 7 | 2,97 | 14,61 | 109,10 | 4840 | 343 | 8330 | 4690 | 18280 |
| 9 | 2,20 | 16,11 | 113,00 | 5320 | 299 | 8890 | 1980 | 18310 |
| 11 | 2,66 | 19,64 | 106,10 | 5830 | 287 | 9710 | 1380 | 2070 |
| 13 | 2,40 | 23,20 | 112,20 | 6460 | 277 | 10420 | 1340 | 23100 |
| 15 | 2,85 | 23,40 | 112,60 | 7460 | 300 | 11320 | | |

Tabela 4.29 - Variação da vazão do permeado com a pressão. Sistema Experimental I; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. * Dados não coletados.

| P_a (kgf.cm^{-2}) | $Q_p \text{ (L.min}^{-1}\text{)}$ | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| | $C_a = 4,6$ mg.L^{-1} | $C_a = 969$ mg.L^{-1} | $C_a = 1984$ mg.L^{-1} | $C_a = 2932$ mg.L^{-1} | $C_a = 3998$ mg.L^{-1} | $C_a = 4998$ mg.L^{-1} | $C_a = 6133$ mg.L^{-1} | $C_a = 10272$ mg.L^{-1} |
| 3 | 0,31 | 0,23 | 0,18 | 0,12 | * | * | * | * |
| 4 | 0,42 | 0,33 | 0,27 | 0,20 | 0,15 | * | * | * |
| 5 | 0,58 | 0,42 | 0,35 | 0,27 | 0,22 | 0,17 | | * |
| 6 | 0,75 | 0,59 | 0,47 | 0,34 | 0,28 | 0,22 | 0,18 | * |
| 7 | 0,89 | 0,75 | 0,66 | 0,43 | 0,34 | 0,28 | 0,23 | * |
| 8 | 1,10 | 0,90 | 0,81 | 0,59 | 0,42 | 0,34 | 0,28 | 0,13 |
| 9 | 1,15 | 1,10 | 0,95 | 0,73 | 0,55 | 0,41 | 0,33 | 0,17 |
| 10 | 1,30 | 1,20 | 1,10 | 0,88 | 0,70 | 0,52 | 0,40 | 0,21 |
| 11 | 1,40 | 1,30 | 1,20 | 0,97 | 0,81 | 0,65 | 0,46 | 0,24 |
| 12 | 1,50 | 1,45 | 1,30 | 1,10 | 0,93 | 0,78 | 0,60 | 0,28 |
| 13 | 1,60 | 1,50 | 1,50 | 1,20 | 1,05 | 0,86 | 0,72 | 0,33 |
| 14 | 1,75 | 1,80 | 1,60 | 1,30 | 1,10 | 0,97 | 0,85 | 0,37 |
| 15 | 1,85 | 1,90 | 1,70 | 1,40 | 1,20 | 1,05 | 0,95 | 0,43 |

Tabela 4.30 - Variação da vazão do permeado com a pressão. Sistema Experimental II; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

| P_a (kgf.cm^{-2}) | Q_p (L.min^{-1}) | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| | Ca = 62 mg.L^{-1} | Ca = 974 mg.L^{-1} | Ca = 1979 mg.L^{-1} | Ca = 4900 mg.L^{-1} | Ca = 10519 mg.L^{-1} |
| 3 | 0,23 | 0,15 | 0,10 | | |
| 5 | 0,33 | 0,28 | 0,23 | | |
| 7 | 0,60 | 0,44 | 0,34 | 0,22 | |
| 9 | 0,85 | 0,67 | 0,55 | 0,32 | 0,12 |
| 11 | 1,10 | 0,90 | 0,82 | 0,42 | 0,22 |
| 13 | 1,20 | 1,10 | 1,05 | 0,65 | 0,27 |

Tabela 4.31 - Variação da vazão do permeado e do concentrado com a pressão. Sistema Experimental I; $C_a = 2932 \text{ mg.L}^{-1}$; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

| P_a (kgf.cm^{-2}) | Q_p (L.min^{-1}) | Q_c (L.min^{-1}) |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 3 | 0,12 | 3,30 |
| 4 | 0,20 | 3,10 |
| 5 | 0,27 | 3,00 |
| 6 | 0,34 | 2,80 |
| 7 | 0,43 | 2,70 |
| 8 | 0,59 | 2,60 |
| 9 | 0,73 | 2,40 |
| 10 | 0,88 | 2,30 |
| 11 | 0,97 | 2,20 |
| 12 | 1,10 | 2,00 |
| 13 | 1,20 | 1,90 |
| 14 | 1,30 | 1,80 |
| 15 | 1,40 | 1,70 |

Tabela 4.32 - Variação da vazão do permeado com a concentração de alimentação, para a pressão variando de 3 até 15 kgf.cm⁻². Sistema Experimental I; T_a = 25 ± 1 °C.

| C _a (mg.L ⁻¹) | P _a = 3 kgf.cm ⁻² | P _a = 5 kgf.cm ⁻² | P _a = 7 kgf.cm ⁻² | P _a = 9 kgf.cm ⁻² | P _a = 11 kgf.cm ⁻² | P _a = 13 kgf.cm ⁻² | P _a = 15 kgf.cm ⁻² |
|---|--|--|--|--|---|---|---|
| | Q _p (L.min ⁻¹) | Q _p (L.min ⁻¹) | Q _p (L.min ⁻¹) | Q _p (L.min ⁻¹) | Q _p (L.min ⁻¹) | Q _p (L.min ⁻¹) | Q _p (L.min ⁻¹) |
| 4,6 | 0,31 | 0,58 | 0,89 | 1,15 | 1,40 | 1,60 | 1,85 |
| 969 | 0,23 | 0,42 | 0,75 | 1,10 | 1,30 | 1,50 | 1,90 |
| 1984 | 0,18 | 0,35 | 0,66 | 0,95 | 1,20 | 1,35 | 1,70 |
| 2932 | 0,12 | 0,27 | 0,43 | 0,73 | 0,97 | 1,20 | 1,40 |
| 3998 | | 0,22 | 0,34 | 0,55 | 0,81 | 1,05 | 1,20 |
| 4998 | | 0,17 | 0,28 | 0,41 | 0,65 | 0,88 | 1,05 |
| 6133 | | | 0,23 | 0,33 | 0,46 | 0,72 | 0,95 |
| 10272 | | | | 0,17 | 0,24 | 0,33 | 0,43 |

Tabela 4.33 - Variação da vazão do permeado com a concentração de alimentação, para a pressão variando de 3 até 13 kgf.cm⁻². Sistema Experimental II; T_a = 25 ± 1 °C.

| C _a (mg.L ⁻¹) | P _a = 3 kgf.cm ⁻² | P _a = 5 kgf.cm ⁻² | P _a = 7 kgf.cm ⁻² | P _a = 9 kgf.cm ⁻² | P _a = 11 kgf.cm ⁻² | P _a = 13 kgf.cm ⁻² |
|---|--|--|--|--|---|---|
| | Q _p (L.min ⁻¹) | Q _p (L.min ⁻¹) | Q _p (L.min ⁻¹) | Q _p (L.min ⁻¹) | Q _p (L.min ⁻¹) | Q _p (L.min ⁻¹) |
| 62 | 0,23 | 0,33 | 0,60 | 0,85 | 1,10 | 1,35 |
| 974 | 0,15 | 0,28 | 0,44 | 0,67 | 0,90 | 1,10 |
| 1979 | 0,10 | 0,23 | 0,34 | 0,55 | 0,82 | 1,05 |
| 4900 | * | * | 0,22 | 0,32 | 0,42 | 0,65 |
| 10519 | * | * | * | 0,12 | 0,22 | 0,27 |

Tabela 4.34 – Variação da potência elétrica com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 4,6 até 6133 mg.L⁻¹. Sistema Experimental I; T_a = 25 ± 1 °C.

| P _a (kgf.cm ⁻²) | C _a = 4,6 mg.L ⁻¹ | C _a = 969 mg.L ⁻¹ | C _a = 1984 mg.L ⁻¹ | C _a = 2932 mg.L ⁻¹ | C _a = 3998 mg.L ⁻¹ | C _a = 4998 mg.L ⁻¹ | C _a = 6133 mg.L ⁻¹ |
|---|--|--|---|---|---|---|---|
| | P (W) | P (W) | P (W) | P (W) | P (W) | P (W) | P (W) |
| 3 | 96,8 | 92,0 | 86,8 | 94,5 | 88,0 | 93,6 | 82,6 |
| 5 | 137,7 | 130,5 | 126,9 | 134,1 | 128,7 | 131,0 | 123,3 |
| 7 | 179,0 | 169,0 | 191,4 | 180,0 | 170,0 | 170,0 | 163,0 |
| 9 | 224,4 | 226,8 | 241,2 | 224,4 | 236,4 | 218,9 | 203,5 |
| 11 | 276,9 | 289,8 | 282,1 | 273,0 | 304,8 | 284,4 | 250,8 |
| 13 | 326,2 | 336,0 | 343,0 | 326,3 | 334,6 | 326,5 | 312,0 |
| 15 | 406,5 | 376,5 | 396,0 | 402,0 | 411,6 | 355,5 | 347,2 |

Tabela 4.35 - Variação da potência elétrica com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 62 até 10519 mg.L⁻¹. Sistema Experimental II; T_a = 25 ± 1 °C.

| P _a (kgf.cm ⁻²) | C _a = 62 mg.L ⁻¹ | C _a = 974 mg.L ⁻¹ | C _a = 1979 mg.L ⁻¹ | C _a = 4900 mg.L ⁻¹ | C _a = 10519 mg.L ⁻¹ |
|---|---|--|---|---|--|
| | P (W) | P (W) | P (W) | P (W) | P (W) |
| 3 | 55,5 | 84,0 | 82,6 | 85,4 | 58,3 |
| 5 | 124,1 | 124,1 | 118,1 | 125,8 | 124,1 |
| 7 | 191,0 | 162,0 | 158,0 | 167,0 | 157,0 |
| 9 | 218,5 | 210,4 | 204,7 | 204,7 | 228,8 |
| 11 | 279,5 | 256,4 | 248,3 | 267,8 | 278,2 |
| 13 | | 288,6 | 301,6 | 308,1 | 304,2 |

Tabela 4.36 - Variação da potência elétrica com a tensão elétrica, para a pressão variando de 3 até 15 kgf.cm^{-2} . Sistema Experimental I; $C_a = 2932 \text{ mg.L}^{-1}$; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

| ΔV (V) | $P_a = 3$ (kgf.cm^{-2}) | $P_a = 5$ (kgf.cm^{-2}) | $P_a = 7$ (kgf.cm^{-2}) | $P_a = 9$ (kgf.cm^{-2}) | $P_a = 11$ (kgf.cm^{-2}) | $P_a = 13$ (kgf.cm^{-2}) | $P_a = 15$ (kgf.cm^{-2}) |
|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--|--|
| | P (W) | P (W) | P (W) | P (W) | P (W) | P (W) | P (W) |
| 220 | 444,4 | 453,2 | 464,2 | 477,4 | 492,8 | 503,8 | 534,6 |
| 210 | 394,8 | 405,3 | 415,8 | 432,6 | 447,3 | 464,1 | 487,2 |
| 200 | 350,0 | 362,0 | 372,0 | 394,0 | 410,0 | 430,0 | 456,0 |
| 190 | 313,5 | 323,0 | 338,2 | 357,2 | 374,3 | 397,1 | 427,5 |
| 180 | 272,2 | 289,8 | 304,2 | 329,4 | 351,0 | 370,8 | 417,6 |
| 170 | 246,5 | 260,1 | 275,4 | 297,5 | 324,7 | 346,8 | 408,0 |
| 160 | 219,2 | 233,6 | 251,2 | 272,0 | 304,0 | 331,2 | 393,6 |
| 150 | 192,0 | 208,5 | 229,5 | 253,5 | 291,0 | 321,0 | 402,0 |
| 140 | 169,4 | 187,6 | 211,4 | 238,0 | 280,0 | 319,2 | |
| 130 | 149,5 | 169,0 | 193,7 | 227,5 | 273,0 | 326,3 | |
| 120 | 132,0 | 153,6 | 183,6 | 224,4 | | | |
| 110 | 116,6 | 141,9 | 176,0 | | | | |
| 100 | 104,0 | 135,0 | 180,0 | | | | |
| 90 | 94,5 | 134,1 | | | | | |

Tabela 4.37 - Variação da potência elétrica com a tensão elétrica, para a pressão variando de 3 até 13 kgf.cm⁻². Sistema Experimental II; C_a = 1979 mg.L⁻¹; T_a = 25 ± 1 °C.

| ΔV (V) | P _a = 3 (kgf.cm ⁻²) | P _a = 5 (kgf.cm ⁻²) | P _a = 11 (kgf.cm ⁻²) | P _a = 13 (kgf.cm ⁻²) |
|-----------|---|---|--|--|
| | P (W) | P (W) | P (W) | P (W) |
| 220 | 468,6 | 475,2 | 501,6 | 519,2 |
| 205 | 389,5 | 397,7 | 432,5 | 453,0 |
| 190 | 326,8 | 332,5 | 374,3 | 402,8 |
| 175 | 273,0 | 280,0 | 329,0 | 362,2 |
| 160 | 225,6 | 235,2 | 292,8 | 331,2 |
| 145 | 185,6 | 198,6 | 265,3 | 308,8 |
| 130 | 152,1 | 166,4 | 248,3 | 301,6 |
| 115 | 123,0 | 142,6 | | |
| 100 | 102,0 | 128,0 | | |
| 85 | 86,7 | 118,1 | | |
| 70 | 82,6 | | | |

Tabela 4.38 - Variação da energia com a tensão elétrica, para a pressão variando de 3 até 15 kgf.cm^{-2} . Sistema Experimental I; $C_a = 4,6 \text{ mg.L}^{-1}$; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

| ΔV (V) | $P_a = 3$ (kgf.cm^{-2}) | $P_a = 7$ (kgf.cm^{-2}) | $P_a = 11$ (kgf.cm^{-2}) | $P_a = 15$ (kgf.cm^{-2}) |
|-------------------|---|---|---|---|
| | E_{exp} (kWh.m^{-3}) | E_{exp} (kWh.m^{-3}) | E_{exp} (kWh.m^{-3}) | E_{exp} (kWh.m^{-3}) |
| 220 | 22,54 | 7,88 | 5,55 | 4,22 |
| 210 | 19,97 | 7,07 | 5,06 | 3,97 |
| 200 | 17,74 | 6,53 | 4,62 | 3,65 |
| 190 | 15,74 | 5,91 | 4,24 | 3,43 |
| 180 | 14,03 | 5,41 | 3,94 | 3,62 |
| 170 | 12,50 | 4,95 | 3,66 | 3,52 |
| 160 | 11,06 | 4,52 | 3,43 | 3,45 |
| 150 | 9,78 | 4,10 | 3,28 | 3,58 |
| 140 | 8,71 | 3,78 | 3,13 | |
| 130 | 7,65 | 3,53 | 3,08 | |
| 120 | 6,76 | 3,43 | | |
| 110 | 6,04 | 3,67 | | |
| 100 | 5,44 | 3,31 | | |
| 90 | 5,13 | | | |
| 80 | 5,20 | | | |

Tabela 4.39 - Variação da energia com a tensão elétrica, para a pressão variando de 5 até 15 kgf.cm^{-2} . Sistema Experimental I; $C_a = 4998 \text{ mg.L}^{-1}$; $T_a = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

| ΔV (V) | $P_a = 5$ (kgf.cm^{-2}) | $P_a = 9$ (kgf.cm^{-2}) | $P_a = 13$ (kgf.cm^{-2}) | $P_a = 15$ (kgf.cm^{-2}) |
|-------------------|---|---|---|---|
| | E_{exp} (kWh.m^{-3}) | E_{exp} (kWh.m^{-3}) | E_{exp} (kWh.m^{-3}) | E_{exp} (kWh.m^{-3}) |
| 220 | 45,08 | 19,41 | 9,67 | 8,07 |
| 210 | 39,94 | 17,50 | 8,91 | 7,41 |
| 200 | 35,88 | 15,93 | 8,22 | 6,94 |
| 190 | 32,04 | 14,88 | 7,97 | 6,91 |
| 180 | 28,76 | 13,65 | 7,57 | 6,75 |
| 170 | 25,50 | 12,54 | 7,18 | 6,80 |
| 160 | 24,33 | 11,90 | 7,17 | 6,80 |

| | | | | |
|-----|-------|-------|------|------|
| 150 | 21,87 | 11,38 | 6,99 | 7,23 |
| 140 | 20,84 | 10,97 | 7,25 | |
| 130 | 18,78 | 10,87 | | |
| 120 | 18,29 | 11,18 | | |
| 110 | 16,89 | 11,06 | | |
| 100 | 16,62 | | | |

Tabela 4.40 - Variação da energia com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 4,6 até 10272 mg.L⁻¹. Sistema Experimental I; T_n = 25 ± 1 °C.

| P _n (kgf.cm ⁻²) | C _n = 4,6 (mg.L ⁻¹) | C _n = 969 (mg.L ⁻¹) | C _n = 1984 (mg.L ⁻¹) | C _n = 2932 (mg.L ⁻¹) | C _n = 3998 (mg.L ⁻¹) | C _n = 4998 (mg.L ⁻¹) | C _n = 6133 (mg.L ⁻¹) | C _n = 10272 (mg.L ⁻¹) |
|---|---|---|--|--|--|--|--|---|
| | E _{exp} (kWh.m ⁻³) | E _{exp} (kWh.m ⁻³) | E _{exp} (kWh.m ⁻³) | E _{exp} (kWh.m ⁻³) | E _{exp} (kWh.m ⁻³) | E _{exp} (kWh.m ⁻³) | E _{exp} (kWh.m ⁻³) | E _{exp} (kWh.m ⁻³) |
| 3 | 5,20 | 6,97 | 9,64 | 16,05 | 36,67 | | | |
| 5 | 4,59 | 6,04 | 7,05 | 9,72 | 11,92 | 16,92 | 51,37 | |
| 7 | 3,31 | 4,40 | 5,67 | 7,46 | 9,77 | 12,32 | 21,67 | |
| 9 | 3,11 | 3,44 | 5,03 | 5,94 | 9,16 | 11,06 | 13,04 | 26,51 |
| 11 | 3,08 | 5,37 | 4,27 | 5,29 | 8,76 | 10,53 | 12,29 | 22,10 |
| 13 | 3,39 | 4,00 | 4,76 | 5,44 | 6,20 | 7,25 | 10,40 | 19,00 |
| 15 | 3,56 | 4,18 | 4,71 | 5,58 | 6,86 | 7,23 | 8,39 | 18,24 |

Tabela 4.41 - Variação da energia com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 62 até 10519 mg.L⁻¹. Sistema Experimental II; T_n = 25 ± 1 °C.

| P _n (kgf.cm ⁻²) | C _n = 62 (mg.L ⁻¹) | C _n = 974 (mg.L ⁻¹) | C _n = 1979 (mg.L ⁻¹) | C _n = 4900 (mg.L ⁻¹) | C _n = 10519 (mg.L ⁻¹) |
|---|--|---|--|--|---|
| | E _{exp} (kWh.m ⁻³) | E _{exp} (kWh.m ⁻³) | E _{exp} (kWh.m ⁻³) | E _{exp} (kWh.m ⁻³) | E _{exp} (kWh.m ⁻³) |
| 3 | 6,68 | 10,00 | 12,51 | | |
| 5 | 6,46 | 7,95 | 8,94 | | |
| 7 | 5,30 | 6,28 | 8,23 | 16,37 | |
| 9 | 4,55 | 5,39 | 6,44 | 12,63 | 34,67 |
| 11 | 4,05 | 5,34 | 5,11 | 12,75 | 27,27 |
| 13 | | 4,58 | 4,79 | 11,41 | 22,04 |

Tabela 4.42 - Variação das energias teórica e experimental com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 4,6 até 4998 mg.L⁻¹. Sistema Experimental I; 25 ± 1 °C. * Dados não coletados.

| P _a (kgf.cm ⁻²) | C _a = 4,6 mg.L ⁻¹ | | C _a = 2932 mg.L ⁻¹ | | C _a = 4998 mg.L ⁻¹ | |
|---|--|--|--|--|--|--|
| | E _{teórico} (kWh.m ⁻³) | E _{exp} (kWh.m ⁻³) | E _{teórico} (kWh.m ⁻³) | E _{exp} (kWh.m ⁻³) | E _{teórico} (kWh.m ⁻³) | E _{exp} (kWh.m ⁻³) |
| 3 | 4,17 | 5,20 | 14,19 | 15,75 | * | * |
| 5 | 4,15 | 4,59 | 9,81 | 9,72 | 16,06 | 16,89 |
| 7 | 3,38 | 3,31 | 7,61 | 7,46 | 11,84 | 12,10 |
| 9 | 3,76 | 3,11 | 6,05 | 5,83 | 10,42 | 10,83 |
| 11 | 3,47 | 3,08 | 5,78 | 5,18 | 7,65 | 7,91 |
| 13 | 3,84 | 3,39 | 5,76 | 4,84 | 6,81 | 6,99 |
| 15 | 3,39 | 3,57 | 5,46 | 5,04 | 6,23 | 6,75 |

Tabela 4.43 - Variação das energias teórica e experimental com a pressão, para a concentração de alimentação variando de 1979 até 4900 mg.L⁻¹. Sistema Experimental II; T_a = 25 ± 1 °C. * Dados não coletados.

| P _a (kgf.cm ⁻²) | C _a = 1979 mg.L ⁻¹ | | C _a = 4900 mg.L ⁻¹ | |
|---|--|--|--|--|
| | E _{teórico} (kWh.m ⁻³) | E _{exp} (kWh.m ⁻³) | E _{teórico} (kWh.m ⁻³) | E _{exp} (kWh.m ⁻³) |
| 3 | 11,76 | 12,51 | * | * |
| 5 | 9,18 | 8,94 | * | * |
| 7 | 8,21 | 8,23 | 15,21 | 15,97 |
| 9 | 5,45 | 5,83 | 12,27 | 12,63 |
| 11 | 4,88 | 5,11 | 9,87 | 12,27 |
| 13 | 4,34 | 4,79 | 7,64 | 9,56 |

Tabela 4.44 - Variação do custo da água dessalinizada com a concentração de alimentação, utilizando-se energia convencional e fotovoltaica. Sistema Experimental I; $T_n = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

| E_{exp} (kWh.m ⁻³) | C_o (mg.L ⁻¹) | CAD _{conv} (R\$.m ⁻³) | CAD _{pv} (R\$.m ⁻³) |
|-------------------------------------|--------------------------------|---|---|
| 3,08 | 4,6 | 1,25 | 4,97 |
| 3,43 | 969 | 1,31 | 5,22 |
| 4,27 | 1979 | 1,47 | 5,84 |
| 4,84 | 2932 | 1,57 | 6,25 |
| 5,59 | 3998 | 1,70 | 6,80 |
| 6,75 | 4998 | 1,91 | 7,65 |
| 7,55 | 6133 | 2,06 | 8,23 |
| 16,07 | 10272 | 3,59 | 14,45 |

Tabela 4.45 - Variação do custo da água dessalinizada com a concentração de alimentação, utilizando-se energia convencional e fotovoltaica. Sistema Experimental II; $T_n = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

| E_{exp} (kWh.m ⁻³) | C_n (mg.L ⁻¹) | CAD _{conv} (R\$.m ⁻³) | CAD _{pv} (R\$.m ⁻³) |
|-------------------------------------|--------------------------------|---|---|
| 4,05 | 62 | 1,43 | 5,67 |
| 4,58 | 974 | 1,52 | 6,06 |
| 4,79 | 1979 | 1,56 | 6,22 |
| 9,56 | 4900 | 2,42 | 9,70 |
| 22,04 | 10519 | 4,67 | 18,81 |