

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

DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE  
INVERSA, EM ESCALA PILOTO, ALIMENTADO POR PAINÉIS  
FOTOVOLTAICOS.

ARLEIDE RICARTE DE OLIVEIRA

Campina Grande – Paraíba

Outubro de 2002

**DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE  
INVERSA, EM ESCALA PILOTO, ALIMENTADO POR PAINÉIS  
FOTOVOLTAICOS.**

**ARLEIDE RICARTE DE OLIVEIRA**

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

Área de Concentração: Operações e Processos

Orientadores: Prof. Kepler B. França (Dr.)

Prof. Hervé Michel Laborde (Dr.)

Campina Grande - Paraíba

Outubro de 2002

---



O48d

Oliveira, Arleide Ricarte de

Desempenho de um sistema de dessalinização via osmose inversa em escala piloto, alimentado por painéis fotovoltaicos / Arleide Ricarte de Oliveira. – Campina Grande: UFCEG, 2002.

75 p. : il.

Dissertação (Mestrado). UFCEG / CCT  
Inclui bibliografia

1. Dessalinização      2. Osmose Inversa  
3. Fotovoltaico      1. Título

CDU: 628.165

DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE  
INVERSA, EM ESCALA PILOTO, FAZENDO USO DE PAINÉIS  
FOTOVOLTAICOS.

ARLEIDE RICARTE DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 30/10/2002

BANCA EXAMINADORA



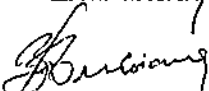
Prof.º Dr. Kepler Borges França  
Orientador



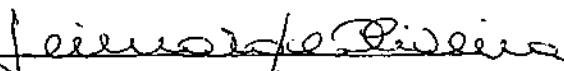
Prof.º Dr. Hervé Michel Laborde  
Orientador



Prof.º Dr. Michel François Fossy  
Examinador



Prof.º Dr. Benedito Antonio Luciano  
Examinador



Prof.º Leimar de Oliveira (M.Sc)  
Examinador

Campina Grande – Paraíba  
Outubro de 2002

## DEDICATÓRIA

Aos meus queridos pais,  
irmãos e familiares.

## AGRADECIMENTOS

Em especial a Deus por ter me dado força e coragem para chegar ao fim desta caminhada.

Aos meus pais e irmãos pelo incentivo e atenção.

Aos meus orientadores, professor Dr. Kepler Borges França e Dr. Hervé Michel Laborde, pela orientação e empenho no desenvolvimento dessa pesquisa.

A todos que fazem o Laboratório de Referência em Dessalinização.

A todos os professores do mestrado em Engenharia Química, em especial a professora Dra. Meiry Gláucia Freire Rodrigues pelo apoio e amizade.

Aos amigos da pós pelo companheirismo, em especial Adriana, Ester e Sebastião.

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

A Coordenação da Pós-Graduação em Engenharia Química, pela atenção.

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

## RESUMO

O presente trabalho visa estudar o desempenho de um sistema de dessalinização via osmose inversa, em escala piloto, fazendo uso de painéis fotovoltaicos, o qual foi desenvolvido no Laboratório Referência em Dessalinização do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande. O desempenho do sistema foi avaliado sob as seguintes águas: soluções de cloreto de sódio de concentração de 1000 mg/L a 4000 mg/L e águas salobras de poços tubulares com concentração de 2000 mg/L para uma faixa de pressão de 4,0 kgf/cm<sup>2</sup> a 12 kgf/cm<sup>2</sup>. A partir das variáveis de medidas como: tensão, corrente elétrica, vazão, condutividade elétrica e pH, foram avaliados os seguintes parâmetros: potência elétrica, vazão do permeado e do concentrado, recuperação e consumo de energia. A faixa de menor consumo de energia de 1,42 kWh/m<sup>3</sup> a 2,3 kWh/m<sup>3</sup> foi obtida sob a pressão de 10,0 kgf/cm<sup>2</sup> para as soluções estudadas. O sistema mostrou condições técnicas de produzir 0,2 m<sup>3</sup>/h de água dessalinizada a um custo viável de US\$ 1,13/m<sup>3</sup>.

**PALAVRAS-CHAVE:** dessalinização; osmose inversa, fotovoltaico.

## ABSTRACT

In this work the performance of small-scaled reverse osmosis desalination unit is studied using photovoltaic solar energy. This unit was developed in the Reference Laboratory of Desalination of the Chemical Engineering Department of the Federal University of Campina Grande. The system was tested with several sodium chloride solutions from 1000 mg/L to 4000 mg/L and brackish water from wells at concentration of 2000 mg/L under pressures from 4 kgf/cm<sup>2</sup> to 12 kgf/cm<sup>2</sup>. The measurement of voltage, electric current, permeate and concentrate flows, electric conductivity and pH allowed to evaluate the performance of the following parameters; electric power, recovery and energy consumption. The lowest range of energy consumption, was obtained at 10 kgf/cm<sup>2</sup>, which was 1.42 kWh/m<sup>3</sup> to 2.3 kWh/m<sup>3</sup>. The system provided technical conditions to produce 0.2 m<sup>3</sup>/h of dessalinated at reasonable cost of US\$ 1.13/ m<sup>3</sup>.

Key- words: desalination, reverse osmosis, photovoltaic.



## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de permeação da membrana
$\Delta C$	Gradiente concentração
$C_a$	Concentração da alimentação
CA	Corrente alternada
$C_c$	Concentração do concentrado
$C_p$	Concentração do permeado
CC	Corrente contínua
Cd	Cádmio
$c_i$	Concentração molar do íon i
$C_r$	Concentração de sais dissolvidos na corrente do concentrado
CV	Destilação por compressão de vapor
$E_p$	Consumo de energia prático
$E_{emp}$	Energia empírica consumida
ED	Eletrodialise
FV	Fotovoltaico
h	Hora
I	Corrente elétrica
In	Índio
$J_i$	Fluxo mássico do soluto
$J_w$	Taxa de fluxo de permeado
kWh	Quilowatt-hora
$K_w$	Coefficiente de transferência de massa do solvente
$K_i$	Coefficiente de transferência de massa do soluto
L	Litro
mg	Miligrama
MSF	Destilação Flash com Múltiplos Estágio
MED	Destilação Múltiplo Efeito
min	Minuto
OI	Osmose inversa
$\Delta P$	Gradiente de pressão aplicada
$P_a$	Pressão de alimentação

$P_c$	Pressão do concentrado
$P_p$	Pressão do permeado
pH	Potencial hidrogeniônico
$Q_a$	Vazão da alimentação
$Q_p$	Vazão do permeado
$Q_c$	vazão do concentrado
$r$	Recuperação do sistema
$R$	Constante universal dos gases perfeitos
$Re$	Recuperação do sistema
Se	Selênio
Si	Silício
$T$	Temperatura absoluta da solução
Te	Telureto
$TDS_a$	Total de sais dissolvidos na corrente da alimentação
$TDS_c$	Total de sais dissolvidos na corrente do concentrado
$TDS_p$	Total de sais dissolvidos na corrente do permeado
TRS	Taxa de rejeição de sais
V	Volt
W	Watt

## SÍMBOLOS GREGOS

$v_i$	Carga elétrica do íon $i$
$\rho_a, \rho_p, \rho_c$	Densidade da solução de alimentação, do permeado e do concentrado, respectivamente
$\Delta\pi$	Gradiente de pressão osmótica
$\pi$	Pressão osmótica
$\kappa$	Condutividade elétrica
$\rho$	Densidade
$\eta_b$	Eficiência da bomba
$\eta_m$	Eficiência do motor

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Osmose	10
Figura 2.2: Osmose Inversa	10
Figura 2.3 Elemento de membrana em espiral para o processo de osmose inversa	11
Figura 2.4: Mecanismos de incrustações ("fouling") na membrana	12
Figura 2.5: Esquema do sistema de osmose inversa	17
Figura 2.6: Célula fotovoltaica	23
Figura 2.7: Configurações da célula solar	24
Figura 2.8: Sistema fotovoltaico com carga CC sem armazenamento	26
Figura 2.9: Sistema fotovoltaico com carga CC com armazenamento	26
Figura 2.10: Sistema fotovoltaico com carga CA sem armazenamento	27
Figura 2.11: Sistema fotovoltaico com carga CA com armazenamento	27
Figura 2.12: Sistema fotovoltaico básico em blocos	28
Figura 3.1: Sistema de dessalinização via osmose inversa	39
Figura 4.1: Comportamento da potência elétrica com a pressão do sistema sob as seguintes condições: soluções de cloreto de sódio com concentração variando de 1.000 mg/L a 4.000 mg/L.	43
Figura 4.2: Comportamento da tensão elétrica com a pressão do sistema para a água Tipo1.	44
Figura 4.3: Comportamento da tensão elétrica com a pressão do sistema para a água Tipo1.	45
Figura 4.4: Comportamento da potência elétrica com a pressão do sistema para a água Tipo1.	45
Figura 4.5: Comportamento da tensão elétrica com a pressão do sistema para a água Tipo 2.	46
Figura 4.6: Comportamento da tensão elétrica com a pressão do sistema para a água Tipo 2.	46
Figura 4.7: Comportamento da potência elétrica com a pressão do sistema para a água Tipo 2.	47
Figura 4.8: Vazão volumétrica ( $m^3/h$ ) versus pressão ( $kgf/cm^2$ ) para concentração de alimentação de 1.000 mg/L, 2.000 mg/L, 3.000	48

mg/L e 4.000 mg/L.	
Figura 4.9: Comportamento da vazão com a pressão do sistema para a água Tipo1.	49
Figura 4.10: Comportamento da vazão com a pressão do sistema para a água Tipo2.	49
Figura 4.11: Comportamento da recuperação total do sistema com a pressão para soluções de concentrações variando de 1.000 mg/L a 4.000 mg/L.	50
Figura 4.12: Comportamento da recuperação do sistema com a pressão para a água Tipo 1.	52
Figura 4.13: Comportamento da recuperação do sistema com a pressão para a água Tipo 2.	52
Figura 4.14: Variação da energia consumida por metro cúbico de água permeada com a pressão do sistema, para concentrações variando de 1.000 mg/L a 4.000 mg/L.	53
Figura 4.15: Variação da energia consumida por metro cúbico de água permeada com a pressão do sistema para a água Tipo 1.	54
Figura 4.16: Variação da energia consumida por metro cúbico de água permeada com a pressão do sistema para a água Tipo 2.	55
Figura 4.17: Variação do potencial hidrogeniônico do concentrado e permeado da solução de cloreto de sódio de 1.000 mg/L.	56
Figura 4.18: Variação do potencial hidrogeniônico do concentrado e permeado da solução de cloreto de sódio de 2.000 mg/L.	56
Figura 4.19: Variação do potencial hidrogeniônico do concentrado e permeado da solução de cloreto de sódio de 3.000 mg/L.	56
Figura 4.20: Variação do potencial hidrogeniônico do concentrado e permeado da solução de cloreto de sódio de 4.000 mg/L.	56
Figura 4.21: Variação do potencial hidrogeniônico do concentrado e permeado para a água Tipo 1.	57
Figura 4.22: Variação do potencial hidrogeniônico do concentrado e permeado para a água Tipo 2.	57
Figura 4.23: Variação da condutividade elétrica do permeado e do concentrado para uma solução de cloreto de sódio de	58

concentração de 1000 mg/L.	
Figura 4.24: Variação da condutividade elétrica do permeado e do concentrado para uma solução de cloreto de sódio de concentração de 2000 mg/L.	58
Figura 4.25: Variação da condutividade elétrica do permeado e do concentrado para uma solução de cloreto de sódio de concentração de 3.000 mg/L.	59
Figura 4.26: Variação da condutividade elétrica do permeado e do concentrado para uma solução de cloreto de sódio de concentração de 4.000 mg/L.	59
Figura 4.27: Variação da condutividade elétrica do concentrado e permeado para a água Tipo1.	59
Figura 4.28: Variação da condutividade elétrica do concentrado e permeado para a água Tipo 2.	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Consumo de energia para destilação e osmose inversa para dessalinização da água do mar (Amjad, 1992).	02
Tabela 2.1: Relação dos processos de dessalinização com relação a concentração.	07
Tabela 3.1: Especificações da membrana de osmose inversa	39
Tabela 3.2: Especificações do painel fotovoltaico	40

# ÍNDICE

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	viii

## CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO.....	1
-------------------	---

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 DESSALINIZAÇÃO.....	4
2.1 PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO.....	6
2.2 PROCESSO DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE INVERSA.....	8
2.3 INCRUSTAÇÕES.....	11
2.4 PRÉ-TRATAMENTO/ PÓS-TRATAMENTO.....	12
2.5 PRINCIPAIS EQUAÇÕES QUE REGEM O PROCESSO DE OSMOSE INVERSA.....	13
2.5.1 PRESSÃO OSMÓTICA DE UMA SOLUÇÃO IÔNICA.....	13
2.5.2 FLUXO DO PERMEADO E DO CONCENTRADO.....	14
2.5.3 TAXA DE REJEIÇÃO DE SAIS.....	15
2.5.4 RECUPERAÇÃO.....	16
2.6 BALANÇO DE MASSA PARA O SISTEMA DE OSMOSE INVERSA.....	17
2.7 CONSUMO DE ENERGIA.....	18
2.8 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	20
2.8.1 HISTÓRICO.....	20
2.8.2 CONVERSÃO FOTOVOLTAICA.....	21
2.8.3 APLICAÇÕES DA ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	24
2.8.4 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÔNOMOS.....	25
2.8.5 CONFIGURAÇÕES BÁSICAS.....	25

2.8.5.1	Sistemas com carga CC sem armazenamento .....	26
2.8.5.2	Sistemas com carga CC com armazenamento .....	26
2.8.5.3	Sistemas com carga CA sem armazenamento.....	27
2.8.5.4	Sistemas com carga CA com armazenamento.....	27
2.8.6	SISTEMA DE CONVERSÃO FOTOVOLTAICA .....	27
2.8.6.1	Módulo fotovoltaico .....	28
2.8.6.2	Armazenamento de energia (baterias).....	30
2.8.6.3	Controlador/regulador de carga .....	31
2.8.6.4	Inversor/conversor .....	31
2.8.7	VANTAGENS DAS CÉLULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS .....	33
2.8.8	ENERGIA SOLAR PARA SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO .....	34

### CAPÍTULO III

<b>3</b>	<b>EXPERIMENTAL .....</b>	<b>38</b>
3.1	SISTEMA DE OSMOSE INVERSA .....	38
3.2	SISTEMA DE CONVERSÃO.....	38
3.3	SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	40
3.4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	40
3.5	PROCESSO DE LIMPEZA.....	41

### CAPÍTULO IV

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>42</b>
4.1	COMPORTAMENTO DA POTÊNCIA ELÉTRICA COM A PRESSÃO .....	42
4.2	COMPORTAMENTO DA VAZÃO DO PERMEADO E DO CONCENTRADO COM A PRESSÃO .....	47
4.3	COMPORTAMENTO DA RECUPERAÇÃO COM A PRESSÃO.....	50
4.4	COMPORTAMENTO DO CONSUMO DE ENERGIA COM A PRESSÃO .....	53
4.5	COMPORTAMENTO DO POTENCIAL HIDROGENIÔNICO COM O TEMPO	55
4.6	COMPORTAMENTO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA COM O TEMPO .....	57
4.7	CUSTO ESTIMATIVO .....	60
4.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	61

### CAPÍTULO V

<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>63</b>
----------	------------------------	-----------



<b>CAPÍTULO VI</b>	
<b>6 PERSPECTIVAS.....</b>	<b>65</b>
<b>CAPÍTULO VII</b>	
<b>7 BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>66</b>
<b>APÊNDICE I – Boletim técnico da membrana.....</b>	<b>72</b>
<b>APÊNDICE II – Especificações do painel fotovoltaico .....</b>	<b>73</b>
<b>APÊNDICE III – Análise físico-química das águas salobras.....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE IV – Tabelas referentes aos gráficos do Capítulo IV .....</b>	<b>75</b>

## CAPÍTULO I

---

### 1 INTRODUÇÃO

A água é a substância mais comum e a mais importante na face da terra. Mas, devido a sua distribuição irregular, milhares de pessoas continuam morrendo por sua falta e também pelos seus abastecimentos contaminados.

Por ser um dos produtos de maior quantidade de nosso planeta, a superfície terrestre é coberta por 75% de água, sua distribuição apresenta-se da seguinte forma: 97% encontra-se nos oceanos e mares, 2% nas calotas e geleiras; 0,3% na atmosfera na forma de vapor de água; 0,1% em rios e lagos e 0,6% de águas subterrâneas (Mallevalle *et al.*, 1996).

As regiões semi-áridas se encontram principalmente nos países tropicais, onde o índice de insolação é elevado. Nestas regiões existe pouca água disponível na superfície e a água presente no subsolo é, na maioria das vezes, salgada.

O Brasil é um país rico em água doce. Entretanto, toda essa água disponível é distribuída de forma extremamente desigual, existindo regiões onde é abundante e outras onde sua ausência é sinônimo de pobreza e desequilíbrio sócio-econômico.

A região do Nordeste é caracterizada por condições semi-áridas, apresentando em sua formação litológica uma predominância de rochas sedimentares, como também por litotipos cristalinos. Esse tipo de caracterização pode afetar a forma da distribuição dos recursos hídricos, uma vez que esses tipos de solos oferecem diferentes índices de porosidade e de permeabilidade; como é o caso das rochas cristalinas, que normalmente apresentam uma baixa permeabilidade e condicionam uma circulação lenta dos fluidos e conseqüentemente maior tempo de retenção das águas percoladas nos aquíferos. Esse fato, de certa forma vem contribuir para a salinização dos mananciais hídricos ao longo do tempo.

Constata-se que as águas subterrâneas das áreas do "polígono das secas", devido ao seu alto grau de salubridade, tornam-se impróprias para o consumo humano, animal e uso de irrigação, se agravando mais, no período de longa estiagem.

Para diminuir o índice de concentração de sais e tornar a água potável existem várias técnicas de dessalinização, sendo a osmose inversa (OI) a mais utilizada.

A osmose inversa (OI) é uma técnica de filtração que remove os constituintes dissolvidos em solventes (Amjad, 1993). Com tamanhos de poros muito pequenos, mesmo a maioria das espécies iônicas não atravessa as membranas de OI, permitindo a dessalinização de águas salinas. Para concentrações baixas de sais na solução, o processo pode ser energeticamente eficiente em relação aos métodos comumente usados no tratamento da água como a destilação térmica (Tabela 1.1).

Tabela 1.1: Consumo de energia para destilação e osmose inversa para dessalinização da água do mar (Amjad, 1993).

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

As fontes de energia alternativa são recursos renováveis estratégicos capazes de contribuir substancialmente ao atendimento e a sustentabilidade das demandas energéticas presentes e futuras de populações rurais, e ao mesmo tempo preservar recursos, promover o desenvolvimento sócio econômico e proteger o meio ambiente para as gerações futuras (Costa *et al.*, 1998).

No interior do Nordeste, além do problema do alto teor de sais na água, algumas comunidades se encontram isoladas, sem acesso a água de boa qualidade e sem energia elétrica. Para esses casos, existe uma resistência de implantar sistemas convencionais de dessalinização.

Somente 27,5% do número total de propriedades rurais são eletrificadas. As regiões Norte e Nordeste são as mais carentes, com apenas 1,8% e 11,1% do total de propriedades que contam com energia elétrica, respectivamente (Costa *et al.*, 1998).

Para ultrapassar estes obstáculos, a energia solar, que é a fonte de todas as outras (Bezerra, 2001), pode ser usada para sistemas de dessalinização (França *et al.*, 2000). Ela é considerada a melhor fonte de energia alternativa para sistemas de dessalinização em áreas remotas e áridas / semi-áridas (Mohsen *et al.*, 2001).

A conversão fotovoltaica é hoje uma tecnologia madura e competitiva para pequenas instalações em locais remotos, onde pode ter um vasto campo de utilização em projetos de eletrificação rural, abastecimento de água, irrigação, agroindústria, comunicações e bombeamento para sistemas de dessalinização. Os sistemas fotovoltaicos apresentam características sumamente atrativas tais como: modularidade, não possuem partes móveis, baixos custos de manutenção e potencialmente uma longa vida útil. Trata-se, portanto, de uma tecnologia que apresenta enorme potencial de desenvolvimento e capacidade para atender uma variedade de necessidades sociais e econômicas.

O objetivo geral deste trabalho é estudar o desempenho de um sistema de dessalinização via osmose inversa, em escala piloto, alimentado por painéis fotovoltaicos, para ser aplicado em locais desprovidos de energia elétrica e água de boa qualidade; e como objetivo específico quantificar parâmetros como tensão, corrente, potência, consumo de energia elétrica, recuperação, além da condutividade, vazão e potencial hidrogeniônico.

Este trabalho foi dividido em duas etapas:

- 1) O sistema de dessalinização via osmose inversa usando energia fotovoltaica foi inicialmente testado com uma solução de cloreto de sódio de concentração de 1000 mg/L a 4000 mg/L.
- 2) O sistema foi testado com água de poços tubulares com uma concentração de aproximadamente 2000 mg/L. Os resultados mostraram que o sistema tem condições de operar com água subterrânea de concentração de sais dissolvidos na faixa de 1000 mg/L a 3000 mg/L para produzir até 0,250 m<sup>3</sup>/h de permeado sem afetar as condições limites de produção do elemento de membrana exposta pelo fabricante (Boletim técnico da membrana - Apêndice I).

## CAPÍTULO II

---

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2 DESSALINIZAÇÃO

O fenômeno da osmose é de fundamental importância na natureza já que o transporte seletivo através de membranas é essencial a vida e começou a ser estudado a mais de duzentos anos.

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

O primeiro registro que se tem notícia sobre um estudo relativo a fenômenos de OI que ocorreram com membranas data de 1748 e se deve a um abade francês Abbe Nollet (Lonsdale, 1982). Em sua experiência, Nollet emergiu em água pura, um copo cheio de um destilado de vinho (para efeito do problema, uma simples mistura de água e etanol), vedado com uma bexiga (membrana) de origem animal. Após um certo tempo, ele observou que a bexiga se estufou, chegando mesmo a romper em alguns casos (Boddeker, 1995). Esta experiência evidenciou pela primeira vez, as características de semipermeabilidade de uma membrana.

Somente em 1855, mais de 100 anos após a experiência de Nollet, Fick publicou sua lei da difusão, que até hoje é utilizada para descrever muitos fenômenos que ocorrem em membranas. Alguns anos mais tarde, Graham estudou

a permeação de gases através de borrachas e efetuou as primeiras medidas experimentais de diálise utilizando membranas sintéticas. Ainda na segunda metade do século passado Traube, Pfiffer e Van't Hoff estudaram o fenômeno osmótico, que serviu de base para a descrição termodinâmica deste fenômeno, no caso de soluções diluídas – lei de Van't Hoff.

A primeira membrana sintética foi desenvolvida em 1867 por Moritz Traube (Traube, 1867). Os processos de separação com membranas começaram realmente, a deixar de ser uma curiosidade científica e de laboratório no final da década dos anos 50. Nessa época começou nos Estados Unidos, um plano de pesquisa em dessalinização de águas que resultou em pelo menos, duas descobertas importantes:

1) Em 1953, Reid propôs a dessalinização de água pelo processo de osmose inversa e investigou a permeabilidade de vários tipos de membranas sintéticas (Brandt *et al.*, 1993).

2) Em 1957, Reid e Breton relataram que membranas homogêneas de acetato de celulose, quando utilizadas para osmose inversa, podiam apresentar retenção salina elevada, logo apresentavam um bom desempenho como membranas semipermeáveis, sendo que a taxa de permeabilidade para a água era muito baixa para uso prático (Nishimura & Koyama, 1992).

Loeb e Sourirajan (1960-1962) aperfeiçoaram uma técnica para preparo das membranas utilizadas no processo de dessalinização de água por OI. Mais tarde essa técnica passou a ser chamada de inversão de fase por imersão-coagulação, que podia aumentar muito o fluxo do permeado de água, mantendo elevada a retenção de sais (Harbert *et al.*, 1997). A partir destes fatos, o interesse sobre o assunto aumentou consideravelmente, pois a melhoria na seletividade e a redução da resistência ao transporte das espécies permeantes representavam alterações que poderiam tornar os processos com membranas comercialmente viáveis, não somente para a dessalinização de águas, mas também para os processos de separação tradicionais em geral.

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

Durante os anos 80, os processos de separação com membranas passaram por um rápido desenvolvimento. Com o uso de tecnologias avançadas foi possível aumentar a taxa de rejeição de sais e o fluxo de água para água salobra e água do mar. Comercialmente, as membranas que vêm predominando são as aramidas, acetato e triacetato de celulose, apresentando modelo de configurações em espiral e fibra oca (Amjad, 1993).

Atualmente o desenvolvimento tecnológico de membranas, com a incorporação de novos materiais de menor custo e mais eficientes, tem permitido de forma significativa a ampliação do seu mercado e, por conseguinte a escala de produção.

## 2.1 PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO

Os processos de dessalinização surgiram com o objetivo de remover os sais da água, tornando-a potável.

Desde a década dos anos 80, o emprego de membranas semipermeáveis sintéticas em aplicações industriais passou a se difundir, ampliando o campo de aplicação deste processo. Isto resulta em contínuas reduções de custo, não só pela maior escala de produção permitida como também pelo crescente conhecimento tecnológico adquirido.

Existem diversos processos de purificação de água, mas somente podemos retirar sais dissolvidos através dos processos térmicos e de membranas (Ahmad & Schmid, 2001), (Tsiourtis, 2001).

Os principais processos de dessalinização disponíveis são:

- Processos térmicos

  - Destilação Flash com Múltiplos Estágios (MSF)

  - Destilação Múltiplo Efeito (MED)

  - Destilação por compressão de vapor (CV)

- Processos de membranas

  - Osmose inversa (OI)

  - Eletrodialise (ED)

Todos os métodos de dessalinização oferecem vantagens e desvantagens em termos de aplicabilidade e custos de instalação, operação, manutenção, volume de água tratada e de rejeito. Assim, para a escolha do processo mais adequado, deve-se avaliar, dentre outros, os seguintes itens (Tsiourtis, 2001):

1. Tipo de reservatório (água de alimentação: subterrânea ou superficial).
2. Composição físico-química e biológica da água.
3. Temperatura da água de alimentação.
4. Disponibilidade de energia.
5. Volume requerido de água tratada.
6. Destinação da água purificada / qualidade da água produzida.
7. Descarga e deposição do rejeito salino.
8. Escolha do sítio de implantação.
9. Fatores ambientais.

De uma maneira geral, cada processo ou variação tecnológica e metodológica opera melhor dentro de uma determinada faixa de salinidade (Manual de dessalinização para planejadores, 1972).

Tabela 2.1: Relação dos processos de dessalinização com relação à concentração.

Processos	Concentrações
Destilação	10.000 a 50.000 mg/L
Congelamento	5.000 a 50.000 mg/L
Eletrodialise	1.000 a 5.000 mg/L
Troca iônica	10 a 2.000 mg/L
Osmose inversa	1.000 a 15.000 mg/L

Embora se fundamentem nos mesmos princípios, as plantas de dessalinização têm diferentes configurações e capacidade de produção.

As energias usadas nos processos de dessalinização são principalmente, eletricidade e calor. As exigências de energia para plantas de dessalinização dependem da salinidade e temperatura da água de alimentação, da qualidade da água produzida e a tecnologia utilizada.



Os processos de destilação apresentam um consumo de energia superior ao de OI (Childs *et al.*, 1999). Ver Tabela 1.1.

A energia representa aproximadamente 25% - 40% do custo total do sistema de dessalinização de água (Tsiourtis, 2001).

Os avanços tecnológicos em transferência de calor, tecnologia de membrana, recuperação do mecanismo de energia, manufatura do tratamento químico da água e combinação dos métodos ou processos têm reduzido o consumo de energia por metro cúbico (Tsiourtis, 2001).

Em relação aos processos de dessalinização que vêm sendo comercializados a OI vêm sendo considerado como o processo mais atrativo para a produção de água potável a partir de água salobra e água do mar (Joyce *et al.*, 2001)

Atualmente, as plantas de dessalinização são usadas em 120 países (IDA, 2000). Os países do Oriente Médio usam a tecnologia de dessalinização representando mais de 50% da capacidade do mundo, seguindo, a América do Norte com 19%, a Europa com 13%, a Ásia com 12% e a África com 6% (Tsiourtis, 2001).

## 2.2 PROCESSO DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE INVERSA

A osmose inversa é um método de dessalinização de grande sucesso aplicado para água do mar, água salobra e água industrial (Abdel-Jawad *et al.*, 1993). Para o processo ocorrer, depende das propriedades de semipermeabilidade da membrana e da aplicação de uma pressão superior a pressão osmótica da solução (Childs *et al.*, 1999). A membrana atua como uma barreira a todos os sais dissolvidos e moléculas inorgânicas com peso molecular acima de 100 g/mol. As rejeições típicas de sais dissolvidos para águas salobras atingem a marca de 95% a 99% (Hydranautics, 1998) e para a água do mar de 25% a 45% (Mohsen *et al.*, 2001).

As membranas de osmose inversa são capazes de separar microsolutos dissolvidos com peso molecular inferior a 500 g/mol através do mecanismo de solução/difusão. Quando o peso molecular das partículas do soluto exceder este valor, o mecanismo de separação será determinado pelo tamanho das partículas presentes na solução e pelo diâmetro dos poros existentes na membrana.

Este processo pode reduzir sais, dureza, microorganismos em geral e patogênicos em particular, turbidez, compostos orgânicos, pesticidas e a maioria dos contaminantes presentes na água, deixando-a dentro dos padrões recomendados pela Organização Mundial de Saúde. Mas muitos dos gases dissolvidos tais como hidrogênio sulfídrico e dióxido de carbono, irão passar através da membrana de OI (Taylor & Jacobs, 1996).

A osmose inversa tem se mostrado como um dos processos da atualidade mais moderno para dessalinização de águas salobras e água do mar (Habert *et al.*, 1997). Além da dessalinização de águas, vem sendo empregada em recuperação de efluentes industriais, concentração de sucos, produtos farmacêuticos, processamento de alimentos e bebidas, soro do leite na fabricação do queijo, diálises, obtenção de água ultrapura, etc (Brandt *et al.*, 1993). As vantagens da osmose inversa incluem o baixo consumo energético, custos de capital e de operação relativamente baixo, necessidade de pequenos espaços e facilidades na construção, operação e manutenção, devido a natureza modular do processo (Mohsen *et al.*, 2001).

A osmose natural ocorre quando duas soluções de concentrações diferentes encontram-se separadas por uma membrana semipermeável. Neste caso, a água (solvente) da solução menos concentrada tenderá a passar para o lado da solução de maior salinidade (Figura 2.1). Com isto, esta solução mais concentrada, ao receber mais solvente, se dilui, num processo impulsionado por uma grandeza chamada "pressão osmótica", até que as duas soluções atinjam o equilíbrio osmótico (Joyce *et al.*, 2001).

A osmose inversa é um processo induzido que ocorre quando se aplica uma pressão no lado da solução mais salina ou mais concentrada, revertendo-se a tendência natural. Neste caso, a água da solução salina passa para o lado da solução menos concentrada, ficando retidos os íons dos sais nela dissolvidos (Figura 2.2). A água obtida é denominada de permeado, ou produto, e a solução concentrada de concentrado, ou rejeito (Joyce *et al.*, 2001).

Em processo de grande escala isso ocorre com um auxílio de uma bomba de alta pressão, sob um fluxo contínuo, passando por um permeador, onde fica situada a membrana. A pressão a ser aplicada equivale a uma pressão maior que a pressão osmótica característica da solução.

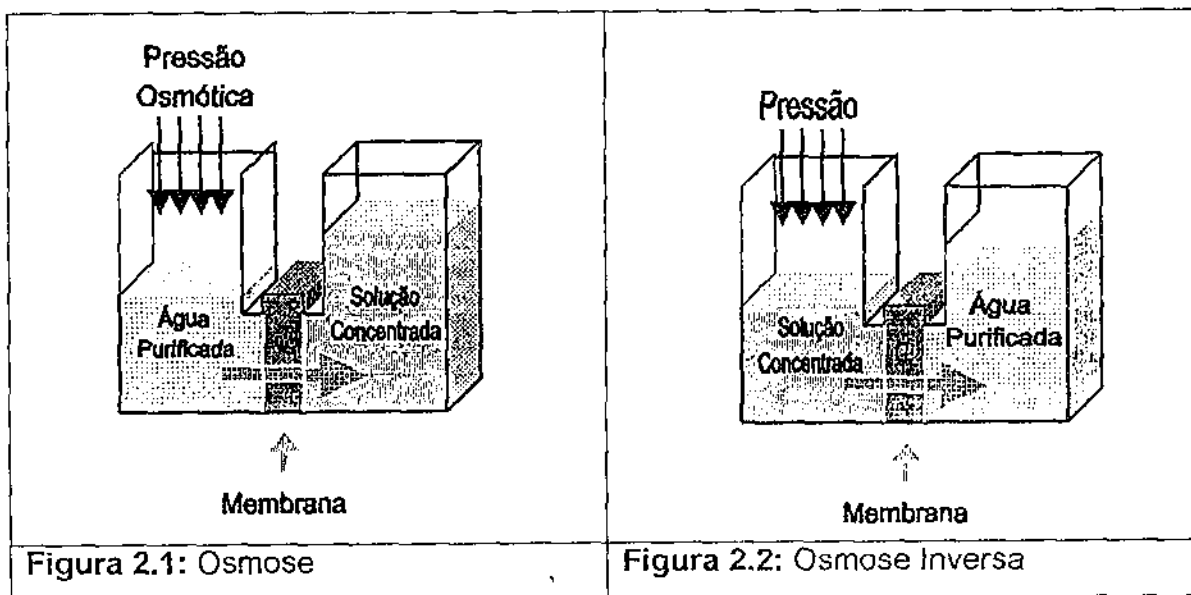
Para a dessalinização de água salobra a pressão de operação é na ordem de 250 psi a 400 psi e para a água do mar essa pressão é na faixa de 800 psi a 1000 psi (Mohsen *et al*, 2001).

Na dessalinização de águas salobras e do mar as membranas mais utilizadas são as de fibra oca e espiral (Scott, 1997).

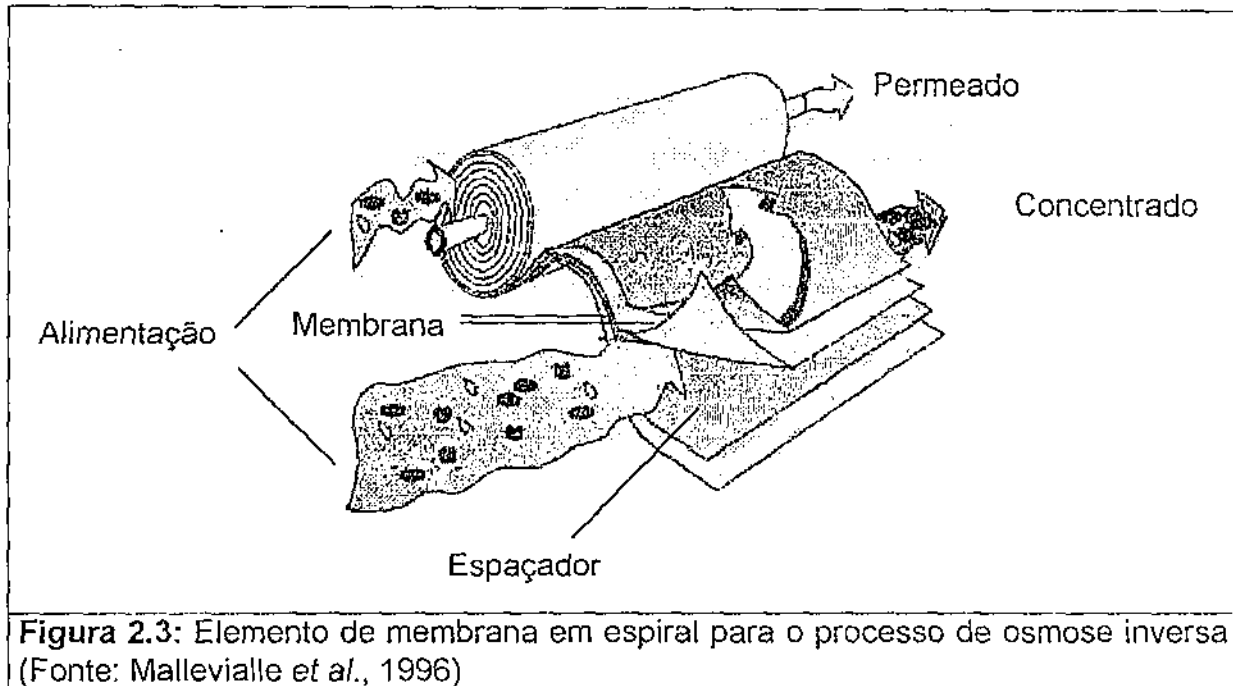
No modelo de fibras ocas a água afluenta, sob alta pressão, corre sobre a superfície externa das fibras. A água permeada escoo para fora, através da base destas fibras, e é coletada como produto.

O modelo em espiral é constituído por um envoltório de membrana em torno de um espaçador. Este conjunto é ligado a um tubo perfurado, localizado numa das extremidades do envoltório da membrana. Toda a estrutura do envoltório da membrana é enrolado em torno do tubo, ao modo de rocambole, e o conjunto inserido em um vaso de pressão cilíndrica. O fluido escoo sobre a membrana, enquanto que o permeado flui para um sistema coletor por intermédio de um tubo interno.

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



(Fonte: Mallevalle *et al*., 1996)



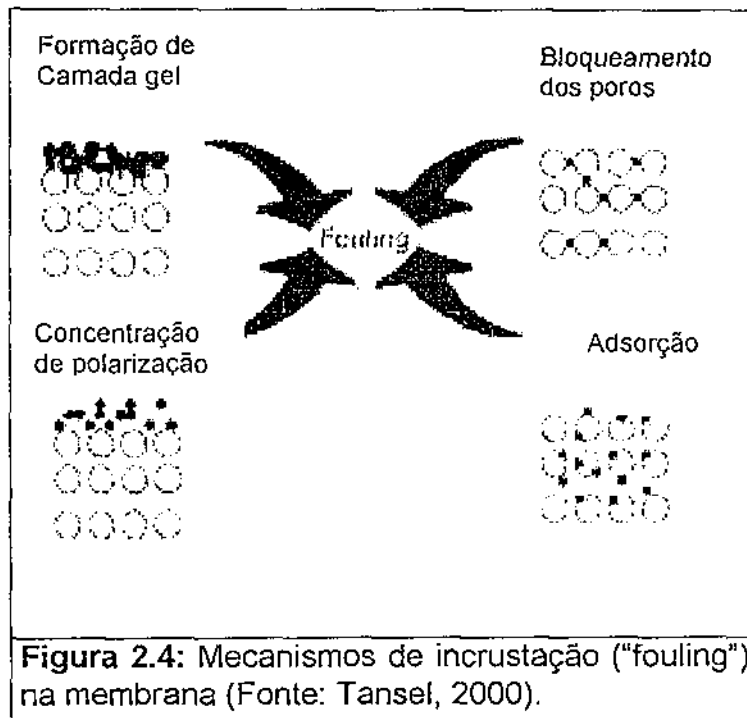
**Figura 2.3:** Elemento de membrana em espiral para o processo de osmose inversa (Fonte: Mallevalle *et al.*, 1996)

### 2.3 INCRUSTAÇÕES

Durante o processo de dessalinização podem surgir alguns problemas que afeta a produção de água permeada, como as incrustações. As incrustações são fenômenos, capazes de provocar uma queda no fluxo do permeado e/ou o aumento da passagem de sais com o tempo. Há incrustantes formados por materiais em suspensão (fouling), de natureza orgânica, como: argila, lodo, colóides, óxidos de ferro, manganês, além de sílica, bactérias e outras espécies biológicas (Brandt *et al.*, 1993); e também formados por depósitos minerais (scaling), insolúveis nas condições de pH e temperatura, que se precipitam na superfície da membrana, tais como: carbonato de cálcio, sulfato de cálcio, carbonato de magnésio, sulfato de bário, sulfato de estrôncio (Bennet *et al.*, 1996).

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

Portanto, as incrustações podem ser causadas por: concentração de polarização, formação de uma camada gel na superfície do filme da membrana, obstrução dos poros da membrana por materiais em suspensão, incrustação biológica e degradação da própria membrana (Abdel-Jawad *et al.*, 2002), (Figura 2.4).



## 2.4 PRÉ-TRATAMENTO E PÓS-TRATAMENTO

O pré-tratamento tem o objetivo de reduzir o potencial de incrustação na água de alimentação do sistema, devido a remoção de partículas micropoluentes e microrganismos, bem como a prevenção da formação de incrustação inorgânica, melhorando assim a qualidade da água de alimentação num nível que resultará numa maior segurança de operação para os sistemas de osmose inversa (Dudley & Darton, 1997).

O pré-tratamento é uma das etapas de grande importância para o sistema de dessalinização, pois ele evita a formação de incrustações, contribuindo para que a membrana não reduza seu tempo de vida útil.

Dependendo da qualidade e do uso da água permeada esta poderá passar por um pós-tratamento. Poderá haver necessidade de correção do 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.

## 2.5 PRINCIPAIS EQUAÇÕES QUE REGEM O PROCESSO DE OSMOSE INVERSA

### 2.5.1 PRESSÃO OSMÓTICA DE UMA SOLUÇÃO IÔNICA

A pressão osmótica que uma solução iônica exerce depende da concentração do soluto, da temperatura absoluta da solução, e da espécie de íons presentes. Quanto maior for a concentração da solução, maior será o valor da pressão osmótica dessa solução (Brandt *et al*, 1993). É dada pela seguinte equação:

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

Na qual:

$\pi$  - pressão osmótica

$v_i$  - carga elétrica do íon  $i$ ;

$c_i$  - concentração molar;

$R$  - constante universal dos gases perfeitos;

$T$  - 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, a equação de Van't Hoff pode ser usada para água salobra (Amjad, 1993).

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

O aumento do nível de recuperação do sistema faz com que, mais água é convertida em produto. Isto reduz o volume da água a ser rejeitada e, conseqüentemente, aumenta o valor de sais dissolvidos na corrente de concentrado, assim como a possibilidade de sua precipitação na superfície da membrana.

## 2.5.2 FLUXO DO PERMEADO E DO CONCENTRADO

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.

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

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

Na qual:

$J_w$  - taxa de fluxo de permeado;

$K_w$  - coeficiente de transferência de massa do solvente;

$\Delta P$  - gradiente de pressão aplicada;

$\Delta\pi$  - gradiente de pressão osmótica;

$Q_p$  - vazão do permeado;

$A$  - área de permeação da membrana.

O transporte de sais através da membrana é proporcional à concentração ou à diferença de potencial químico e depende de concentração e independe da pressão aplicada ao sistema (Taylor & Jacobs, 1996). Logo, o fluxo do concentrado pode ser representado por:

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

Na qual:

$J_i$  - fluxo mássico do soluto;

$K_i$  - coeficiente de transferência de massa do soluto;

$\Delta C$  - gradiente concentração;

$Q_p$  - vazão do permeado;

$C_p$  - concentração do permeado.

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

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

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

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

Na qual:

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

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

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

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

$$\Delta \pi = [(TDS_a + TDS_c) / 2 - TDS_p] * 7,033 * 10^{-4} \quad 2.7$$

Na qual:

$TDS_a$  - total de sais dissolvidos na corrente da alimentação

$TDS_c$  - total de sais dissolvidos na corrente do concentrado e

$TDS_p$  - total de sais dissolvidos na corrente do permeado (Mallevalle *et al.*, 1986)

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

### 2.5.3 TAXA DE REJEIÇÃO DE SAIS

A taxa de rejeição de sais ( $TRS$ ) refere-se à capacidade da membrana de rejeitar sais dissolvidos durante a permeação da água (Chen *et al.*, 1997). Devido a água e os sais terem taxas de transferência de massa diferentes, ocorre o fenômeno da rejeição dos sais.

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



A taxa de remoção de sais indica a efetividade da remoção de sais e outras espécies químicas pela membrana, possuindo valores que variam de 90 a 99,8%, dependendo do tipo de membrana utilizada e da água de alimentação.

#### 2.5.4 RECUPERAÇÃO

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

$$r(\%) = \left( \frac{Q_p}{Q_a} \right) \cdot 100 \quad 2.9$$

Na qual:

$r$  - nível de recuperação do sistema

$Q_p$  - vazão do permeado

$Q_a$  - vazão da alimentação

Como  $\rho_a Q_a = \rho_p Q_p + \rho_c Q_c$

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

$$r(\%) = \left[ \left( \frac{Q_p}{Q_p + Q_c} \right) \right] * 100 \quad 2.10$$

Onde:  $\rho_a$ ,  $\rho_p$  e  $\rho_c$  são a densidade da solução de alimentação, do permeado e do concentrado, respectivamente, e  $Q_c$  é o fluxo volumétrico do concentrado.

A recuperação máxima em qualquer instalação de osmose inversa, depende dos componentes presentes na água de alimentação, da pressão aplicada, da área de transferência de massa e do tipo de membrana utilizada no processo (Silveira, 1999). Com o aumento do nível de recuperação do sistema, mais água bruta é convertida em produto. Isto reduz o volume da água a ser rejeitada e, conseqüentemente, aumenta o valor da concentração de sais dissolvidos na corrente de rejeito, assim com a possibilidade de sua precipitação na superfície da membrana.

Quanto à concentração de sais dissolvidos na corrente do rejeito pode ser calculada com auxílio da seguinte equação:

$$C_r = \frac{C_a}{1-r} \quad 2.11$$

Na qual:

$C_r$  - concentração de sais dissolvidos na corrente do concentrado, ou rejeito;

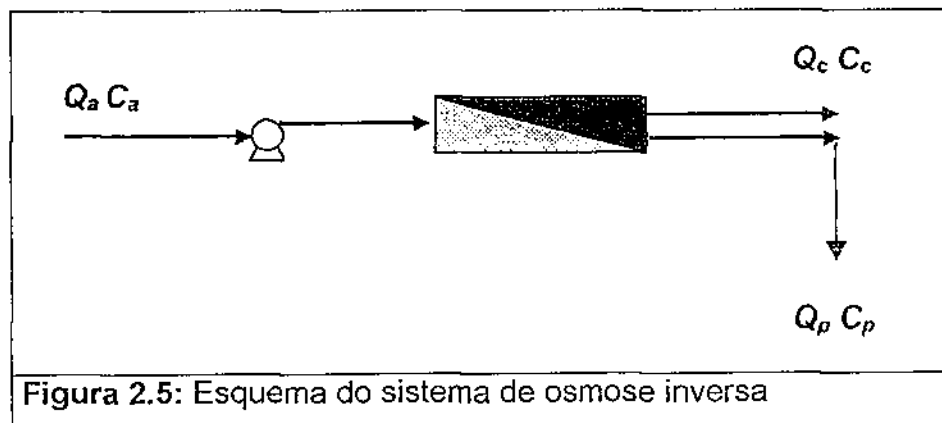
$C_a$  - concentração de sais dissolvidos na corrente de alimentação;

$r$  - nível de recuperação do sistema.

A recuperação para a água do mar é em torno de 25% a 45%, enquanto para a água salobra pode chegar de 90% a 99% (Mohsen *et al*, 2001).

## 2.6 BALANÇO DE MASSA PARA O SISTEMA DE OSMOSE INVERSA

O sistema de osmose inversa é composto de um único permeador, conforme a Figura 2.5.



Na equação 2.12 é apresentado o balanço de massa para o sistema de dessalinização.

$$Q_a C_a = Q_p C_p + Q_c C_c \quad 2.12$$

Na qual:

$Q_a$  - vazão da alimentação;

$Q_p$  - vazão do permeado;

$Q_c$  - vazão do concentrado.

## 2.7 CONSUMO DE ENERGIA

A maior parte do consumo de energia em um sistema de dessalinização é devido à parcela necessária para transferir as espécies iônicas da solução através das membranas e àquela desprendida para bombear as soluções da unidade de dessalinização (Mallevalle *et al.*, 1996).

As bombas para processos de osmose inversa são bombas centrífugas típicas, que são construídas de materiais não corrosivos e operam entre 12,40 kgf/cm<sup>2</sup>; 24,8 kgf/cm<sup>2</sup> e 28,44 kgf/cm<sup>2</sup>. Bombas de alta pressão podem operar até 86,40 kgf/cm<sup>2</sup> ou mais. Devido ao alto consumo energético, as bombas que operam com água do mar são bombas de deslocamento positivo.

O consumo de energia está diretamente relacionado com o nível de recuperação do sistema de dessalinização e a eficiência da bomba e do motor trabalhado, como também o número de membranas envolvidas e das soluções no interior do dessalinizador.

A equação empírica geralmente usada para calcular a energia gasta durante o processo de dessalinização é dada por:

$$E_{emp} = \frac{(H \cdot 0,30) \cdot (0,0035)}{\eta_r \cdot \eta_b \cdot \eta_m} \quad 2.13$$

Na qual:

$E_{emp}$  - energia empírica consumida (kWh/m<sup>3</sup>);

$H$  - altura do nível da coluna de alimentação (ft);

$\eta_r$  - eficiência de recuperação do sistema;

$\eta_b$  - eficiência da bomba;

$\eta_m$  - eficiência do motor;

(0,30) – fator de conversão de ft para m;

(0,00315) – fator de conversão de energia para plantas de osmose inversa para kWh/m<sup>3</sup> (Mallevalle *et al.*, 1996).

Na prática, o consumo de energia é dado pela razão entre a potência consumida pela bomba e a vazão do permeado:

$$E_p = \frac{P}{Q_p} \quad 2.14$$

Na qual:

$E_p$  - consumo de energia prático (kWh/m<sup>3</sup>);

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

$Q_p$  - vazão do permeado (m<sup>3</sup>/h)

A potência ativa consumida pelo sistema é dada por:

$$P = V * I \quad 2.15$$

Na qual:

$V$  - tensão elétrica (volt)

$I$  - corrente elétrica (ampère)

## 2.8 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

### 2.8.1 HISTÓRICO

A conversão direta de energia solar em eletricidade tem sido objeto de estudo desde o fim do século XIX. O efeito fotoelétrico foi descoberto em 1890, quando Heinrich Hertz, testando a teoria eletromagnética da luz proposta por Maxwell, verificou a existência de ondas eletromagnéticas quando uma placa metálica era exposta à luz ultravioleta. Os resultados dessa experiência surpreenderam os físicos da época.

Entre as duas guerras mundiais, um esforço significativo foi empreendido em muitos países, notavelmente EUA, Alemanha, França e Inglaterra. Os materiais estudados eram principalmente o selênio e o  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Materiais como o silício, que são de maior interesse para a conversão fotovoltaica, não existiam como monocristais de elevada pureza naquela época (Palz, 1981).

Em 1950, foi descoberto que certos materiais denominados de semicondutores tinham a propriedade de converter em eletricidade à luz solar a que estavam expostos.

Em 1954, nos Laboratórios Bell Telephone, nos Estados Unidos, foram desenvolvidas pastilhas finas de silício, "dopadas" com certas impurezas, são cerca de 10 vezes mais eficientes na conversão de luz em eletricidade do que as substâncias até então utilizadas nas fotocélulas (McVeigh, 1979). Nesse mesmo ano, foi desenvolvido um processo para a purificação de monocristais de silício. Com base neste processo, não só o desenvolvimento de células solares de silício tornaram-se possíveis, mas também um grande impulso para a tecnologia do transistor e a moderna indústria eletrônica.

A tecnologia da célula básica de silício foi aperfeiçoada progressivamente desde 1954. Em 1955, em Phoenix, no Arizona, ocorreu a primeira apresentação pública de células fotovoltaicas para a conversão de eletricidade.

Os estudos continuaram aceleradamente, não só com o silício, mas também com outros semicondutores. Desde então, tem-se verificado uma evolução no sentido da melhoria do rendimento de conversão, tendo sido alcançado valores de até 16% para as células de silício e superiores a 20% para as células de gálio, em condições laboratoriais.

Entre os anos de 1955 e 1959, as células de silício já começaram a ser comercializadas, principalmente para o mercado terrestre. A partir de 1958, quando o primeiro satélite foi lançado, o Skylab, as células de silício tornaram-se quase a fonte exclusiva de energia para os satélites. A razão do tremendo sucesso das células solares para a Astronáutica é que os conversores solares mostraram-se os de menor massa que qualquer outra fonte, considerando-se a massa de combustível (que no caso do gerador solar é zero).

Em 1974, o Congresso Norte-Americano aprovou a lei que autorizava um Programa Nacional de pesquisas de energia solar. A partir deste programa aumentou o interesse pela energia solar, e hoje são muitos os estudos que buscam essa fonte de energia alternativa gratuita e não poluente.

Atualmente, existem numerosas instalações solares na França, Japão, Rússia, Argélia, Índia, EUA, Canadá, Chile, etc. No Brasil vêm-se desenvolvendo estudos sobre o aproveitamento da energia solar em algumas universidades (UFRJ, UNICAMP, UFPB, UFCG, UFPE, UFSC, USP).

O silício mostrou ser o material mais barato e eficiente para a produção de eletricidade através do efeito fotovoltaico, o fato sua eficiência está próximo de 12%. vem sendo o elemento mais comercializado (Childs *et al*, 1999).

## 2.8.2 CONVERSÃO FOTOVOLTAICA

A conversão fotovoltaica consiste na transformação direta da energia luminosa do sol em energia elétrica, utilizando captadores denominados fotocélulas (Bezerra, 2001).

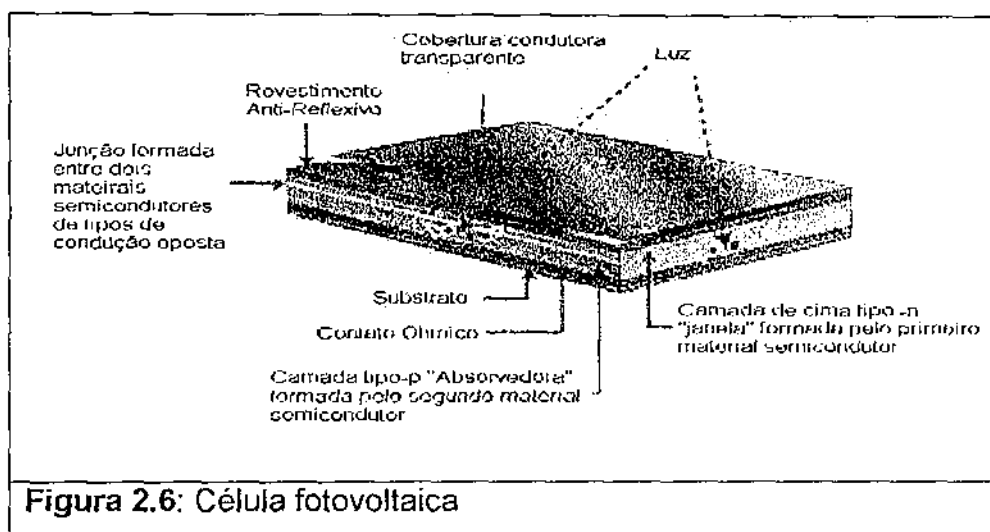
As fotocélulas constituem um campo altamente promissor do aproveitamento da energia solar, cuja viabilidade técnica já foi comprovada no suprimento de energia necessária ao funcionamento dos aparelhos elétricos e eletrônicos instalados nos engenhos espaciais lançados em órbita (Palz, 1981).

Apesar das sofisticadas tecnologias que vêm sendo empregadas na construção das células solares, elas ainda não conseguiram um estágio de desenvolvimento industrial que as tornassem totalmente competitivas, apenas para algumas aplicações já são, como: as bóias de navegação, faróis e estruturas de "offshore" que funcionam sem pessoal, e as estações meteorológicas automáticas.

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 neles incide um feixe de luz. Estes materiais são denominados de semicondutores, que são substâncias isolantes a temperaturas muito baixas, mas condutores elétricos a temperatura ambiente (Acioli, 1994). Quando estes semicondutores são submetidos à ação de um feixe luminoso, liberam elétrons, produzindo uma corrente contínua. Ao liberar os elétrons, os lugares por eles ocupados na rede do cristal recebem o nome de vazios, aos quais se atribui simbolicamente uma carga positiva. O deslocamento dos elétrons na rede do cristal se faz até que eles se combinem com os átomos incompletos e preenchendo assim os vazios. Nos cristais puros os elétrons e os vazios, são em igual número e, portanto as recombinações são freqüentes dando origem a uma fraca condutibilidade.

Para melhorar a condutibilidade é feita uma dopagem, ou seja, são introduzidas no cristal pequenas quantidades de impurezas constituídas por átomos que possuam um número de elétrons de valença diferente do cristal, fazendo com que os elétrons circulem mais livremente.

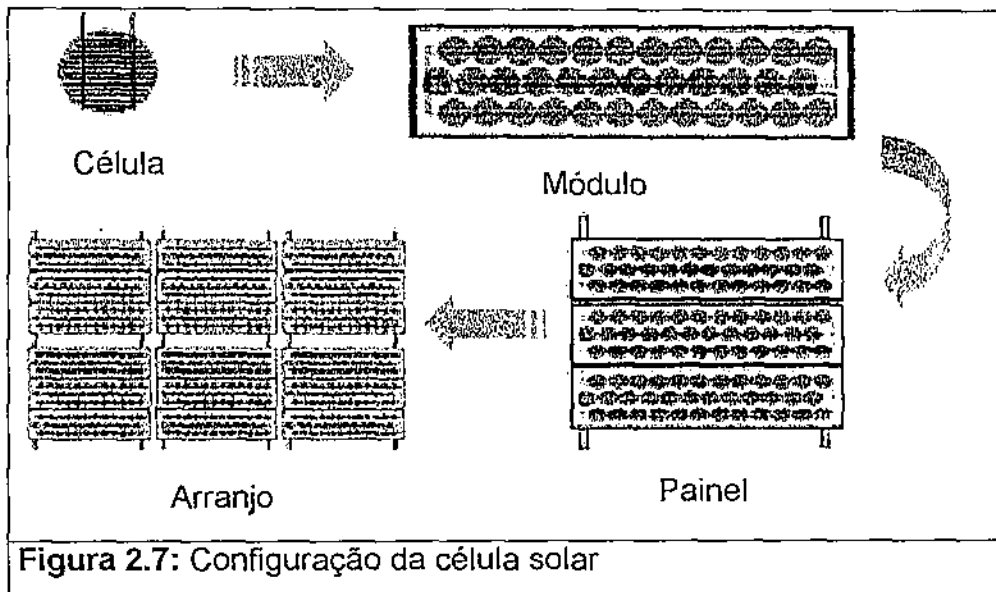
Quando o número de elétrons está em excesso, tem-se um semicondutor do tipo n. E quando o excesso é de vazios, tem-se um semicondutor positivo tipo p. Então, quando é feita a dopagem há a formação de duas regiões: uma rica em elétrons e outra rica em vazios. Entre estas duas regiões forma-se uma junção p-n, região de pequena espessura no qual a condutividade passa do tipo p para o tipo n. Portanto, quando a superfície do semicondutor for exposta aos raios solares, os elétrons passam pela junção p-n em direções opostas, surgindo assim um campo elétrico ( $E$ ) de p para n, conseqüentemente dando origem a corrente elétrica (Green, 2002).



Dentre os diversos semicondutores utilizados para a produção de células solares fotovoltaicas, destacam-se os de silício mono e policristalino, o germânio, o telureto de cádmio (CdTe) e os compostos relacionados ao dissulfeto de cobre e índio (CuInSe<sub>2</sub>). Neste último grupo aparecem elementos que são altamente tóxicos (Cd, Se, Te), ou muito raros (Te, Se, In, Cd). O silício é o segundo elemento mais abundante na superfície de nosso planeta (mais de 25% da crosta terrestre é silício (Hammond,1992) e não apresentam toxicidade (Shah, 1992).

O Si é matéria-prima mais tradicional e a única dentre as mencionadas acima que faz uso de lâminas cristalinas (diâmetro~10cm) relativamente espessas (espessura 300-400µm), o que representa uma maior limitação em termos de redução de custos de produção. Todas as outras tecnologias estão baseadas em películas delgadas (filmes finos, com espessura da ordem de 1µm) de material ativo semicondutor e é neste aspecto que reside o grande potencial de redução de custos que estas tecnologias detêm. Filmes finos para aplicações fotovoltaicas estão sendo desenvolvidos para a conversão de energia elétrica por apresentarem baixos custos de produção decorrentes das quantidades diminutas de material envolvido, das pequenas quantidades de energia envolvidas em sua produção, do elevado grau de automação dos processos de produção (grande capacidade de produção) e seu baixo custo de capital (Rüther, 1996). Devido ao fato de que a luz solar contém relativamente pouca energia, se comparada a outras fontes energéticas, painéis solares fotovoltaicos têm de ter um baixo custo para poder produzir energia elétrica a preços competitivos.





### 2.8.3 APLICAÇÕES DA ENERGIA 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 (nos satélites).

No campo terrestre estas aplicações podem, a grosso modo, ser divididas em duas categorias:

- produtos de consumo;
- sistemas autônomos.

Na categoria de produtos de consumo estão incluídos as calculadoras, relógios, brinquedos, pequenos carregadores de baterias, televisores portáteis e aparelhos de uso doméstico (alarmes, iluminação, etc.).

Os sistemas autônomos também abarcam uma vasta gama de aplicações, tanto rurais como urbanas, tais como: uso em residências, sistemas comerciais e agrícolas que não estejam conectados com a rede elétrica. Dentro desta categoria, as aplicações mais comuns são para: telecomunicações, bombeamento de água para consumo ou irrigação, sensoriamento remoto, sinalizações (bóias, faróis, linhas de trem, etc.), cerca elétrica, iluminação pública, alimentação elétrica de residências ou postos de saúde, sistemas de dessalinização, entre outros (Leão *et al.*, 2001).

## 2.8.4 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÔNOMOS

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três categorias principais: isolados, híbridos ou conectados à rede elétrica. A utilização de cada uma dessas opções vai depender do tipo de aplicação e da disponibilidade de recursos energéticos. Os sistemas fotovoltaicos autônomos são sistemas que não estão conectados à rede elétrica, mas podem ou não apresentar fontes de energia complementar à geração fotovoltaica.

Quando o sistema não se restringe somente à geração fotovoltaica, dizemos que o sistema é híbrido. Quando o sistema não é interligado a rede elétrica comercial, puramente fotovoltaico, ele é denominado de sistema isolado.

Sistemas fotovoltaicos autônomos, híbridos ou isolados, em geral, necessitam de algum tipo de armazenamento. Este armazenamento pode ser feito por meio de baterias, energia potencial gravitacional (sistemas de bombeamento de água), produção de hidrogênio, ar comprimido, etc.

Além deste armazenamento, os sistemas autônomos híbridos necessitam de um controle que integre os vários geradores de forma a otimizar a operação. Existem várias configurações possíveis, assim como estratégias de uso de cada fonte de energia.

## 2.8.5 CONFIGURAÇÕES BÁSICAS

Os sistemas fotovoltaicos autônomos possuem configurações específicas que variam muito dependendo da sua utilização. Essas configurações podem ser classificadas levando-se em conta o tipo de carga a ser alimentada e se o sistema necessita de armazenamento (Sandia National Laboratories, 1991).

Tomando estas definições, os sistemas fotovoltaicos autônomos dividem-se em:

- Sistemas com carga CC sem armazenamento
- Sistemas com carga CC com armazenamento
- Sistemas com carga CA sem armazenamento
- Sistemas com carga CA com armazenamento

### 2.8.5.1 Sistemas com carga CC sem armazenamento

Neste tipo de configuração a energia elétrica é usada no momento da conversão por efeito fotovoltaico em equipamentos que operam em corrente contínua. Um exemplo deste tipo de uso é em sistemas de bombeamento de água com bombas com motor de corrente contínua. A Figura 2.8 mostra um esquema de blocos deste tipo de configuração.

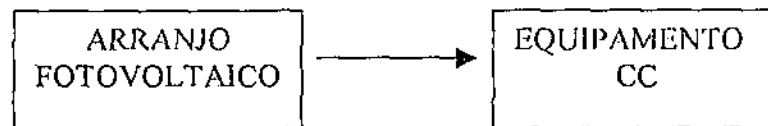


Figura 2.8: Sistema fotovoltaico com carga CC sem armazenamento

### 2.8.5.2 Sistemas com carga CC com armazenamento

Este é o caso em que se deseja usar em equipamentos elétricos, em corrente contínua, mesmo durante o período em que não está havendo conversão fotovoltaica. Para que isso ocorra é necessário que se armazene a energia em baterias. Exemplos comuns são iluminação, televisão, sistemas de comunicação, etc.

O uso de um controlador de carga é necessário de forma a proteger as baterias contra danos devido a sobrecargas e descargas profundas. Na Figura 2.9 temos este tipo de configuração.

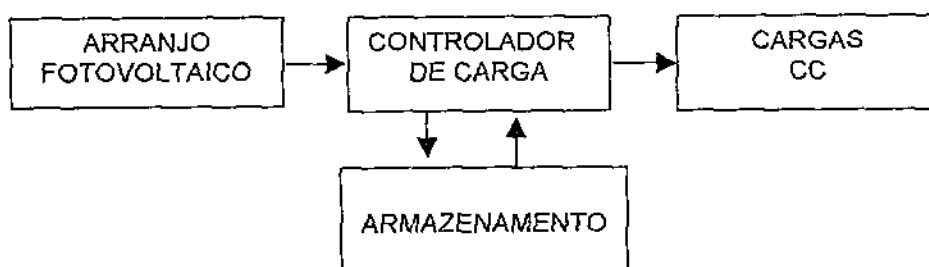


Figura 2.9: Sistema fotovoltaico com carga CC com armazenamento

### 2.8.5.3 Sistemas com carga CA sem armazenamento

Idêntico ao apresentado para cargas CC com uma pequena diferença que é a introdução de um inversor entre o arranjo fotovoltaico e o equipamento a ser usado. Um sistema de bombeamento alimentado com CA pode ser usado como exemplo. A Figura 2.10 mostra esta configuração por meio de blocos funcionais.



Figura 2.10: Sistema fotovoltaico com carga CA sem armazenamento.

### 2.8.5.4 Sistemas com carga CA com armazenamento

Esta configuração é utilizada para alimentação de equipamentos que operem em corrente alternada, portanto também necessita de um inversor. Este tipo de sistema utiliza um seguidor de ponto de máxima potência, que pode ser incluído no próprio inversor. Um exemplo comum deste tipo de configuração é no atendimento a residências isoladas, em que existam eletrodomésticos convencionais (CA). Um sistema assim pode ser visto na Figura 2.11.

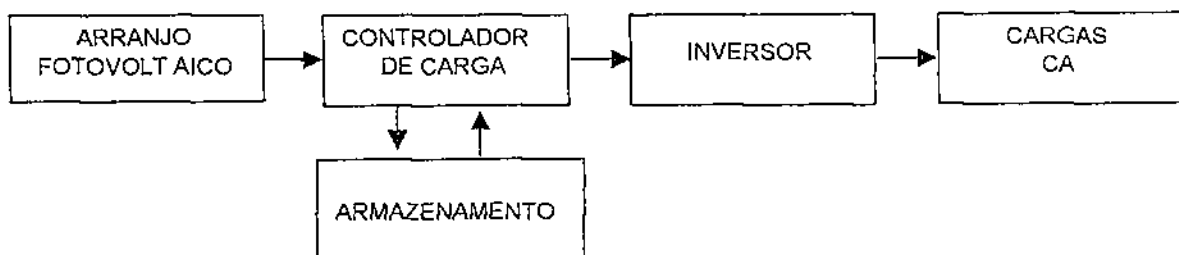


Figura 2.11: Sistema fotovoltaico com carga CA com armazenamento.

## 2.8.6 SISTEMA DE CONVERSÃO FOTOVOLTAICA

O sistema de conversão fotovoltaica engloba todo o agrupamento de módulos em painéis fotovoltaicos e outros equipamentos convencionais, que transformam ou armazenam a energia elétrica para esta ser utilizada na aplicação final. Este sistema resume-se basicamente a quatro blocos: o módulo fotovoltaico, o controlador de

carga, o inversor, as baterias como bloco de armazenamento, outros equipamentos, como fiação, diodos de proteção, sistemas de consumo da energia obtida (cargas).

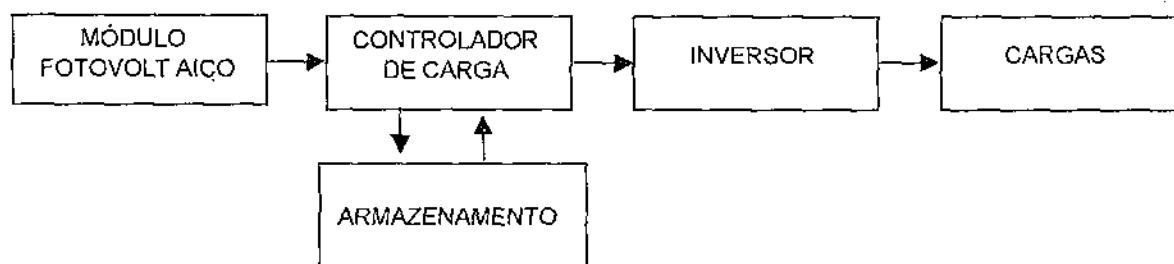


Figura 2.12: Sistema fotovoltaico básico em blocos.

#### 2.8.6.1 Módulo fotovoltaico

O módulo é a unidade básica de todo sistema de geração de eletricidade fotovoltaica. O módulo é composto de células conectadas em arranjos que produzem tensões e correntes suficientes para o aproveitamento prático da energia, já que cada célula tem ( $15 \times 15 \text{cm}^2$ ) só pode fornecer cerca de 1,0 -1,5 W com tensão de 0,5 V.

- Tensão de circuito aberto e corrente de circuito aberto

Quando um módulo está posicionado na direção do sol, a tensão pode ser medida entre os terminais positivos e negativo de um voltímetro. Se não houver, ainda, nenhuma conexão de qualquer equipamento ao módulo, a corrente não flui; então esta é denominada de tensão de circuito aberto ( $V_{ca}$ ).

A corrente deve ser medida por um amperímetro; e ainda sem as conexões de qualquer equipamento, se ligarmos os terminais de um módulo diretamente, haverá uma corrente fluindo, a qual será denominada de corrente de curto-circuito ( $I_{cc}$ ); neste caso a tensão é zero.

- Arranjo dos módulos

Os módulos, assim como as células em um módulo, podem ser conectadas em ligações série e/ou paralelo, dependendo da potência e tensão desejadas.

A conexão em série dos dispositivos fotovoltaicos é feita de um terminal positivo de um módulo a um terminal negativo de outro, e assim por diante.

Quando a ligação está em série (isto é idêntico para células, módulos e painéis) as voltagens são adicionadas e a corrente não é afetada, ou seja:

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad 2.16$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad 2.17$$

Ao assumirmos as correntes individuais iguais, significam considerar-se módulos idênticos sob as mesmas condições de radiação e temperatura.

Dispositivos conectados em paralelo compreendem ligações de terminais positivos juntos e terminais negativos juntos.

A conexão em paralelo causa adição das correntes enquanto que a tensão continua a mesma, ou seja:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad 2.18$$

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad 2.19$$

Assumindo que as tensões individuais sejam iguais, significam considerar-se módulos idênticos sob as mesmas condições de radiação e temperatura.

Para proteger o painel dos possíveis agentes externos (danos e condições climáticas) é necessário revesti-los com alguns elementos, como:

- Cobertura 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 freqüentemente 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 a estrutura exterior do painel.
- Fiação e bornes de conexão habituais nas instalações elétricas, protegidas da intempérie por coberturas de materiais isolante.
- Diodo de proteção contra sobrecargas ou outras alterações de funcionamento do painel.

#### 2.8.6.2 Armazenamento de energia (Baterias)

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 energia fornecida é variável de acordo com a hora do dia (potencial de insolação), nebulosidade, clima, etc (IDAE, 1995). Sabe-se também que o período de aproveitamento da energia direta é curto, sendo em torno de 6 horas por dia.

Assim, nas instalações fotovoltaicas, o meio mais habitual é armazenar a energia em baterias durante as horas de irradiação disponível, para sua utilização posterior nos momentos de insolação baixa ou nula.

A irradiação solar é captada pelos painéis e transformada em energia. Uma parte desta energia pode ser armazenada pelo banco de baterias e a outra parte é utilizada pelo equipamento de corrente contínua.

As baterias mais usadas para armazenar a energia nos sistemas fotovoltaicos (FV) são as baterias de chumbo-ácido, pois além de se encontrarem dentre dos

padrões aceitáveis, elas são as que apresentam o menor custo. Apesar destas baterias utilizarem um elemento muito tóxico, o chumbo, possui um elevado grau de reciclagem, garantindo boa compatibilidade ambiental. Estima-se que na Europa e nas Américas a taxa de reciclagem seja superior a 80%.

Quando se escolhe uma bateria para um sistema FV deverão observar além da tensão nominal alguns fatores, como:

- Temperaturas admissíveis (-15 °C até +50 °C);
- Taxa de auto-descarga (2 % por mês a 25 °C);
- Tempo de vida (1800 ciclos com 80% de profundidade de descarga);
- Capacidade para descargas de 10h;
- Frequência requerida para restabelecer os níveis de eletrólito;
- Peso, resistência à sobrecarga e custo.

Nos sistemas de osmose inversa pode-se utilizar motores de corrente contínua (CC) ou de corrente alternada (CA), neste último caso necessita-se de um inversor.

### **2.8.6.3 Controlador/regulador de carga**

O controlador de carga tem uma importância fundamental no sistema, pois ele tem a função de impedir que a bateria receba sobrecargas e descargas excessivas de energia do painel fotovoltaico. No caso de sobrecarga, inicia-se na bateria processo 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. No caso de descarga em excesso, este fenômeno pode provocar uma sensível diminuição na vida útil da bateria em sucessivos ciclos.

O controlador/regulador de carga deve ter boa estabilidade térmica e baixo consumo. Ele otimiza o uso da energia fotovoltaica.

### **2.8.6.4 Inversor/conversor**

Os conversores e inversores são elementos cuja finalidade é adaptar as características da corrente gerada à 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. Os inversores são responsáveis pela conversão de corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). Eles usam um mecanismo de chaveamento para alterar o fluxo de corrente entre as direções positiva e negativa.

Como os painéis fotovoltaicos, as baterias trabalham em corrente contínua, então não faz necessária a presença de um inversor. Mas, caso deseje utilizar a energia fotovoltaica para equipamentos que utilizam corrente alternada é necessário adaptar a corrente de alimentação com a corrente utilizada no equipamento.

Um inversor caracteriza-se principalmente pela tensão de entrada, que deve se adaptar à do gerador, à potência máxima que pode proporcionar e à eficiência. Esta última é definida como a potência elétrica que o inversor entrega à carga (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. É necessário conhecer essa variação, 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. Pode-se considerar a eficiência de 70% da carga como um parâmetro aceitável de eficiência do inversor. Porém, na atualidade, a eficiência dos inversores é da ordem de 90% (Ceragioli, 1997).

Outros aspectos 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.
- Está adequadamente protegidos contra curto-circuitos e sobrecargas.
- 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.

### **2.8.7 VANTAGENS DAS CÉLULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS**

As células solares fotovoltaicas apresentam uma série de vantagens que vem fazendo com que a sua procura cresça cada vez mais. Entre estas, podemos citar: funcionamento silencioso, simples e confiável; fonte renovável de energia elétrica; maior potência por unidade de área; instalação simples; compacto e potente; construção reforçada e duradoura; não possui partes móveis que podem se desgastar, sistema de baixa manutenção, sistema modular leve; compatível com qualquer bateria; grande vida útil (em torno de 20 anos); energia solar como combustível; converte energia mesmo em dias nublados; fornece tensões de 12, 24, 36 e 48 volts (corrente contínua), dependendo da necessidade; tem fácil manuseio e transporte, podendo ser ampliado conforme sua necessidade; oferece baixo impacto ambiental, etc.

### 2.8.8 ENERGIA SOLAR PARA SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO

A primeira aplicação prática da energia solar fotovoltaica foi na dessalinização de águas, usando a destilação (Bezerra, 2001). Estas experiências foram realizadas na Espanha, Argélia, Egito, Canadá, Itália e na Arábia Saudita.

A energia solar é considerada uma das melhores fontes de energia alternativa para plantas de dessalinização. Porém, seu uso ainda está limitado a regiões remotas, não eletrificadas e em pequena escala (McVeigh, 1979), (Palz, 1981), (Cres, 1998).

Embora a osmose inversa e as células fotovoltaicas sejam cada vez mais usadas em todo o mundo, sua combinação é recente (Carvalho, 2000). Este sistema vem ganhando cada vez mais espaço, principalmente nas regiões áridas que possuem uma alta taxa de radiação solar. A sua utilização para dessalinizar água do mar e água salobra em algumas regiões remotas da Índia, América Latina, África, Austrália, Arábia Saudita e Jordânia cresce aceleradamente, devido a necessidade de água potável para consumo humano (Joyce et al., 2001), (Mohsen et al., 2001).

Essa tecnologia é viável principalmente para áreas rurais que não são abastecidas com energia elétrica convencional. O uso de fonte de energia fotovoltaica é de interesse particular em áreas onde o potencial de ventilação é baixo, mas o potencial de insolação é alto (Voros et al., 1998).

Existem poucos relatos sobre sistemas de dessalinização OI usando energia solar (Alawaji et al., 1995), (Ishimura, 1994). Em relação ao sistema de dessalinização OI via energia solar fotovoltaica (FV), os sistemas existentes não apresentam problemas técnicos significativos tais como o sistema instalado em Riad, Arábia Saudita. Duas fontes separadas de energia fotovoltaica – uma (980 Wp\*) para alimentar as bombas submersíveis do poço (TDS de 5.800 mg/L), e a outra (10,08 kWp) para fornecer a energia do sistema de dessalinização – fazem parte de uma usina de dessalinização de capacidade de produção de 0,6 m<sup>3</sup>/h de água potável (Alawaji et al., 1995). O segundo sistema (Tzen et al., 1998) é uma unidade de dessalinização de água do mar de capacidade de produção de 0,5 m<sup>3</sup>/h alimentada por energia fotovoltaica. Neste caso, um custo relativamente alto de 29 ECU/m<sup>3</sup> (ECU -moeda europeia) de água potável é calculado.

\* Wp (Watt-pico) é uma unidade padrão definida para caracterizar a instalação fotovoltaica. 34  
O valor Wp é calculado como sendo a potência que pode ser obtida por um painel fotovoltaico recebendo radiação solar de 1000 W/m<sup>2</sup>, com a célula do painel a uma temperatura de 25°C.

Sistemas de recuperação de energia oferecem a possibilidade de minimizar o consumo de energia e o custo da água obtida (Keefer *et al.*, 1985). Porém, Keefer *et al.* (1985) mostraram que tais sistemas de recuperação são mais adaptados por sistemas de dessalinização de água do mar do que por sistemas de dessalinização de águas salinas como os estudados neste trabalho.

Através do Programa "Água Boa", projetamos e instalamos mais de 600 sistemas de dessalinização OI em diferentes estados do Nordeste para produção de água de boa qualidade a partir de águas subterrâneas, visando o fornecimento de água potável para a população de municípios e pequenas comunidades a um custo médio de R\$ 0,40/m<sup>3</sup>. Estes vilarejos são conectados a rede de energia elétrica que alimenta a bomba de alta pressão bem como as bombas auxiliares dos sistemas de dessalinização OI. Porém, uma quantidade pequena dos vilarejos e fazendas isoladas nos países em desenvolvimento não é conectada ao sistema de distribuição de energia elétrica. Isso impede a instalação de sistemas de dessalinização OI para produção de água para consumo humano, o qual beneficiaria, significativamente as condições locais de vida. Para resolver este problema, avaliamos o uso de energia solar para alimentar sistemas de dessalinização OI de pequeno porte. A escolha dos parâmetros dos sistemas de dessalinização de pequeno porte é parcialmente relacionado ao programa político de eletrificação das zonas rurais. Existe um esforço importante para conectar a rede elétrica a maioria dos vilarejos e comunidades isoladas. Fazendo uso de painéis fotovoltaicos e considerando uma duração média de insolação de 6 horas por dia, a produção de água potável não deverá ultrapassar 300 litros por hora para um elemento de membrana de água salobra de 7,0 a 8,0 m<sup>2</sup> de área, considerando um gradiente de concentração de 1.000 mg/L a 3.000 mg/L.

Diferentes simuladores estão disponíveis para modelar a eficiência, as necessidades energéticas e, finalmente, o custo e as limitações de produção de água potável, utilizando sistemas de dessalinização OI de pequeno porte (França *et al.*, 2000). Os fabricantes de membranas fornecem agora várias ferramentas de simulação para projetar um sistema de dessalinização OI.

Para ser econômico, um sistema de dessalinização usando energia solar fotovoltaica requer um projeto do sistema perfeitamente eficiente em termos de consumo de energia, tendo em vista os custos relativamente altos de instalação dos painéis fotovoltaicos. Num trabalho realizado no Laboratório de Referência em Dessalinização, da UFCG, por Laborde *et al.* (2001), foi analisado e ilustrado como

os componentes de um sistema de dessalinização OI de pequeno porte afetam o consumo energético e podem ser otimizados. Há dois componentes críticos: a bomba de alta pressão, combinada com o motor elétrico, e a configuração do arranjo das membranas. Ambos afetam crucialmente o consumo de energia do sistema.

A relação potência energia fornecida ao sistema OI é utilizada para aplicar uma pressão suficiente no fluxo de alimentação. A pressão requerida e a relação potência energia correspondente dependem da concentração iônica da água de alimentação e da produção de água potável desejada. Ambas as quantidades são determinadas pelas características de permeação do material da membrana e da sua estrutura molecular, e podem ser numericamente obtidas resolvendo o adequado sistema de equações de difusão (Perry & Green, 1997).

Como resultados são obtidos o fluxo do permeado, a concentração iônica do permeado e a pressão necessária. Da pressão necessária para um determinado fluxo a potência e a energia podem ser calculadas. Há uma grande variedade de membranas de osmose inversa comercialmente disponíveis. As membranas OI são basicamente classificadas em membranas de alta e baixa pressão. A seleção da membrana depende da qualidade e da composição química da água de alimentação a ser tratada. De acordo com a classificação das águas, as membranas que operam sob baixa pressão normalmente se aplicam para águas brandas de TDS menor de 1.000 mg/L, para as membranas de águas salobras que apresentam um TDS entre 1.000 mg/L a 10.000 mg/L podem operar com pressão superior a 25 kgf/cm<sup>2</sup>, já para águas salinas onde o TDS se encontra entre 10.000 mg/L a 100.000 mg/L as pressões são elevadas chegando a atingir a 68 kgf/cm<sup>2</sup>, como é o caso da permeação da água do mar (Faure, 1991). Portanto, uma rejeição percentual de sais de quase 99 % é necessária para produzir água permeada. O limite de TDS na água para ser considerada dentro dos padrões de potabilidade é de 500 mg/L, de acordo com as normas da Organização Mundial da Saúde (*World Health Organization*, 1984).

Para projetar o sistema de OI e estimar corretamente o custo, é necessário um ajuste equilibrado entre a quantidade e a qualidade da água a ser processada. Os aspectos específicos do projeto de um sistema de dessalinização OI de pequeno porte, e algumas regras para conseguir as necessidades de potência e de energia foram estabelecidas. A análise do sistema indica possíveis caminhos para otimizar o consumo de energia. A configuração das membranas, a própria membrana e os sub-

sistemas de conversão de energia têm impactos significativos sobre o consumo de energia e os custos. A eficiência do sub-sistema de conversão de energia depende primeiramente das características do motor e da bomba de alta pressão. O projeto da configuração das membranas e dos próprios painéis fotovoltaicos pode também melhorar a eficiência do sistema.

Algumas simplificações foram feitas. Como foi estudado sistema de pequeno porte para uso com painéis fotovoltaicos, limitou-se, no modelo numérico, o estudo para um sistema de dessalinização de produção limitada,  $0,3 \text{ m}^3/\text{h}$ . Portanto, as perdas hidrodinâmicas nas tubulações e componentes do sistema hidráulico foram desprezadas. Como o cloreto de sódio é o mais comum dos sais encontrados nas águas salinas, ele foi usado como referência. Para águas sintéticas de alimentação, uma concentração média de NaCl de  $3.000 \text{ mg/L}$  foi considerada (Laborde *et al.*, 2001).

Um primeiro sistema de dessalinização via Oi usando painéis fotovoltaicos foi montado e testado (Filho, 2000). Neste sistema, para uma água de alimentação de  $3.000 \text{ mg/L}$ , foi obtido um consumo de energia de aproximadamente  $6,0 \text{ kWh/m}^3$ , valor considerado alto devido ao uso de motor CA, bem como um arranjo de três membranas em série.

Atualmente montamos um sistema experimental de pequeno porte para dessalinizar águas salobras via o processo de osmose inversa usando energia solar fotovoltaica para acionar um motobomba, de alta pressão, de corrente contínua. Esse sistema tem a capacidade de produzir até 250 litros de água potável por hora durante 6 horas de radiação solar, valor bastante significativo para atender pessoas que se encontram desprovidas de água para o consumo e energia elétrica. Considerando que a água gerada pelo processo, seja somente para beber, o protótipo poderá abastecer em torno de 300 pessoas por dia.

## **CAPÍTULO III**

---

### **3 EXPERIMENTAL**

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

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Referência em Dessalinização da Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente (LRD/SRH/MMA), da Universidade Federal de Campina Grande, e concentrou-se em estudar o desempenho de um sistema de dessalinização de pequeno porte, usando painéis fotovoltaicos como fonte de energia elétrica.

#### **3.1 SISTEMA DE OSMOSE INVERSA**

O sistema experimental ilustrado na Figura 3.1 é constituído de um sistema de dessalinização via osmose inversa acoplado a um sistema de geração de energia elétrica.

#### **3.2 SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE INVERSA**

O sistema de dessalinização é constituído por um único elemento de membrana de osmose inversa do tipo CPA2 4040 (composto de poliamida), da *Hydranautic Corporation*, cujas características específicas encontram-se na Tabela 3.1. Esta membrana é inserida num tubo de alta pressão ou permeador. Uma motobomba de alta pressão de 1/2 HP, 24V da *Pacific Scientific* alimenta a membrana a partir de um tanque de alimentação de capacidade volumétrica de 50

litros. Dois hidrômetros da *Tecnobrás*, dois manômetros da *ASTA*, um tanque de capacidade volumétrica de 50 litros para receber o concentrado e o permeado durante o processo, tubos e conexões de PVC, válvulas de retenção e mangueiras plásticas complementam o sistema hidráulico.

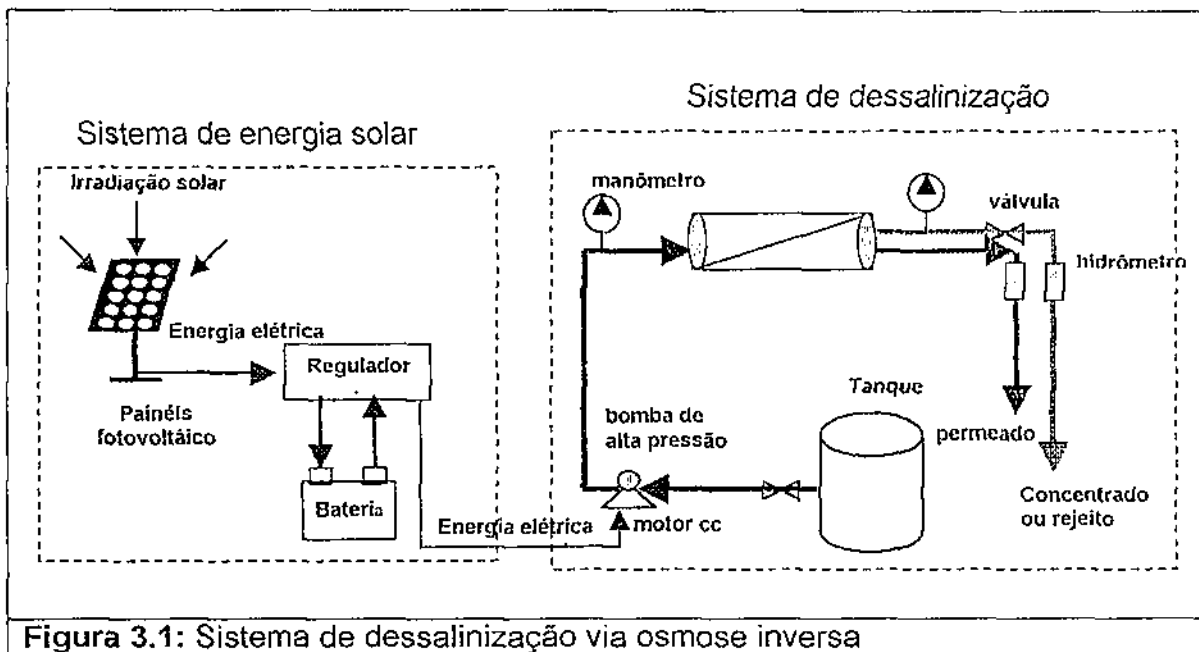


Figura 3.1: Sistema de dessalinização via osmose inversa

Tabela 3.1: Especificações da membrana de osmose inversa (Apêndice I)

Material	Compósito de poliamida
Tipo	4040 – CPA2
Configuração	Enrolado em espiral
Pressão máxima aplicada	42,18 kgf / cm <sup>2</sup>
Vazão máxima de alimentação	3,6 m <sup>3</sup> / h
Vazão nominal do permeado	7,9 m <sup>3</sup> / d
Temperatura máxima de operação	45°C
pH	3,0 – 10,0
Área nominal da membrana	7,89 m <sup>2</sup>
Tempo de vida	3 anos



### 3.3 SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A energia elétrica utilizada para o funcionamento da motobomba é proveniente do sistema de conversão de energia, o qual é constituído de painéis fotovoltaicos (modelo KC110-1 da *Kyocera Corporation* – Apêndice II), cujas especificações se encontram na Tabela 3.2; duas baterias de 12V (da *AJAXCLASSIC*) e um controlador/regulador de carga (da *Mastervolt* – 24V/100A). Dois multímetros digitais (da *Digital Multimeter*) permitem registrar a tensão e a corrente elétrica fornecidas pelo sistema de geração de energia elétrica.

Tabela 3.2: Especificações do painel fotovoltaico (Apêndice 2)

Potência nominal máxima de saída	110 W
Tensão nominal com circuito aberto	21,1 V
Tensão nominal máxima de saída	76,5 V
Corrente nominal máxima com curto circuito	7,25 A
Corrente nominal máxima de saída	6,67 A
Tensão máxima do sistema	600 V
Área de célula	100 cm <sup>2</sup>

### 3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Antes de iniciar o processo de dessalinização via osmose inversa usando painéis fotovoltaicos para águas salobras, o sistema foi testado com soluções de cloreto de sódio (P.A., Marca *VETEC*), com a finalidade de observar o comportamento do sistema. A partir disto, foi avaliado o desempenho do sistema com águas salobras de poços tubulares, conforme mostra as análises físico-químicas apresentadas no Apêndice III.

O processo de dessalinização foi efetuado de forma contínua para um dado volume de solução. As bateladas foram realizadas mantendo-se as concentrações constantes e variando as pressões. Durante o processo foram tomadas amostras na saída das correntes do concentrado e do permeado. Para as amostras das correntes do concentrado e do permeado, além da condutividade elétrica foram determinados seus potenciais hidrogeniônico com o auxílio de um pHmetro digital *Hanna*. Esses

dados foram tomados em intervalos de 2 a 5 minutos para cada leitura. Em função do volume tratado, as bateladas levaram aproximadamente de 8 a 20 minutos.

A capacidade de produção do permeado e concentrado foram medidas por meio de dois hidrômetros. Estes valores de fluxo permitem determinar a recuperação do sistema de acordo com a Equação 2.9. As pressões das correntes de alimentação e de saída (concentrado e permeado) são lidos com o auxílio de manômetros.

Para determinar a viabilidade do uso da energia fotovoltaica para o sistema de dessalinização a cada intervalo de 2 a 5 minutos foram tomadas variáveis de medidas relativos à corrente elétrica, tensão elétrica, pressão aplicada ao sistema, vazão do permeado e vazão do concentrado. Com esses dados, podemos calcular a potência elétrica (watt), o consumo de energia ( $\text{kWh/m}^3$ ) e a recuperação do sistema (%) a partir das Equações 2.15, 2.14 e 2.9, respectivamente.

O desempenho do sistema foi avaliado para uma solução de cloreto de sódio com concentração de 1.000 mg/L a 4.000 mg/L e com águas de poços tubulares com concentração de aproximadamente 2.000 mg/L. O sistema operou com pressões de  $4,0 \text{ kgf/cm}^2$  a  $12,0 \text{ kgf/cm}^2$ .

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

### 3.5 PROCESSO DE LIMPEZA

Para proteger e prolongar a vida útil da membrana foram realizadas limpezas químicas. A limpeza foi feita com uma solução de ácido cítrico ( $0,27\text{g/L}$ ), de  $\text{pH} \cong 3,0$ . Durante os primeiros cinco minutos, a solução de ácido cítrico foi descartada durante a limpeza. Em seguida, o elemento de membrana ficou embebido na solução durante 2 horas. Descartou-se novamente a solução, e durante um intervalo de tempo de 2 horas lavou-se o elemento de membrana com reciclo constante da solução. Após a solução de ácido cítrico foi efetuada uma rinsagem com água deionizada, com o objetivo de retirar a solução ácida do elemento de membrana.

## CAPÍTULO IV

---

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são avaliados e discutidos os resultados obtidos na fase experimental deste trabalho. Para análise dos resultados são apresentados os gráficos mais representativos do comportamento da variação da tensão, corrente e potência elétrica em função da pressão, vazão do permeado e concentrado com a pressão, recuperação do sistema com a pressão, consumo de energia versus a pressão, potencial hidrogeniônico e a condutividade elétrica em função do tempo.

Este trabalho de pesquisa foi dividido em 2 etapas:

A primeira etapa foi avaliado o desempenho do sistema para uma solução de cloreto de sódio de concentração variando entre 1.000 mg/L a 4.000 mg/L. Para cada concentração o sistema operou a pressão de 4,0 kgf/cm<sup>2</sup> a 10,0 kgf/cm<sup>2</sup>. Esses resultados serviram de base para a segunda etapa.

Na segunda etapa o sistema foi avaliado para duas águas de poços tubulares:

Água Tipo 1 (água salobra do poço de Nova Floresta – PB, com um TDS de 2149,36 mg/L).

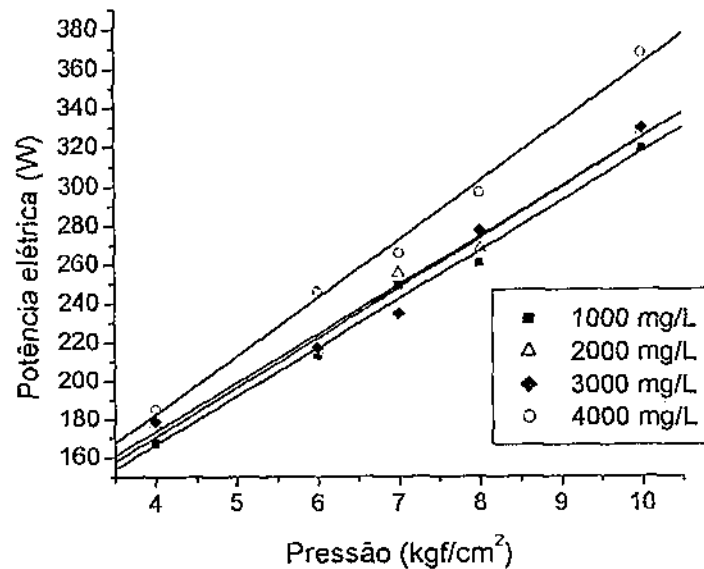
Água Tipo 2 (água salobra do poço de Nova Floresta – PB misturada com água tratada da torneira – PB com TDS de 1959,62 mg/L).

#### 4.1 COMPORTAMENTO DA POTÊNCIA ELÉTRICA COM A PRESSÃO

Na Figura 4.1 está representado o comportamento da potência elétrica em função da pressão para a solução de cloreto de sódio. Observa-se que a potência elétrica do motor e da bomba de alta pressão aumenta linearmente com a pressão de operação. Isto se deve ao fato de que a motobomba depende da pressão de

descarga e da 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. Verifica-se, também, que para concentrações elevadas a potência elétrica é maior, devido necessitar de uma alta pressão para que ocorra a permeação da água bruta durante o processo de osmose inversa ocorra. Resultados semelhantes foram encontrados por Filho (2000).

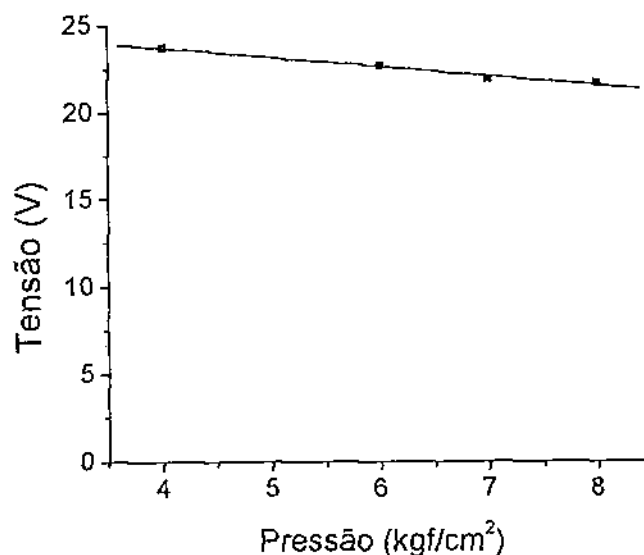
A Figura 4.1 mostra que a solução de 1.000mg/L, para uma pressão de 8 kgf/cm<sup>2</sup>, necessita-se de uma potência elétrica aproximadamente igual a 260 W; já para uma alimentação de 4.000mg/L, para a pressão de 8 kgf/cm<sup>2</sup>, a potência elétrica requerida é de 300 W. Portanto, verifica-se que a potência elétrica varia em função da pressão do sistema e do TDS (total de sólidos dissolvidos). Isso significa que o sistema pode operar entre ambas concentrações sob o efeito de um dado potencial elétrico, onde o parâmetro limitante é a taxa de permeação, ou seja, a recuperação do sistema dependerá da concentração da solução. Comportamento semelhante foi observado por Laborde et al (2001).



**Figura 4.1:** Comportamento da potência elétrica com a pressão do sistema sob as seguintes condições: soluções de cloreto de sódio com concentração variando de 1.000 mg/L a 4.000 mg/L.

Nas Figuras 4.2 a 4.7 estão representados os comportamentos da tensão corrente e potência elétrica em função da pressão de operação do sistema, para água de poços tubulares.

Observa-se nas Figuras 4.2 e 4.5 que a tensão elétrica varia inversamente com a pressão. À medida que a pressão aumenta a tensão elétrica diminui. Observa-se o contrário nas Figuras 4.3 e 4.6, na qual a medida que a pressão aumenta a corrente elétrica também aumenta. Como a potência elétrica é função da tensão e da corrente elétrica (Eq. 2.15), e a tensão é superior à corrente, verifica-se nas Figuras 4.4 e 4.7, na qual temos a potência elétrica em função da pressão, que a potência elétrica aumenta linearmente com a pressão de operação. Este mesmo comportamento foi verificado com a solução de cloreto de sódio e também foi verificado por Filho (2000). Na Figura 4.4 verifica-se que para o sistema funcionar a uma pressão de  $8 \text{ kgf/cm}^2$  necessita-se de uma potência elétrica de 283 W para a água Tipo 1. Já na Figura 4.7, para a mesma pressão, a potência elétrica é de 300 W. Não há grandes diferenças entre as potências, devido as águas apresentarem características físico-química muito próximas uma da outra. As tabelas referentes às figuras encontram-se no Apêndice IV.



**Figura 4.2:** Comportamento da tensão elétrica com a pressão do sistema para a água Tipo1.

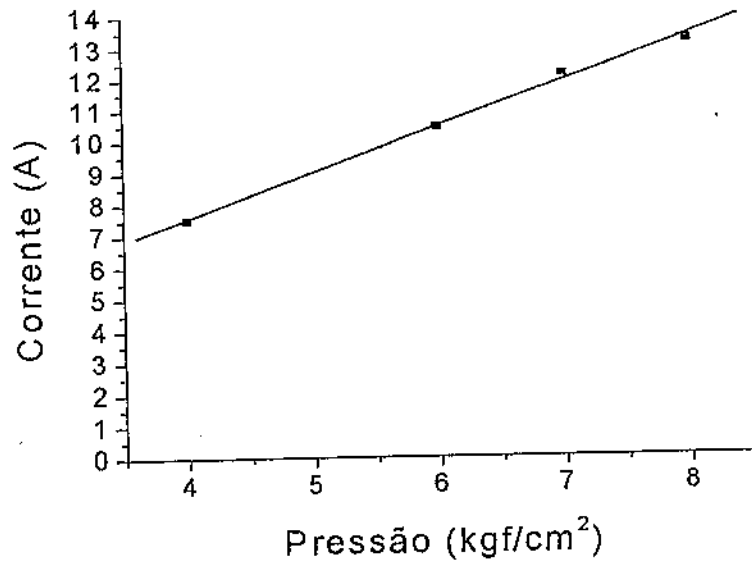


Figura 4.3: Comportamento da tensão elétrica com a pressão do sistema para a água Tipo1.

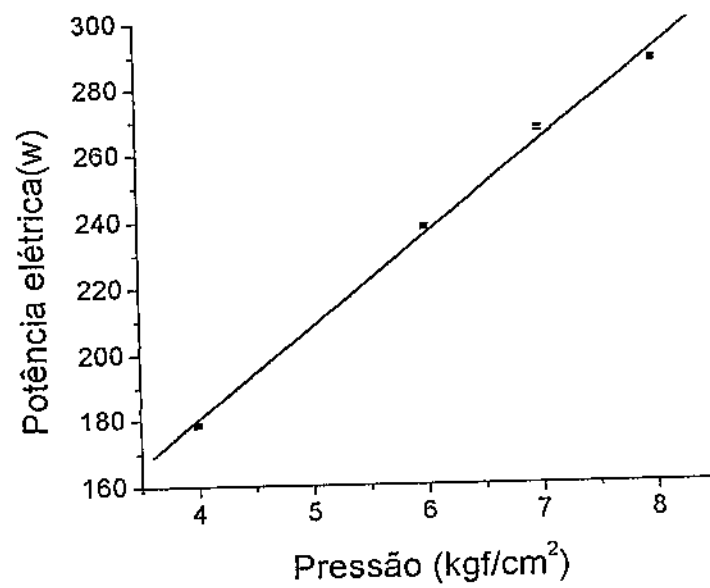


Figura 4.4: Comportamento da potência elétrica com a pressão do sistema para a água Tipo1.

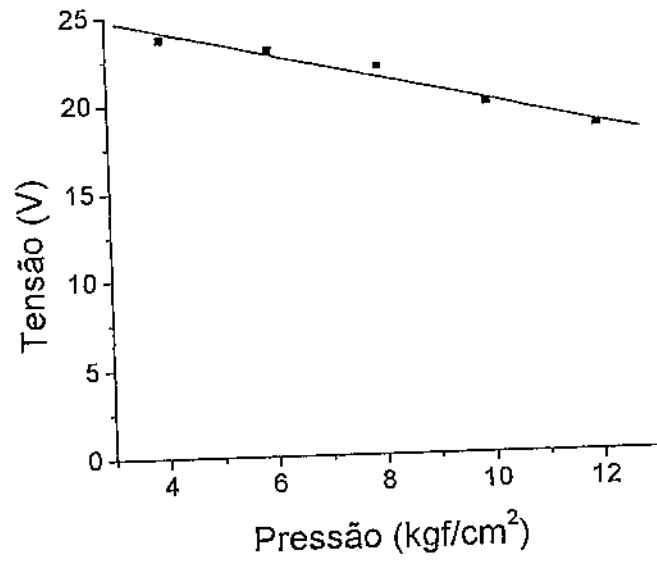


Figura 4.5: Comportamento da tensão elétrica com a pressão do sistema para a água Tipo 2.

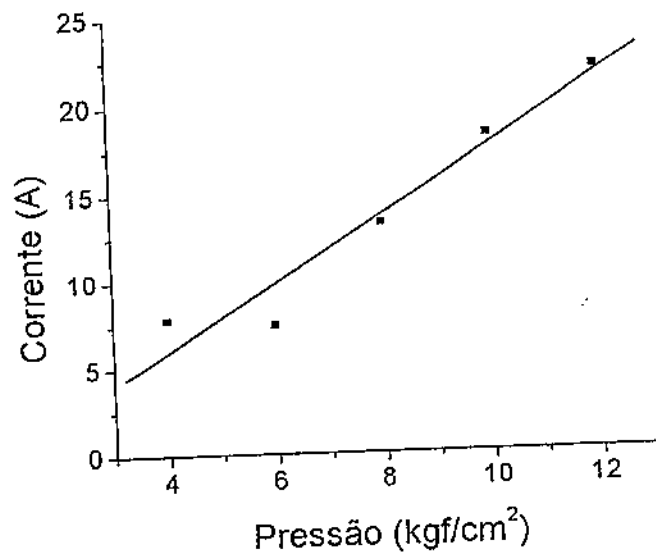
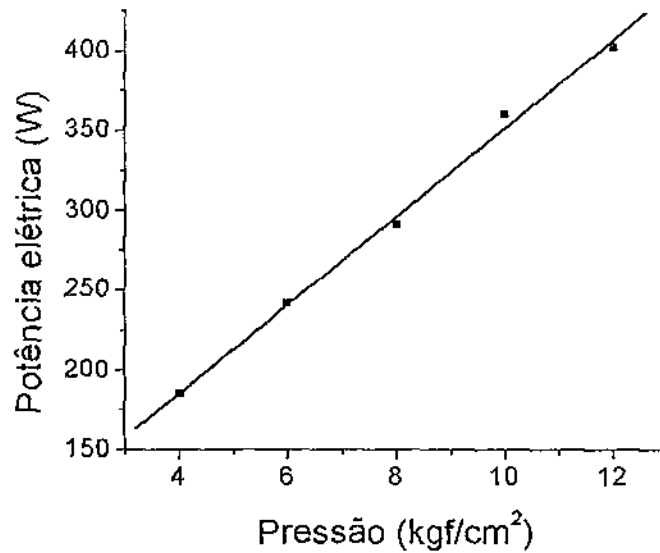


Figura 4.6: Comportamento da tensão elétrica com a pressão do sistema para a água Tipo 2.



**Figura 4.7:** Comportamento da potência elétrica com a pressão do sistema para a água Tipo 2.

#### 4.2 COMPORTAMENTO DA VAZÃO DO PERMEADO E DO CONCENTRADO COM A PRESSÃO

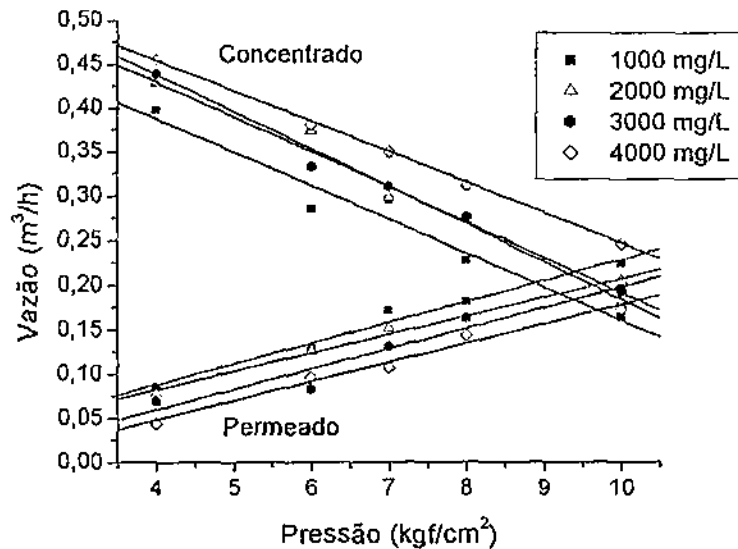
A Figura 4.8 apresenta o comportamento das vazões do permeado e do concentrado em função da pressão para a solução de cloreto de sódio. Observa-se que a medida que a pressão aumenta a vazão do permeado cresce e a vazão do concentrado diminui, ambos variam proporcionalmente. Verifica-se o mesmo comportamento para as diferentes concentrações (1.000 mg/L a 4.000 mg/L).

Para 1000 mg/L a pressão aproximadamente igual a 8,7 kgf/cm<sup>2</sup> a recuperação do sistema foi 50%. Já para as alimentações de 2000 mg/L e 3000 mg/L a recuperação do sistema alcança 50% aproximadamente entre as pressões 9,5 kgf/cm<sup>2</sup> e 10 kgf/cm<sup>2</sup>, respectivamente. Obviamente para alcançar estes valores há a necessidade de um maior consumo de energia. A produção de um sistema depende do número de elemento de membranas, tipo de água e o gradiente de pressão aplicado, o qual não deve ultrapassar as condições limites expostos pelo fabricante.

Para as pressões elevadas, acima das pressões de projetos, pode ocorrer efeitos de compactação e precipitação de sais na membrana, aumentando-se, assim, a concentração de polarização e conseqüentemente diminuição da produção de permeado. As pressões de projetos são obtidas a partir da concentração das



espécies presentes na água bruta em função da pressão osmótica, conforme mencionado no capítulo 2, item 2.2.



**Figura 4.8:** Vazão volumétrica ( $m^3/h$ ) versus pressão ( $kgf/cm^2$ ) para concentração de alimentação de 1.000 mg/L, 2.000 mg/L, 3.000 mg/L e 4.000 mg/L.

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam o comportamento das vazões do permeado e do concentrado em função da pressão para água de poços tubulares. Verifica-se que os resultados obtidos para os dois tipos de águas estão confirmando o mesmo comportamento das soluções de cloreto de sódio.

Na Figura 4.9 verifica-se que a maior produção de água permeada é obtida na pressão de  $8\text{ kgf/cm}^2$ , sendo aproximadamente de  $156\text{ L/h}$ . Enquanto que a água tipo 2 a maior produção ocorreu para a pressão de  $12\text{ kgf/cm}^2$ , sendo aproximadamente de  $200\text{ L/h}$ .

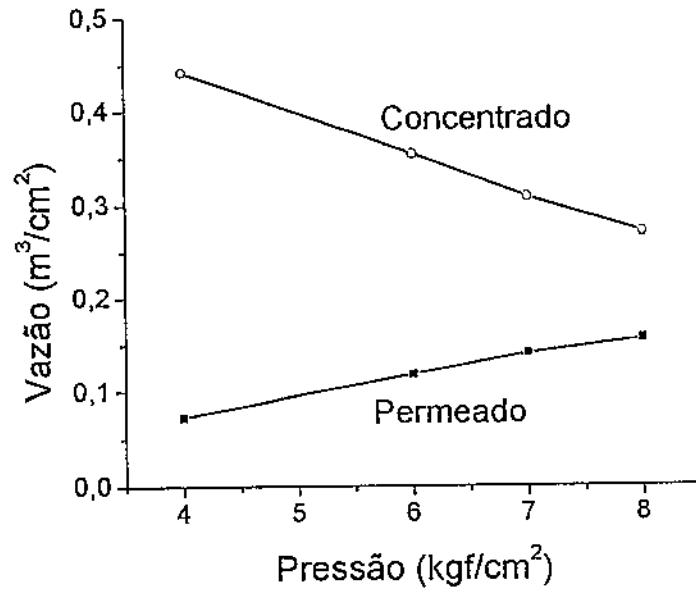


Figura 4.9: Comportamento da vazão com a pressão do sistema para a água Tipo1.

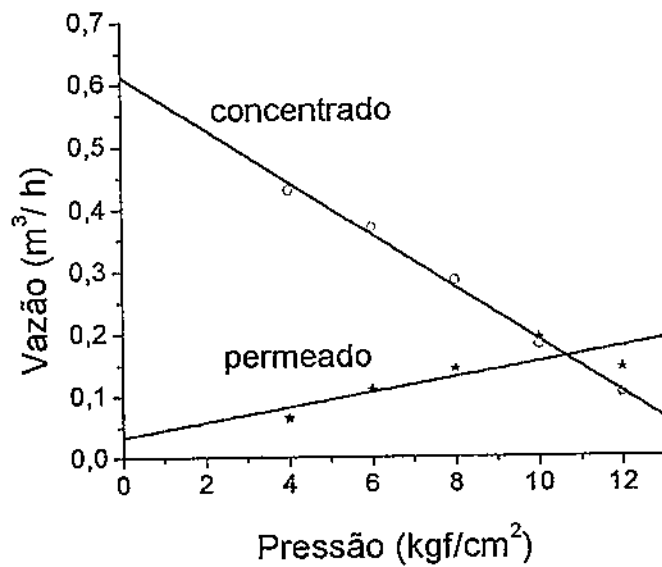


Figura 4.10: Comportamento da vazão com a pressão do sistema para a água Tipo2.

### 4.3 COMPORTAMENTO DA RECUPERAÇÃO COM A PRESSÃO

Na Figura 4.11 é apresentada o perfil da recuperação do sistema em função da pressão de operação. Observa-se um aumento linear da recuperação em função da pressão. Isto se deve ao fato de que ao aumentar a pressão, mais água permea a área efetiva da membrana. Este comportamento pode ser observado combinando as Equações 2.2 e 2.9; tem-se:

$$r_i = K_w * A * (\Delta P - \Delta \pi) / Q_a \quad 4.1$$

Onde:  $A$  - área de permeação da membrana

$r_i$  - recuperação

$K_w$  - coeficiente de transferência de massa do solvente;

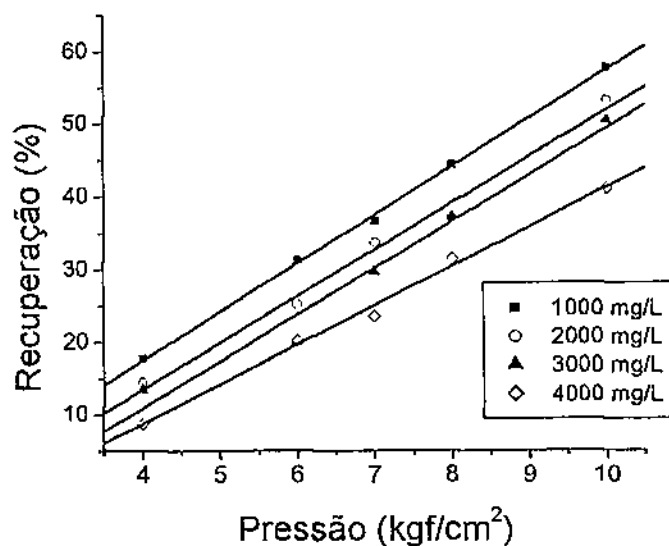
$\Delta P$  - gradiente de pressão aplicada;

$\Delta \pi$  - gradiente de pressão osmótica

$Q_a$  - vazão da alimentação

Sendo  $A$  e  $Q_a$  constantes e  $K_w$  e  $\Delta \pi$  aproximadamente constantes durante o processo, a recuperação se apresenta como uma função linear da pressão de alimentação, como no caso da vazão do permeado.

Com relação a concentração de alimentação, observa-se que quanto menor a concentração maior é a recuperação do sistema.



**Figura 4.11:** Comportamento da recuperação total do sistema com a pressão para soluções de concentrações variando de 1.000 mg/L a 4.000 mg/L.

O efeito da recuperação do sistema está relacionado com vários parâmetros como: condutividade elétrica da água de alimentação, pressão, área efetiva de transferência de massa e tipo de membrana utilizada. Em alguns casos a recuperação depende do tipo do pré-tratamento aplicado à água bruta. Podemos citar águas de baixa condutividade elétrica, mas rica em carbonatos, bicarbonatos ou de alta dureza que podem incrustar os elementos de membrana em curto espaço de tempo.

Nas Figuras 4.12 e 4.13 são apresentados os perfis da recuperação do sistema em função da pressão de operação para águas de poços tubulares.

Para a pressão de  $8 \text{ kgf/cm}^2$  na Figura 4.12, a recuperação obtida é de 37,5%. Já para a mesma pressão na Figura 4.13, a recuperação é de 35%. Isto mostra mais uma vez que devido a concentração de sais presente na água de alimentação, há diferença na recuperação do sistema.

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

Comparando a taxa de recuperação em função da pressão e do TDS nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 observa-se que os resultados com água de poços tubulares estão de acordo com os resultados obtidos com a solução de cloreto de sódio de 2000 mg/L. Portanto suas taxas de recuperação para as três figuras foram de 37%; 37,5% e 35%, respectivamente.

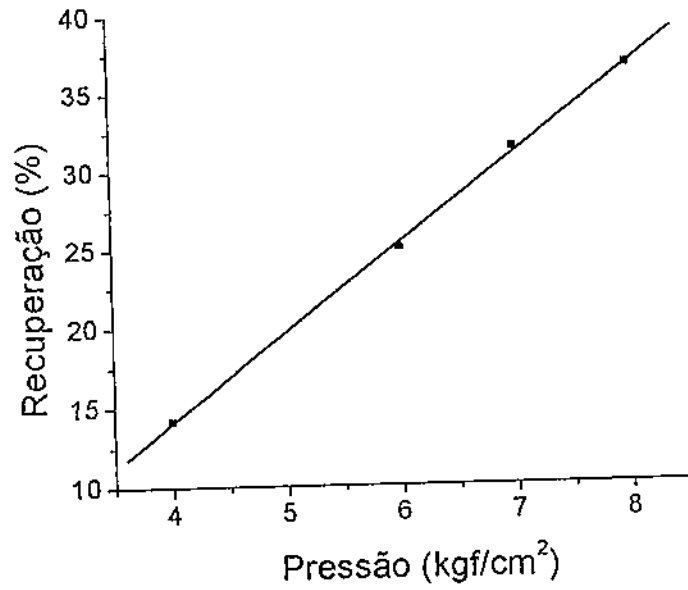


Figura 4.12: Comportamento da recuperação do sistema com a pressão para a água Tipo 1.

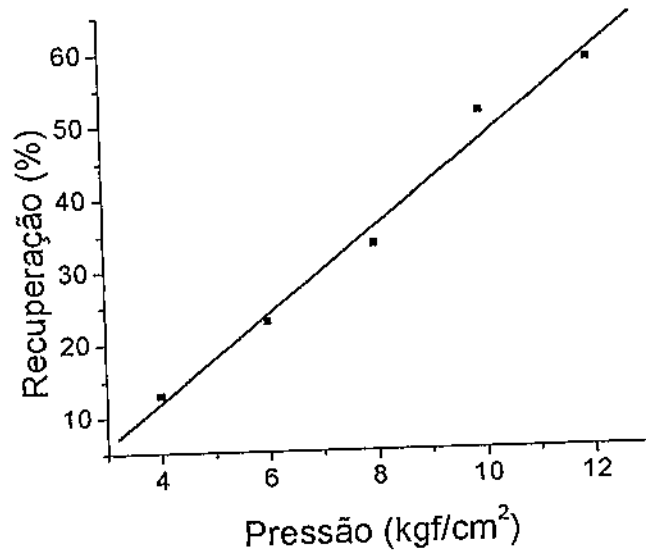


Figura 4.13: Comportamento da recuperação do sistema com a pressão para a água Tipo 2.

#### 4.4 COMPORTAMENTO DO CONSUMO DE ENERGIA COM A PRESSÃO

Na Figura 4.14 é apresentado o consumo de energia, por metro cúbico de água permeada, em função da pressão para a solução de cloreto de sódio.

O consumo de energia durante o processo apresentou um comportamento decrescente em relação à pressão de operação. O consumo de energia se encontra relacionado diretamente com potência elétrica requerida para um dado tipo de membrana e água. Além destes, mesmo não sendo parte deste trabalho, o recalque da água bruta para o tanque de alimentação, pré e pós-tratamentos e outros, são parâmetros que devem ser levados em conta para o cálculo do consumo de energia.

A Figura 4.14 mostra que o consumo de energia diminuiu à medida que a pressão de operação aumentou para uma dada concentração de sais dissolvidos. Ou seja, quanto maior a concentração de sais presente na solução o consumo de energia aumenta para uma dada produção de água permeada.

Observando o comportamento da variação do consumo de energia nota-se que entre as pressões de  $8\text{kgf/cm}^2$  e  $10\text{kgf/cm}^2$  seus consumos ficaram dentro da faixa do consumo de energia de  $2,5\text{kWh/m}^3$  para a dessalinização de águas salobras via osmose inversa (Amjad, 1993).

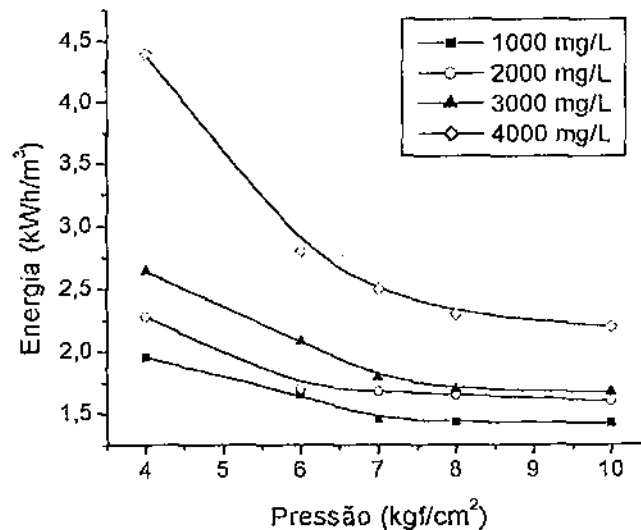
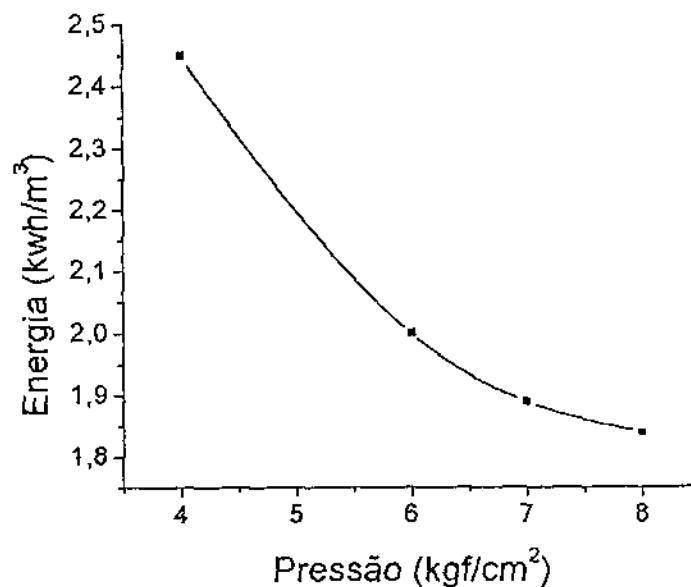


Figura 4.14: Variação da energia consumida por metro cúbico de água permeada com a pressão do sistema, para concentrações variando de 1.000 mg/L a 4.000 mg/L.

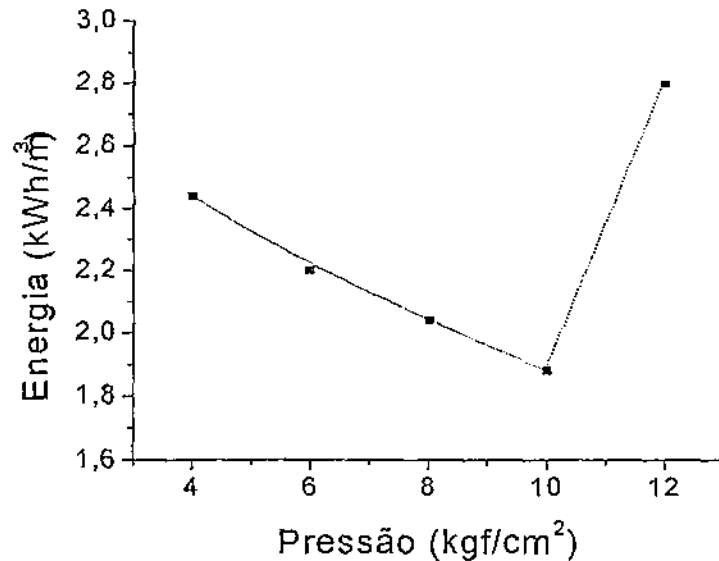
Nas Figuras 4.15 e 4.16 são apresentados os consumos de energia, por metro cúbico de água permeada, em função da pressão para água de poços tubulares.

Na Figura 4.15 mostra um comportamento similar a Figura 4.14, a qual apresenta para  $8,0 \text{ kgf/cm}^2$  um consumo de  $1,84 \text{ kWh/m}^3$  para água Tipo 1, enquanto que o consumo aumenta para  $2,0 \text{ kWh/m}^3$  para água Tipo 2 na Figura 4.16. Esse aumento caracteriza a presença de mais sais dissolvidos na água Tipo 2. Todavia além de se encontrar dentro da faixa de consumo de energia, seus consumos se encontram muito próximos. Em função do comportamento das curvas observa-se que o dessalinizador apresenta uma faixa de operação entre  $8,0 \text{ kgf/cm}^2$  e  $10,0 \text{ kgf/cm}^2$  para um menor consumo de energia.

Foi realizado um experimento a pressão de  $12 \text{ kgf/cm}^2$  para a água Tipo2 onde ocorreu um aumento significativo no consumo de energia, sendo elevado para  $2,9 \text{ kWh/m}^3$ . Este fato pode ter acontecido devido a potência elétrica necessária para esta pressão ser superior à potência elétrica do motobomba, que é de  $1/2 \text{ HP}$ . Com isso a motobomba está sendo forçada a trabalhar com uma potência de  $8,0 \%$  acima da potência do motobomba, o que levou o consumo de energia aumentar.



**Figura 4.15:** Variação da energia consumida por metro cúbico de água permeada com a pressão do sistema para a água Tipo 1.



**Figura 4.16:** Variação da energia consumida por metro cúbico de água permeada com a pressão do sistema para a água Tipo 2.

#### 4.5 COMPORTAMENTO DO POTENCIAL HIDROGENIÔNICO COM O TEMPO

Nas figuras 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20 são apresentados os efeitos do pH em função da pressão de operação para as seguintes concentrações: 1.000 mg/L, 2.000 mg/L, 3.000 mg/L e 4.000 mg/L. Observa-se que os valores do pH do permeado para todos os casos estudados foram inferiores ao do concentrado. Esse fato ocorre devido à extração de sais dissolvidos na solução de alimentação.

Com relação à concentração e com o aumento da pressão o pH do permeado diminui e o pH do concentrado aumenta. Verifica-se também, que pH não mostrou variação significativa com o aumento da concentração, provavelmente devido à solução de alimentação ser formada apenas por cloreto de sódio e água. Esse mesmo fato já foi observado por Filho (2000) e Silveira (1999).

A variação do pH durante o processo de osmose inversa está diretamente relacionada com o gradiente de pressão que atua no elemento de membrana, a porosidade da membrana, sua área disponível e conseqüentemente a concentração de sais na solução. Portanto, a tendência do pH do permeado diminuir durante a osmose inversa significa o quanto de sais foi extraído da água bruta para a corrente



do concentrado, deixando o permeado carente em sais minerais. Logo, quanto maior a pressão de operação o pH do permeado tende a diminuir, conforme pode-se observar nas Figuras 4.21 e 4.22, para as água Tipo e 1 e 2. O pH da água é um significativo importante para o pré e pós tratamento da água, antes e após a dessalinização. Em muito dos casos, dependendo do valor do pH, há necessidade de adições de ácido ou base antes ou após a dessalinização.

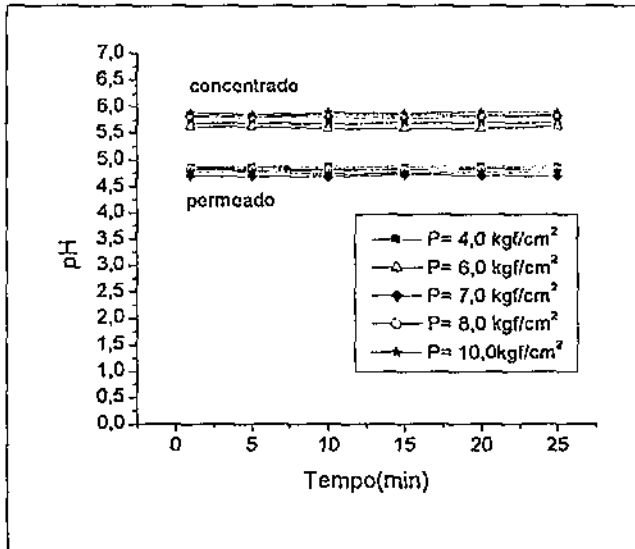


Figura 4.17: Variação do potencial hidrogeniônico do concentrado e permeado da solução de cloreto de sódio de 1.000 mg/L.

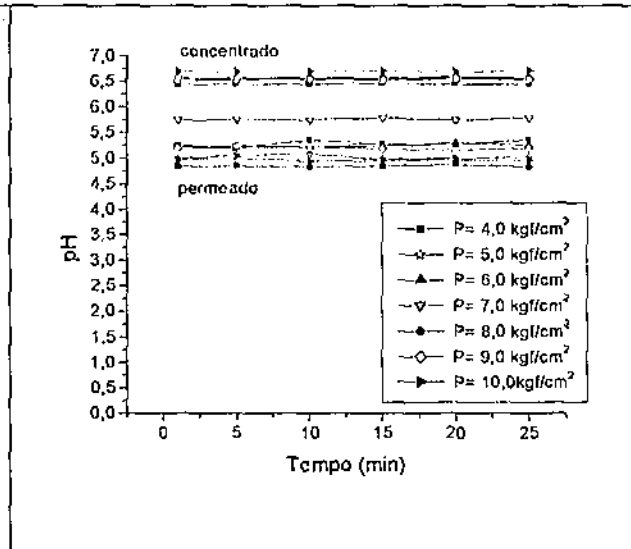


Figura 4.18: Variação do potencial hidrogeniônico do concentrado e permeado da solução de cloreto de sódio de 2.000 mg/L.

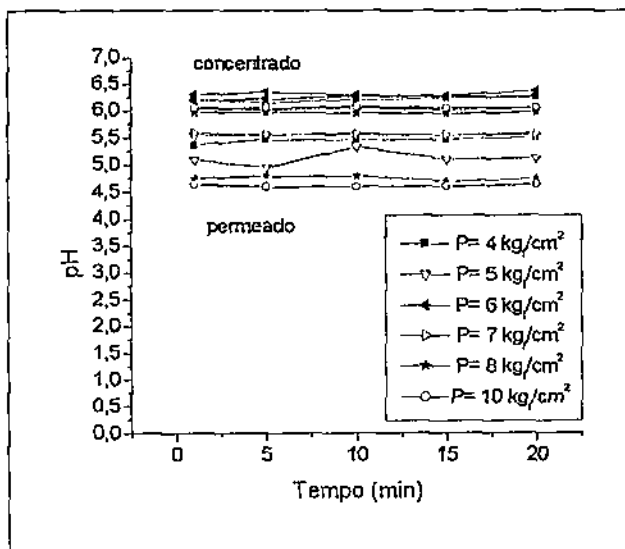


Figura 4.19: Variação do potencial hidrogeniônico do concentrado e permeado da solução de cloreto de sódio de 3.000 mg/L.

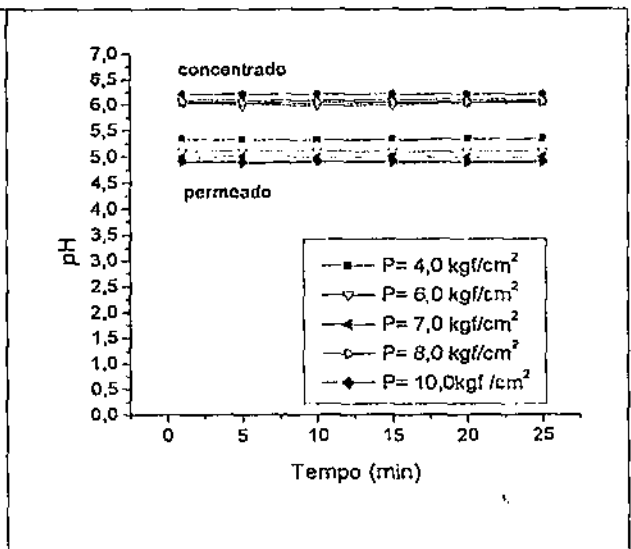


Figura 4.20: Variação do potencial hidrogeniônico do concentrado e permeado da solução de cloreto de sódio de 4.000 mg/L.

Nas figuras 4.21 e 4.22 são apresentados os efeitos do pH em função da pressão de operação para as águas Tipo 1 e Tipo 2.

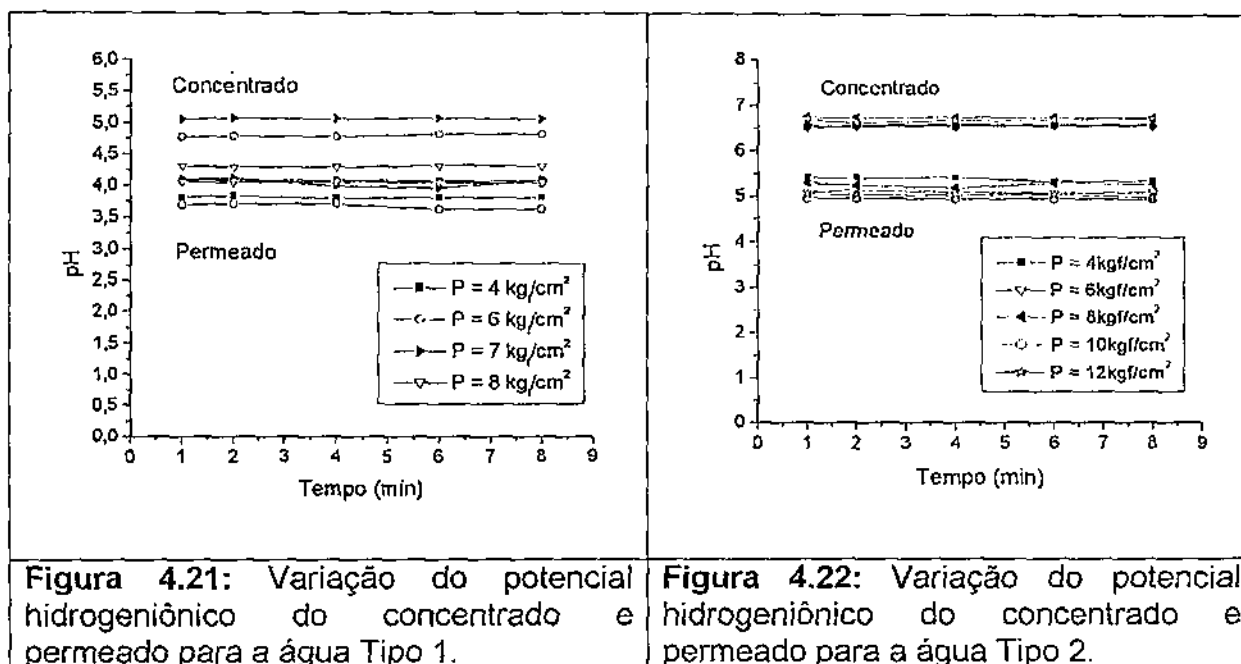


Figura 4.21: Variação do potencial hidrogeniônico do concentrado e permeado para a água Tipo 1.

Figura 4.22: Variação do potencial hidrogeniônico do concentrado e permeado para a água Tipo 2.

#### 4.6 COMPORTAMENTO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA COM O TEMPO

Nas Figuras 4.23 a 4.26, temos a variação da condutividade elétrica do permeado e do concentrado em função do tempo, para as soluções de cloreto de sódio, com concentrações de 1.000 mg/L a 4.000 mg/L.

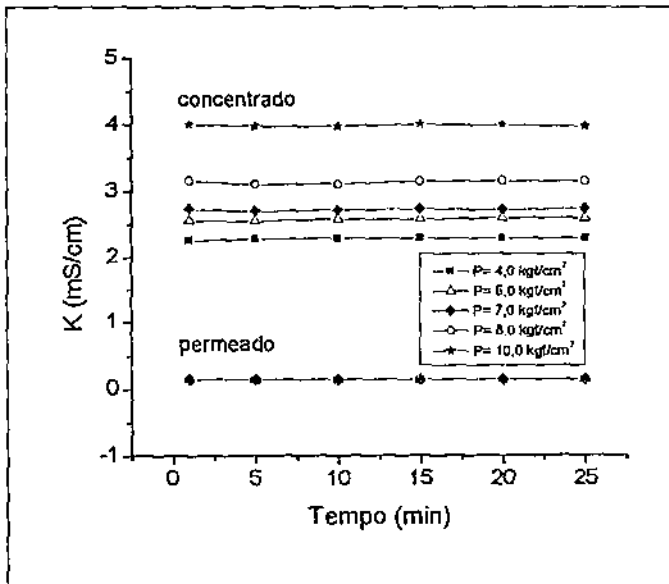
Observa-se nas figuras citadas, que seus comportamentos são semelhantes para as pressões analisadas. Para todos os casos a condutividade elétrica do concentrado é superior a do permeado, significando que os sais presentes na alimentação não estão atravessando a membrana de osmose inversa, ficando retidos na corrente de concentrado.

Nota-se que a condutividade elétrica do concentrado aumenta à medida que a pressão de operação também aumenta, enquanto que a do permeado permanece constante praticamente para todos os casos estudados. O fato dos valores da condutividade elétrica do permeado se encontrarem muito próximo é devido à taxa de permeação e a qualidade do permeado, ou seja, a taxa de permeação depende do valor da pressão osmótica oferecida pela solução e a qualidade da água depende da taxa de rejeição de sais que a membrana pode oferecer. Os elementos de

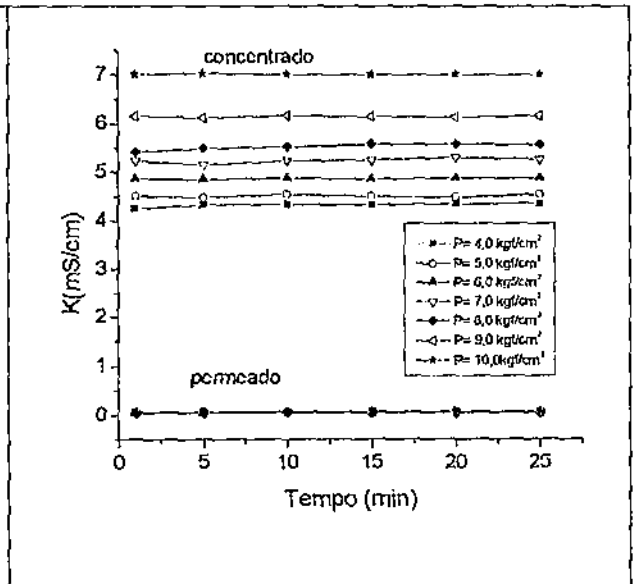
membranas do tipo BW (água salobra) oferecem uma taxa de rejeição superior a 95%, conforme se pode observar no boletim técnico (Apêndice I). Isso mostra que o efeito da pressão é para produzir mais água durante o processo, mas a qualidade do permeado permanece praticamente a mesma. Quando a condutividade elétrica do permeado tende a aumentar, significa que as membranas se encontram sob o processo de incrustações de sais.

O comportamento da condutividade elétrica para águas do Tipo 1 e 2, conforme mostram as Figuras 4.27 e 4.28 não foram diferentes dos apresentados pelas soluções de cloreto de sódio. Todavia pode-se observar o fato da água do Tipo 1 apresentar uma concentração superior a água do Tipo 2, a condutividade elétrica do permeado se destaca mais mostrando o desempenho do elemento de membrana em relação a pressão aplicada.

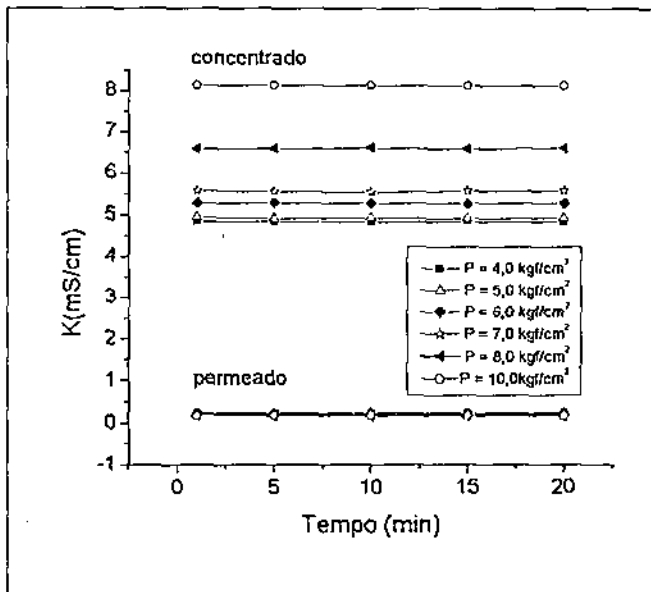
Nos processos de osmose inversa tanto a variação do pH e a condutividade são um dos parâmetros de medidas indispensáveis para o monitoramento do sistema e a qualidade da água em termos físico-químico.



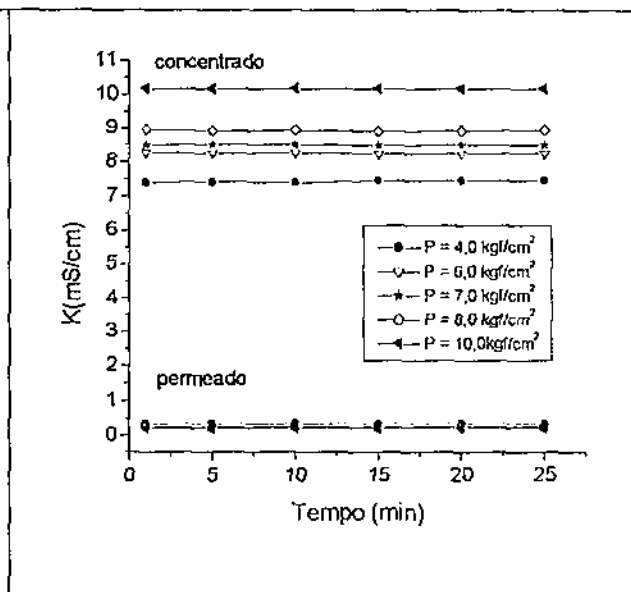
**Figura 4.23:** Variação da condutividade elétrica do permeado e do concentrado para uma solução de cloreto de sódio de concentração de 1000 mg/L.



**Figura 4.24:** Variação da condutividade elétrica do permeado e do concentrado para uma solução de cloreto de sódio de concentração de 2000 mg/L.

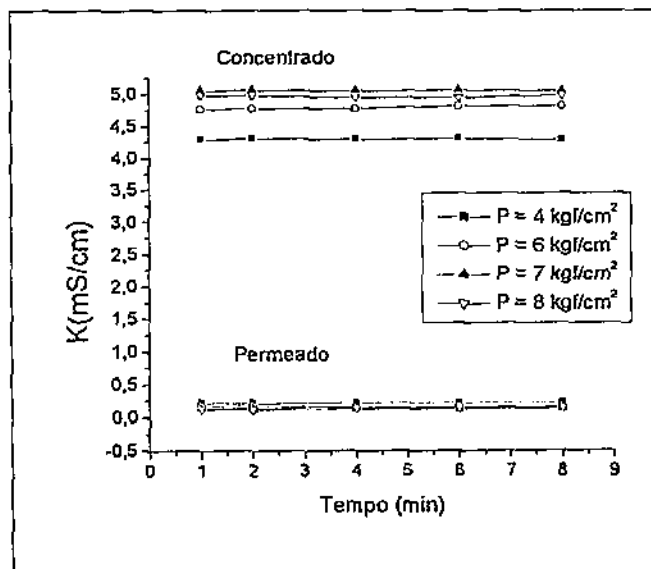


**Figura 4.25:** Variação da condutividade elétrica do permeado e do concentrado para uma solução de cloreto de sódio de concentração de 3.000 mg/L.

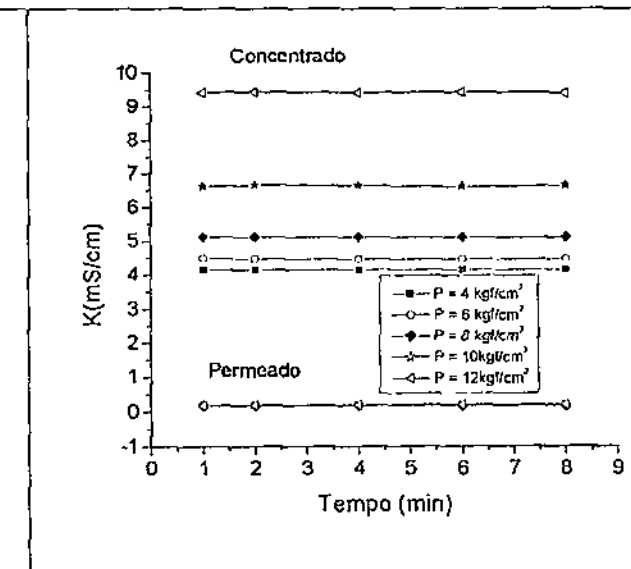


**Figura 4.26:** Variação da condutividade elétrica do permeado e do concentrado para uma solução de cloreto de sódio de concentração de 4.000 mg/L.

Nas Figuras 4.27 e 4.28, respectivamente, temos a variação da condutividade elétrica do produto e do concentrado em função do tempo, para água de poços tubulares.



**Figura 4.27:** Variação da condutividade elétrica do concentrado e permeado para a água Tipo 1.



**Figura 4.28:** Variação da condutividade elétrica do concentrado e permeado para a água Tipo 2.

#### 4.7 CUSTO ESTIMATIVO

Neste tópico é proposto uma estimativa de custo para um sistema de dessalinização via osmose inversa usando painéis fotovoltaico para uma água de 2.000 mg/L de concentração. Este custo depende de uma série de fatores, como: números e custo de painéis, baterias, controlador de carga, número de horas de irradiação solar por dia, etc.

O custo estimativo foi calculado para 20 anos, baseado na vida útil dos painéis fotovoltaicos. As membranas e baterias são trocadas a cada 5 anos.

Sistema	US\$
Dessalinizador	900,00
Painéis fotovoltaicos (6 unidades) e acessórios	3.940,00
Instalação (10% do valor do Dessalinizador + painéis)	(10% . 900,00 . 3940,00) 484,00
Manutenção e operação (2% ao ano)	(2% . 4840,00 . 20 anos) 1.936,00
Troca de membrana (3 vezes)	750,00
Troca de baterias (3 vezes)	120,00
Total	8.130,00

Considerando a produção média de 0,2 m<sup>3</sup>/h a 10 kgf/cm<sup>2</sup> para uma concentração de 2.000 mg/L de sais dissolvidos, o custo da água dessalinizada pode ser calculado da seguinte forma:

O sistema funcionará 300 dias / ano, onde 1 dia é igual a 6 horas de operação e 1 ano é de 10 meses, temos que:

Produção diária:

$$6 \text{ h} \times 0,2 \text{ m}^3/\text{h} = 1,2 \text{ m}^3/\text{d}$$

Custo diário:

$$\frac{\text{US\$ } 8.130,00}{20 \text{ anos}} \times \frac{1 \text{ ano}}{300 \text{ d}} = \text{US\$ } 1,355/\text{dia}$$

Isso implica que o custo da produção de água é de US\$ 1,13/m<sup>3</sup>

Esse valor encontrado se enquadra abaixo do custo de água dessalinizada a partir da água do mar (Childs *et al*, 1999), o qual é um fator estimulante para o desenvolvimento de novos projetos que venha produzir mais água a baixo custo.

#### 4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das análises do sistema estudado, o uso de energia solar para operar dessalinizadores de pequeno porte parece tecnicamente e economicamente atrativo para atender pequenas comunidades desprovidas de energia elétrica e água de boa qualidade.

Uma vantagem importante dos dessalinizadores OI é a excelente qualidade da água produzida. Não somente os íons, mas também todas substâncias biológicas são removidas, incluindo o conteúdo coloidal. Tecnicamente, os dessalinizadores OI solares têm uma configuração padrão onde os componentes mecânicos são selecionados para terem um consumo elétrico mínimo. A vazão do permeado é definido pela seleção das membranas OI, os pré-filtros, e o número de permeadores.

A bomba de alta pressão representa um dos componentes crítico. A sua performance mais ou menos determina a eficiência do dessalinizador. As pressões necessárias para dessalinizar via osmose inversa são na faixa de 10 kgf/cm<sup>2</sup> para águas salinas, mas podem ser tão altas como 75 kgf/cm<sup>2</sup> para processar água do mar. A bomba de alta pressão deve preferencialmente ser operada com um motor CC, diretamente conectado aos painéis fotovoltaicos via um arranjo de baterias. Um sistema CA aumenta as perdas e o custo do capital pela necessidade de um conversor CA/CC (Filho, 2000). Uma rápida estimativa mostra que os painéis fotovoltaicos representam quase 60% do custo de instalação de um dessalinizador solar de pequeno porte. Este valor pode aumentar para dessalinização de água do mar.

Um funcionamento ótimo do dessalinizador solar necessita também de um controle e ajuste automático da pressão. Isso pode ser realizado pela instalação de uma válvula especial, que permita um fluxo constante, no caso de uma flutuação da potencia elétrica disponível.

Uma operação controlada do sistema permite aumentar o tempo de vida útil, visto que o material polimérico das membranas OI aparece mecanicamente suscetível. Cargas mecânicas altas e freqüentes sobre os permeadores, induzindo mudanças rápidas da pressão pode provocar uma deformação da membrana, com uma subsequente perda de função. As baterias são então importantes para manter as condições estáveis.

A energia solar, conseqüentemente, é considerada como uma ótima solução para fornecer energia para máquina que opera um pequeno sistema de osmose inversa sob certas condições de água de poço.

Vários constituintes químicos e espécies iônicas da água de alimentação afetam severamente e deterioram a operação da membrana. A exemplo o cloro livre causa danos ao material polimérico. Óxido de metal ( $\text{Fe}^{++}$ ,  $\text{Mn}^{++}$ ) causa *fouling* e formação de depósitos na superfície da membrana, logo o fluxo do permeado é reduzido. Outros, como o sulfatos, carbonatos, fluoreto de cálcio, bário e magnésio causa scaling, onde o material sólido precipita na superfície da membrana e o fluxo de água é impedido de passar. A taxa de incrustações pode ser minimizada através de inibidores a base de hexametáfosfato de sódio, como pré-tratamento da água bruta.

Finalmente, a temperatura do painel solar aumenta de acordo com a permanente iluminação, de uma temperatura ótima de operação de  $25^{\circ}\text{C}$ , em até  $60^{\circ}$  ou mais. Este aumento causa um decréscimo da disponível saída de potência de até 20%.

Este pequeno sistema geralmente operará em áreas remotas. Por isto, eles necessitam ser projetado tanto quanto rigoroso quanto possível para garantir um suficiente tempo de vida com o mínimo de manutenção.

A manutenção do módulo consiste, a cada seis meses, inspecionar todos os instrumentos elétricos e conexões que podem causar dano e corrosão. A limpeza deverá ser feita apenas com água e sabão. Não se deve limpar o módulo caso ele esteja com a cobertura de vidro quebrada ou perfurada, pois há sérios riscos de choque. Verificar se o sistema de tensão e corrente de saída é compatível com o esperado. A inspeção tem o objetivo de saber quando é necessário fazer uma limpeza no arranjo, se há perdas ou conexões com corrosão ou outros componentes com problemas.

## CAPÍTULO V

---

### 5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa, podemos concluir que:

- Para as águas de alimentações estudadas, observou-se que a potência elétrica varia linearmente com a pressão. Logo, com o aumento da pressão, há um aumento da potência elétrica requerida pelo conjunto motobomba.
- As maiores recuperações ocorreram na faixa de pressão de 8,0 kgf/cm<sup>2</sup> a 10,0 kgf/cm<sup>2</sup>. Para a concentração de 1000 mg/L o sistema ofereceu 51% de recuperação, enquanto que a recuperação média obtida para as demais concentrações foi de 43%, a qual se encontra dentro de um patamar onde é bastante aplicado para a dessalinização de águas salobras, sem formar incrustações.
- Para as águas salobras de mesma concentração da solução de cloreto de sódio (2000 mg/L), os dados da recuperação não apresentaram diferenças significativas para a faixa de pressão estudada.
- O consumo de energia diminuiu com o aumento da pressão para todos os casos estudados. Também não ocorreu uma diferença significativa para as águas salobras e a solução de cloreto de sódio para a faixa de pressão de 8,0 kgf/cm<sup>2</sup> a 10,0 kgf/cm<sup>2</sup>, onde o sistema apresentou a maior taxa de recuperação para o menor consumo de energia.
- Quanto a variação do pH e da condutividade elétrica do permeado e do concentrado, estas variaram em função da pressão e das concentrações das soluções.
- Em função da recuperação obtida pelo sistema, a produção de água dessalinizada pode chegar até 200 L/h, onde esse volume considerando o dia de 6,0 h de insolação por dia, pode-se obter uma produção de 1200L/d para atender a 240 pessoas com água de beber e cozinhar.



- O consumo de energia do sistema ficou na ordem de  $2,0 \text{ kWh/m}^3$  e representou 54% do consumo de energia para a dessalinização via energia fotovoltaica para água do mar (Childs *et al*, 1999).

## **CAPÍTULO VI**

---

### **6 PERSPECTIVAS**

Para a continuidade desta pesquisa, sugerimos desenvolver o seguinte:

- Realizar um estudo sobre a taxa de insolação anual no Estado da Paraíba que possa oferecer melhores condições de trabalho e aproveitamento da energia fotovoltaica.
- Instrumentar o sistema com equipamentos de medidas onde possamos registrar a variação da produção de água permeada em função das estações do ano.
- Testar o sistema com águas salobras acima de 2000 mg/L.
- Em função da produtividade pode-se estudar o arranjo, número e tipo de membranas.
- Testar o equipamento no campo para atender a comunidade carente em água de boa qualidade.

## **CAPÍTULO VII**

---

### **7 BIBLIOGRAFIA**

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

ACIOLI, J. DE LIMA – Fontes de energia – Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1994. p. 92.

AHMAD, G. E., SCHMIDE, J., Feasibility study of brackish water desalination in the Egyptian deserts and rural regions using PV systems. *Energy conversion and management*, 2001. p. 9.

ALAWAJI, S. H. ; SMAI, M. S.; RAFIQUE, S. & STAFFODD, B., PV – Powered water pumpyng and desalination plant for remote areas in Saudi Arabi. *Applied Energy*, 52 (1995) 283-289.

AMJAD, Z. *Reverse Osmose: Membrane Tecnology, Water Chemistry & Industrial Aplications*. Van Nostrand Reinhold,1993.

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

BEZERRA, A. M., Aplicações térmicas da energia solar. João Pessoa. Editora Universitária / UFPB, 2001.

BODDEKER, R. R., Inorganic Membranes Syntesis, Characteristics and applications. Van Nostrand, New York, 1991, Chap. 1 and 2.

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

CARVALHO, P., Água potável via energia solar. Ciência Hoje, vol. 27, nº 158, março (2000)p. 72-74.

CERAGIOLLI, P. C., Manual de Energia Solar Fotovoltaica. RF Comércio de sistemas Ltda. São José dos Campos, São Paulo, 1997.

CHEN, S. S.; TAYLOR, J. S., MORRIS. C.D. & HOFMAN, J. A.M.H., Flat sheet testing for pesticide removal by varying RO;NF membranes, Desalination (1997) 843-848.

CHILDS, W. D., DABIRIS, A. E., AL-HINAI, A. & ABDULLAH, H. A., VARI-RO Solar-powered desalting technology. Desalination 125(1999)155-166.

COSTA, H. S., ECK, M. & SILVA, G. F., Sustentabilidade de sistemas fotovoltaicos residenciais. A experiência do NAPPER no semi-árido. Revista Ciência e Engenharia da Universidade Federal de Uberlândia, 7(2) p. 105-112, 1998.

Cres, Desalination Guide Using Renewable Energies, Center for Renewable Energy Sources, Greence, 1998.

DUDLEY, L. Y. 7 DARTON, E. G., Pretreatment procedures to control biogrowth and scale formation in membrane systems, Desalination 110(1997) 11-20.

FAURE, G., Principles and applications of inorganic chemistry. Prentice – Hall, Inc. Chapter 21 – p. 443, 1991.

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

FRANÇA K.B., LABORDE, H.M. NEFF, H., Design and performance of small scale solar powered water desalination systems, utilizing reverse osmosis, Journal of Solar Energy Engineering 122(2000) 170-181.

GREEN, M. A., Photovoltaic principles. Physica elsevier, 14 (2002)11-17.

HABERT, A.C., BORGES, C. P. & NOBREGA, R., Processos de separação com membranas, Escola piloto em engenharia química, COPPE/UFRJ – Programa de engenharia química, 1997.

HAMMOND, C. R., The Elements, Handbook of Chemistry and Physics, Ed. D.R.Lide, CRC Press, Ann Arbor, USA, 1992, p. 4-1.

Hydranautics. RO System Design Software. Version 64(c), 1998.

IDAE – Instituto para la Diversificación y Ahorro de la energia. Manuales de energias renovables, vol. 6, energia solar fotovoltaica. Edição especial Cinco Dias. Gráfica Internacional, S. A., Espanha, 1995.

ISHIMURA, N., solar photovoltaic desalination of brackish water in remote areas by electroanalysis. Desalination, 98 (1994) 485-493.

JOYCE A., LOUREIRO, D., RODRIGUES, C. & CASTRO, S., Small reverse osmosis units PVsystems for water purification in rural places. Desalination 137(2001) 39-44.

KEEFER, B. G., HEMBREE, R.D. & SCHARACK, F. C., Optimized matching of solar photovoltaic power with reverse osmosis desalination. *Desalination*, 54 (1985) 89-103.

LABORDE, H.M., FRANÇA, K.B., NEFF, H. e LIMA, A.M.N., Optimization strategy for a small scale reverse osmosis water desalination system based on solar energy, *Desalination*, 133(2001) 1-12.

LEÃO, C. L.; PEREIRA, A. L.; TIBA, C. & BARBOSA, E. M. S. Fontes não convencionais de energia. Centro avançado de estudos do semi-árido nordestino – CESANE – UFPE- 2001.

LONSDALE, H. K., The growth of membrane technology. *Journal of Membrane Science*,10(1982) 81-181.

*Manual de dessalinização para planejadores*. Secretaria de recuperação, Engenharia e centro de pesquisas de Denver, Colorado, EUA, 1972.

MADAENI, S. S., MOHAMAMDI, T. & MOGHADAM, M. K., Chemical cleaning of reverse osmosis membranes. *Desalination* 134(2001) 77-82.

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.

MCVEIGH, J. C. *Sun Power – an introduction to the applications of solar energy*. Pergamon International Library, England, 1979.

MOHSEN, M. S. & JABER, J. O., A photovoltaic-powered system for water desalination. *Desalination* 138(2001)129-136.

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

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

PALZ, W., *Energia solar e fontes alternativas*; São Paulo: Hemus, 1981.

PERRY, R. H. & GREEN, D. W. *Chemical Engineering Handbook*. McGraw-Hill. USA. Seventh edition, 1997.

RÜTHER, R. & KLEISS, G., Advantages of Thin Film Solar Modules in Façade, Sound Barrier and Roof-Mounted PV Systems, *Anais da Conferência EuroSun'96*, Freiburg, Alemanha, 1996, p. 862.

Sandia National Laboratories, Photovoltaic Design Center, "Stand-Alone Photovoltaic Systems – A Handbook of Recommended Design Practices", 1991.

SCOTT, K., *Handbook of Industrial Membranes*, Elsevier advanced technology, 1<sup>o</sup> ed., 1997.

SHAH, A.; MEIER, J.; TSCHARNER, R. & WYRSCH, N., Photovoltaic Power Generation, *Plasma Physics & Controlled Fusion*, 37 (1992)1837.

SILVA, F. T., Concentração de suco de laranja (*Citrus sinensis*) por osmose inversa, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Eng. de Alimentos, Campinas, SP, 1995.

SILVEIRA, M. C., Avaliação de um sistema híbrido para dessalinização de águas salinas pelo processo de osmose inversa. Campina Grande, 1999. Dissertação (Mestrado em engenharia química), UFPB.

SUDAK, R. G., Reverse osmosis in Porter, M. C. (ed), *Handbook of Industrial membrane technology*, Noyel publications, New Jersey, 1990.

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

TANSEL, B. & BAO, W. Y., Characterization of fouling kinetics in ultrafiltration systems by resistances in series model. *Desalination* 129(2000) 7-14.

TRAUBE, M. Physiologie und Wisseischlaftliche medicin, in: Reischert and Dubois-Reynolds, eds.; *Archiv fuz anatomie*, Leipzig, 1867.

TZEN, E., PERRAKIS, K. & BALTAS, P. , Design of stand alone PV-desalination system for rural areas. *Desalination*, 119 (1998) 327.

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

VOROS, N.G; KIRANOUDIS, C. T. & MAROULIS, Z. B., Solara energy exploitation for reverse osmosis desalination plants. *Desalination* 115 (1998) 83-101.

Wangnick Consulting, Worlwide Desalting Plants Inventory, Report. No. 16, IDA, 2000.

World Health Organization, Guidelines for Driking water Quality, vol. 1, Recommendations, Geneva, 1984.



**APÊNDICE I**  
**BOLETIM TÉCNICO DA MEMBRANA**



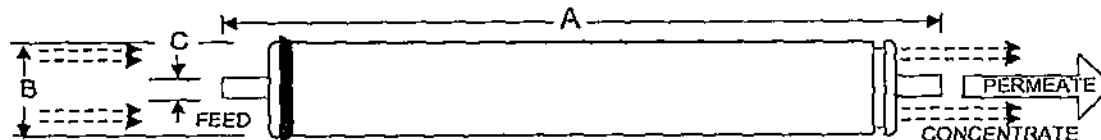
## Membrane Element CPA2-4040

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

### Test Conditions

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

- 1500 PPM NaCl solution
- 225 psi (1.55 MPa) Applied Pressure
- 77 °F (25 °C) Operating Temperature
- 15% Permeate Recovery
- 6.5 - 7.0 pH Range



A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)	Weight, lbs. (kg)
40.00 (1016)	3.95 (100.3)	0.75 (19.1)	8 (3.6)

Core tube extension = 1.05" (26.7 mm)

**Notice:** Permeate flow for individual elements may vary +33 or -15 percent. All membrane elements are supplied with a brine seal, interconnector, and o-rings. Elements are enclosed in a sealed polyethylene bag containing less than 1.0% sodium meta-bisulfite solution and 10% propylene glycol, and then packaged in a cardboard box.

Hydranautics believes the information and data contained herein to be accurate and useful. The information and data are offered in good faith, but without guarantee, as conditions and methods of use of our products are beyond our control. Hydranautics assumes no liability for results obtained or damages incurred through the application of the presented information and data. It is the user's responsibility to determine the appropriateness of Hydranautics' products for the user's specific end uses. 03/16/01

**APÊNDICE II**  
ESPECIFICAÇÕES DO PAINEL FOTOVOLTAICO

# Power-Value 110&120



PHOTOCOMM, INC.  
THE VOLTAGE TO PROTECT COMPANY

## Solar Electric Modules

The Power-Value PV-110 and PV-120 are state-of-the-art photovoltaic modules designed for use in all types of solar power systems. Using the proven Cz single crystal solar cell technology, Power-Value (PV) modules deliver sufficient voltage for general battery charging, and direct drive applications.

### Features

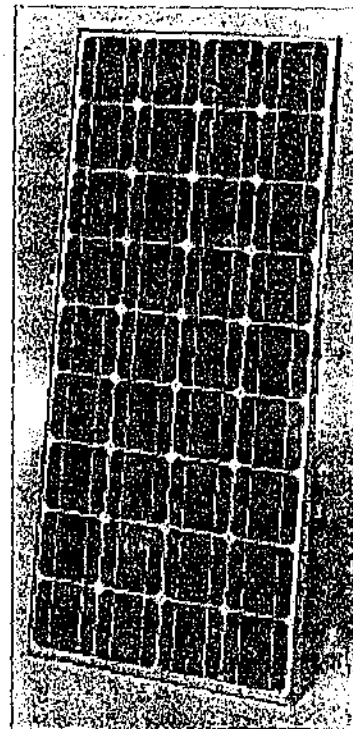
- High power modular banking block configuration
- Over 6.5 Amps of charging in full sunlight
- Spacious junction box for ease of wiring
- Industry standard mounting hole patterns
- 10-year warranty
- UL listed

### Construction

- 66 series, textured, single crystal Cz silicon cells
- *Bumped, oxidation resistant, anodized aluminum frame*
- *Weather resistant, conductive junction box*
- Integral bypass diodes

### Applications

- Microwave/Trans repeater stations
- Cathodic protection systems
- Electric fence and remote wagers
- Rural or remote village water supplies
- Pumping systems for irrigation and livestock watering
- Water quality and environmental data monitoring systems
- Desalination systems
- Medical facilities and services in rural areas
- Remote off-grid home lighting systems
- General battery charging



PV-110/PV-120

### Typical Electrical Specifications\*

	PV-110	PV-120
• Peak power (P <sub>max</sub> )	113 Watts	120 Watts
• Open circuit voltage (V <sub>oc</sub> )	21.7 Volts	21.6 Volts
• Max. power voltage (V <sub>mp</sub> )	16.7 Volts	16.6 Volts
• Short circuit current (I <sub>sc</sub> )	7.5 Amps	7.7 Amps
• Max. power current (I <sub>mp</sub> )	6.8 Amps	7.1 Amps

### Typical Physical Specifications

- Weight: 26.1 lbs. (11.8 kg)
- Dimensions: 36.1 x 36.0 x 1.3 in. (918 x 913 x 33 mm)

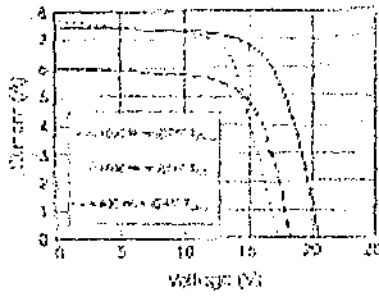
\*Values represent a standard test procedure based on conditions: irradiance of 1000 W/m<sup>2</sup>, spectrum of AM1.5, and cell temperature of 25°C.

# Power-Value 110&120

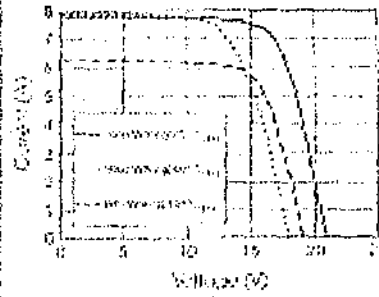
## Technical Specifications

### Electrical Characteristics

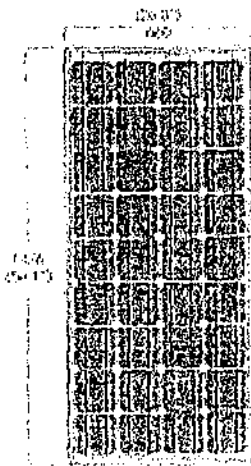
Typical Output Current vs. Voltage (P110)



Typical Output Current vs. Voltage (P120)



### Physical Characteristics



P110  
(0.62)



P120  
(0.62)

These dimensions are typical and may vary slightly from those shown. For more information, please contact us.



**PHOTOCOMM, INC.**  
THE WIRELESS POWER COMPANY

Printed on Recycled Paper - Printed in USA

**GOLDEN GENESIS COMPANY**

7812 East Acacia Dr.

Scottsdale, AZ 85260

Phone (602) 944-6466 (602) 951-0329

E-Mail: info@goldengenesis.com

## **APÊNDICE III**

ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DAS ÁGUAS SALOBRAS

## ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA

LABORATÓRIO DE REFERÊNCIA EM DESSALINIZAÇÃO					
Amostra: Água do poço de Nova Floresta – Tipo 1					
Pressão de operação: 6 kgf/cm <sup>2</sup>					
PARÂMETROS	VMP (*)	Alimentação	Permeado	Concentrado	Rejeição
Condutividade elétrica, ms/cm a 25°C		3,92	0,17	4,8	-
Potencial Hidrogeniônico, pH	6,5 a 8,5	4,25	3,7	4,78	-
Turbidez, (ut)	1,0 a 5,0	0	0	0	
Cor	Não objetável				
Odor	Não objetável				
Sabor	Não objetável				
Dureza em Cálcio, mg/L Ca <sup>++</sup>	-	70,8	0,31	94,3	99%
Dureza em Magnésio, mg/L Mg <sup>++</sup>	-	98,04	0,42	130,58	99%
Dureza Total, mg/L CaCO <sub>3</sub>	500	585,5	2,5	779,83	99%
Sódio, mg/L Na <sup>+</sup>	-	698,25	17,40	925,2	95%
Potássio, mg/L K <sup>+</sup>	-	49,09	1,58	64,93	94%
Estrôncio, mg/L Sr <sup>++</sup>	-	-	-	-	-
Bário, mg/L Ba <sup>++</sup>	1	-	-	-	-
Ferro Total, mg/L	0,3	0,03	0,01	0,02	-
Manganês, mg/L Mn <sup>++</sup>	0,05	-	-	-	-
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	0,0	0,0	0,0	-
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	0,00	0,00	0,00	-
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	14,87	0,9	19,64	88%
Alcalinidade Total, mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	14,87	0,9	19,64	88%
Sulfato, mg/L SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	400	61	0,21	81,26	99%
Cloreto, mg/L Cl <sup>-</sup>	250	1478,80	29,56	1961,88	96%
Nitrato, mg/L NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10	10,0	-	-	-
Nitrito, mg/L NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	1	-	-	-	-
Sílica, mg/L SiO <sub>2</sub>	-	15,80	0,34	20,95	96%
Total de Sólidos Dissolvidos, mg/L	1000	2479,10	50,27	3298,77	97%

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

LABORATÓRIO DE REFERÊNCIA EM DESSALINIZAÇÃO					
Amostra: Água do poço de Nova Floresta – Tipo 1					
Pressão de operação: 8 kgf/cm <sup>2</sup>					
PARÂMETROS	VMP (*)	Alimentação	Permeado	Concentrado	Rejeição
Condutividade elétrica, ms/cm a 25°C		3,92	0,15	4,99	-
Potencial Hidrogeniônico, pH	6,5 a 8,5	4,25	4,32	4,06	-
Turbidez, (ut)	1,0 a 5,0	0	0	0	
Cor	Não objetável				
Odor	Não objetável				
Sabor	Não objetável				
Dureza em Cálcio, mg/L Ca <sup>++</sup>	-	70,8	0,19	94,34	99%
Dureza em Magnésio, mg/L Mg <sup>++</sup>	-	98,04	0,27	130,63	99%
Dureza Total, mg/L CaCO <sub>3</sub>	500	585,5	1,6	780,14	99%
Sódio, mg/L Na <sup>+</sup>	-	698,25	11,13	927,29	97%
Potássio, mg/L K <sup>+</sup>	-	49,09	1,01	65,12	96%
Estrôncio, mg/L Sr <sup>++</sup>	-	-	-	-	-
Bário, mg/L Ba <sup>++</sup>	1	-	-	-	-
Ferro Total, mg/L	0,3	0,03	0,01	0,02	
Manganês, mg/L Mn <sup>++</sup>	0,05	-	-	-	
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	0,00	0,00	0,00	-
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	14,87	0,75	19,71	90%
Alcalinidade Total, mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	14,87	0,75	19,71	90%
Sulfato, mg/L SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	400	61	0,13	81,29	99%
Cloreto, mg/L Cl <sup>-</sup>	250	1478,80	18,92	1965,43	97%
Nitrato, mg/L NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10	-	-	-	-
Nitrito, mg/L NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	1	-	-	-	-
Sílica, mg/L SiO <sub>2</sub>	-	15,80	0,22	20,99	97%
Total de Sólidos Dissolvidos, mg/L	1000	2479,10	32,63	3304,82	97%

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



LABORATÓRIO DE REFERÊNCIA EM DESSALINIZAÇÃO					
Amostra: Água do poço de Nova Floresta + água da torneira – Tipo 2					
Pressão de operação: 6 kgf/cm <sup>2</sup>					
PARÂMETROS	VMP (*)	Alimentação	Permeado	Concentrado	Rejeição
Condutividade elétrica, µmho/cm a 25°C		4,62	0,18	4,5	-
Potencial Hidrogeniônico, pH	6,5 a 8,5	6,04	5,10	6,58	-
Turbidez, (ut)	1,0 a 5,0	0	0	0	
Cor	Não objetável				
Odor	Não objetável				
Sabor	Não objetável				
Dureza em Cálcio, mg/L Ca <sup>++</sup>	-	29,70	0,12	38,44	99%
Dureza em Magnésio, mg/L Mg <sup>++</sup>	-	30,50	0,12	39,48	99%
Dureza Total, mg/L CaCO <sub>3</sub>	500	201,33	0,8	260,6	99%
Sódio, mg/L Na <sup>+</sup>	-	652,48	15,23	840,79	95%
Potássio, mg/L K <sup>+</sup>	-	24,12	0,73	31,03	94%
Estrôncio, mg/L Sr <sup>++</sup>	-	-	-	-	-
Bário, mg/L Ba <sup>++</sup>	1	-	-	-	-
Ferro Total, mg/L	0,3	0,03	0,01	0,02	
Manganês, mg/L Mn <sup>++</sup>	0,05	-	-	-	-
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	0,00	0,00	0,00	-
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	0,00	0,00	0,00	
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	12,19	0,80	15,65	88%
Alcalinidade Total, mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	12,19	0,80	15,65	88%
Sulfato, mg/L SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	400	65	0,24	84,14	99%
Cloreto, mg/L Cl <sup>-</sup>	250	1128,9	24,25	1455,33	96%
Nitrato, mg/L NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10	-	-	-	-
Nitrito, mg/L NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	1	-	-	-	-
Sílica, mg/L SiO <sub>2</sub>	-	16,70	0,37	21,53	96%
Total de Sólidos Dissolvidos, mg/L	1000	1959,61	41,85	2526,42	96%

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

LABORATÓRIO DE REFERÊNCIA EM DESSALINIZAÇÃO					
Amostra: Água do poço de Nova Floresta + água da torneira – Tipo 2					
Pressão de operação: 8 kgf/cm <sup>2</sup>					
PARÂMETROS	VMP (*)	Alimentação	Permeado	Concentrado	Rejeição
Condutividade elétrica, µmho/cm a 25°C	-	4,32	0,17	5,14	-
Potencial Hidrogeniônico, pH	6,5 a 8,5	6,04	5,25	6,75	-
Turbidez, (ut)	1,0 a 5,0	0	0	0	
Cor	Não objetável				
Odor	Não objetável				
Sabor	Não objetável				
Dureza em Cálcio, mg/L Ca <sup>++</sup>	-	29,70	0,10	44,5	99%
Dureza em Magnésio, mg/L Mg <sup>++</sup>	-	30,50	0,10	45,70	99%
Dureza Total, mg/L CaCO <sub>3</sub>	500	201,33	0,66	301,66	99%
Sódio, mg/L Na <sup>+</sup>		652,48	12,98	972,18	96%
Potássio, mg/L K <sup>+</sup>		24,12	0,62	35,87	95%
Estrôncio, mg/L Sr <sup>++</sup>		-	-	-	-
Bário, mg/L Ba <sup>++</sup>	1	-	-	-	-
Ferro Total, mg/L	0,3	0,02	0,02	0,02	-
Manganês, mg/L Mn <sup>++</sup>	0,05		-	-	-
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	0,00	0,00	0,00	-
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	0,00	0,00	0,00	-
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	12,19	0,75	18,07	88%
Alcalinidade Total, mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	12,19	0,75	18,07	88%
Sulfato, mg/L SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	400	65	0,21	97,39	99%
Cloreto, mg/L Cl <sup>-</sup>	250	1128,9	20,76	1682,89	96%
Nitrato, mg/L NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10	-	-	-	-
Nitrito, mg/L NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	1	-	-	-	-
Sílica, mg/L SiO <sub>2</sub>	-	16,70	0,31	24,89	96%
Total de Sólidos Dissolvidos, mg/L	1000	1959,61	35,83	2921,52	96%

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

LABORATÓRIO DE REFERÊNCIA EM DESSALINIZAÇÃO					
Amostra: Água do poço de Nova Floresta + água da torneira – Tipo 2					
Pressão de operação: 10 kgf/cm <sup>2</sup>					
PARÂMETROS	VMP (*)	Alimentação	Permeado	Concentrado	Rejeição
Condutividade elétrica, µmho/cm a 25°C		4,32	0,17	6,66	-
Potencial Hidrogeniônico, pH	6,5 a 8,5	6,04	4,96	6,55	-
Turbidez, (nt)	1,0 a 5,0	0	0	0	
Cor	Não objetável				
Odor	Não objetável				
Sabor	Não objetável				
Dureza em Cálcio, mg/L Ca <sup>++</sup>	-	29,70	0,13	60,85	99%
Dureza em Magnésio, mg/L Mg <sup>++</sup>	-	30,50	0,13	62,49	99%
Dureza Total, mg/L CaCO <sub>3</sub>	500	201,33	0,86	412,5	99%
Sódio, mg/L Na <sup>+</sup>	-	652,48	16,44	1322,48	95%
Potássio, mg/L K <sup>+</sup>	-	24,12	0,79	48,70	93%
Estrôncio, mg/L Sr <sup>++</sup>	-	-	-	-	-
Bário, mg/L Ba <sup>++</sup>	1	-	-	-	-
Ferro Total, mg/L	0,3	0,02	0,02	0,02	
Manganês, mg/L Mn <sup>++</sup>	0,05		-	-	
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	0,00	0,00	0,00	-
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	0,00	0,00	0,00	-
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	12,19	0,83	24,45	87%
Alcalinidade Total, mg/L CaCO <sub>3</sub>	-	12,19	0,83	24,45	87%
Sulfato, mg/L SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	400	65	0,26	133,20	99%
Cloreto, mg/L Cl <sup>-</sup>	250	1128,9	26,16	2290,51	95%
Nitrato, mg/L NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10	-	-	-	-
Nitrito, mg/L NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	1	-	-	-	-
Sílica, mg/L SiO <sub>2</sub>	-	16,70	0,39	33,88	95%
Total de Sólidos Dissolvidos, mg/L	1000	1959,61	45,13	3976,6	95%

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

## **APÊNDICE IV**

TABELAS REFERENTES AOS GRÁFICOS DO CAPÍTULO IV

## Tabelas referentes aos gráficos com solução de cloreto de sódio

Tabela 1: Pressão de operação do sistema em função da potência requerida pelo motobomba.

Pressão kgf/cm <sup>2</sup>	Pot. (W) 1000 mg/L	Pot. (W) 2000 mg/L	Pot. (W) 3000 mg/L	Pot. (W) 4000 mg/L
4	167,21	177,7	178,63	185,103
6	213,3	215,27	216,84	245,436
7	248,85	255,43	234,57	265,92
8	260,54	268,27	277,36	296,94
10	319,24	328,6	329,84	368,52

Tabela 2: Pressão de operação do sistema em função da Vazão do permeado e do concentrado.

Pressão kgf/cm <sup>2</sup>	Vazão (1000 mg/L)		Vazão (2000 mg/L)		Vazão (3000 mg/L)		Vazão (4000 mg/L)	
	Perm.	Concen.	Perm.	Concen.	Perm.	Concen.	Perm.	Concen.
4	0,085	0,397	0,078	0,429	0,069	0,4384	0,044	0,455
6	0,129	0,285	0,126	0,374	0,083	0,333	0,0966	0,381
7	0,171	0,296	0,152	0,299	0,131	0,311	0,108	0,350
8	0,182	0,228	0,162	0,274	0,164	0,277	0,144	0,313
10	0,224	0,164	0,205	0,180	0,196	0,193	0,173	0,246

Tabela 3: Pressão de operação do sistema em função da recuperação (Re%) do sistema.

Pressão kgf/cm <sup>2</sup>	Re% 1000 mg/L	Re% 2000 mg/L	Re% 3000 mg/L	Re% 4000 mg/L
4	17,69	14,5	13,5	8,81
6	31,18	25,16	20	20,22
7	36,56	33,7	29,65	23,58
8	44,37	37,15	37,27	31,5
10	57,77	53,21	50,5	41,2

Tabela 4: Pressão de operação do sistema em função do consumo de energia (kWh/m<sup>3</sup>).

Pressão kgf/cm <sup>2</sup>	Ener. (kWh/m <sup>3</sup> ) 1000 mg/L	Ener. (kWh/m <sup>3</sup> ) 2000 mg/L	Ener. (kWh/m <sup>3</sup> ) 3000 mg/L	Ener. (kWh/m <sup>3</sup> ) 4000 mg/L
4	1,95	2,28	2,64	4,4
6	1,65	1,7	2,08	2,8
7	1,45	1,68	1,79	2,5
8	1,43	1,65	1,69	2,3
10	1,42	1,6	1,67	2,2

Tabela 5: Potencial hidrogeniônico do permeado em função do tempo para a solução de cloreto de sódio de 1000 mg/L.

Tempo min	pH do permeado				
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=7kgf/cm <sup>2</sup>	P=8kgf/cm <sup>2</sup>	P=10kgf/cm <sup>2</sup>
1	4,87	4,82	4,7	4,83	4,78
5	4,87	4,8	4,69	4,84	4,78
10	4,87	4,8	4,69	4,82	4,74
15	4,87	4,82	4,72	4,81	4,76
20	4,87	4,82	4,7	4,84	4,77
25	4,87	4,82	4,69	4,82	4,78

Tabela 6: Potencial hidrogeniônico do concentrado em função do tempo para a solução de cloreto de sódio de 1000 mg/L.

Tempo min	pH do concentrado				
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=7kgf/cm <sup>2</sup>	P=8kgf/cm <sup>2</sup>	P=10kgf/cm <sup>2</sup>
1	5,7	5,63	5,82	5,83	5,89
5	5,7	5,63	5,81	5,81	5,86
10	5,69	5,6	5,81	5,86	5,89
15	5,7	5,6	5,78	5,83	5,87
20	5,7	5,6	5,8	5,83	5,89
25	5,7	5,63	5,82	5,83	5,89

Tabela 7: Condutividade elétrica do permeado em função do tempo para a solução de cloreto de sódio de 1000 mg/L.

Tempo min	$\kappa$ (ms/cm) do permeado				
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=7kgf/cm <sup>2</sup>	P=8kgf/cm <sup>2</sup>	P=10kgf/cm <sup>2</sup>
1	0,14	0,15	0,15	0,14	0,14
5	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
10	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
20	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
25	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14

Tabela 8: Condutividade elétrica do concentrado em função do tempo para a solução de cloreto de sódio de 1000 mg/L.

Tempo min	$\kappa$ (ms/cm) do concentrado				
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=7kgf/cm <sup>2</sup>	P=8kgf/cm <sup>2</sup>	P=12kgf/cm <sup>2</sup>
1	2,25	2,56	2,73	3,15	4
5	2,28	2,55	2,7	3,1	3,98
10	2,29	2,58	2,72	3,11	3,98
15	2,29	2,58	2,73	3,15	4,01
20	2,29	2,6	2,72	3,15	4
25	2,29	2,59	2,73	3,15	3,98

Tabela 9: Potencial hidrogeniônico do permeado em função do tempo para a solução de cloreto de sódio de 2000 mg/L.

Tempo min	pH do permeado						
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=5kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=7kgf/cm <sup>2</sup>	P=8kgf/cm <sup>2</sup>	P=9kgf/cm <sup>2</sup>	P=10kgf/cm <sup>2</sup>
1	5,25	4,99	5,22	5,75	4,84	5,2	4,96
5	5,21	5,06	5,19	5,76	4,85	5,24	5,02
10	5,36	5,08	5,22	5,75	4,83	5,22	4,94
15	5,27	4,98	5,23	5,8	4,84	5,18	4,95
20	5,27	4,99	5,32	5,75	4,88	5,15	4,96
25	5,36	5,02	5,25	5,8	4,834	5,2	4,96

Tabela 10: Potencial hidrogeniônico do concentrado em função do tempo para a solução de cloreto de sódio de 2000 mg/L.

Tempo min	pH do concentrado						
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=5kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=7kgf/cm <sup>2</sup>	P=8kgf/cm <sup>2</sup>	P=9kgf/cm <sup>2</sup>	P=10kgf/cm <sup>2</sup>
1	6,44	6,57	6,53	6,58	6,52	6,53	6,7
5	6,45	6,58	6,53	6,52	6,56	6,54	6,7
10	6,45	6,58	6,55	6,55	6,56	6,54	6,7
15	6,46	6,58	6,53	6,55	6,56	6,53	6,71
20	6,45	6,58	6,55	6,55	6,6	6,55	6,7
25	6,45	6,58	6,55	6,54	6,56	6,54	6,72

Tabela 11: Condutividade elétrica do permeado em função do tempo para a solução de cloreto de sódio de 2000 mg/L.

Tempo min	$\kappa$ (ms/cm) do permeado						
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=5kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=7kgf/cm <sup>2</sup>	P=8kgf/cm <sup>2</sup>	P=9kgf/cm <sup>2</sup>	P=10kgf/cm <sup>2</sup>
1	0,074	0,059	0,058	0,054	0,053	0,053	0,062
5	0,08	0,06	0,058	0,053	0,055	0,052	0,062
10	0,074	0,059	0,057	0,054	0,06	0,053	0,062
15	0,076	0,058	0,057	0,055	0,053	0,053	0,062
20	0,074	0,06	0,06	0,05	0,053	0,053	0,062
25	0,071	0,06	0,06	0,058	0,054	0,053	0,063

Tabela 12: Condutividade elétrica do concentrado em função do tempo para a solução de cloreto de sódio de 2000 mg/L.

Tempo min	$\kappa$ (ms/cm) do concentrado						
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=5kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=7kgf/cm <sup>2</sup>	P=8kgf/cm <sup>2</sup>	P=9kgf/cm <sup>2</sup>	P=10kgf/cm <sup>2</sup>
1	4,25	4,51	4,87	5,24	5,42	6,17	7,02
5	4,33	4,49	4,86	5,16	5,5	6,13	7,04
10	4,33	4,55	4,88	5,24	5,53	6,18	7,02
15	4,33	4,51	4,87	5,26	5,59	6,17	7,02
20	4,35	4,49	4,88	5,31	5,59	6,15	7,02
25	4,36	4,55	4,88	5,28	5,58	6,18	7,02

Tabela 13: Potencial hidrogeniônico do permeado em função do tempo para a solução de cloreto de sódio de 3000 mg/L.

Tempo min	pH do permeado					
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=5kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=7gf/cm <sup>2</sup>	P=8kgf/cm <sup>2</sup>	P=10kgf/cm <sup>2</sup>
1	5,37	5,1	6,3	5,59	4,76	4,65
5	5,47	4,96	6,35	5,55	4,8	4,6
10	5,46	5,34	6,29	5,58	4,8	4,61
15	5,47	5,11	6,28	5,55	4,7	4,61
20	5,5	5,13	6,37	5,58	4,76	4,65



Tabela 14: Potencial hidrogeniônico do concentrado em função do tempo para a solução de cloreto de sódio de 3000 mg/L.

Tempo min	pH do concentrado					
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=5kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=7gf/cm <sup>2</sup>	P=8kgf/cm <sup>2</sup>	P=10kgf/cm <sup>2</sup>
1	6,2	5,54	6,2	6,04	5,97	6,06
5	6,16	5,56	6,22	6,02	5,97	6,06
10	6,21	5,56	6,27	6,05	5,96	6,08
15	6,24	5,55	6,26	6,02	5,95	6,06
20	6,25	5,55	6,27	6,04	5,97	6,06

Tabela 15: Condutividade elétrica do permeado em função do tempo para a solução de cloreto de sódio de 3000 mg/L.

Tempo min	$\kappa$ (ms/cm) do permeado					
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=5kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=7gf/cm <sup>2</sup>	P=8kgf/cm <sup>2</sup>	P=10kgf/cm <sup>2</sup>
1	0,24	0,24	0,21	0,19	0,18	0,18
5	0,24	0,22	0,2	0,19	0,17	0,18
10	0,24	0,24	0,2	0,19	0,17	0,18
15	0,24	0,22	0,21	0,19	0,17	0,18
20	0,24	0,22	0,21	0,19	0,17	0,18

Tabela 16: Condutividade elétrica do concentrado em função do tempo para a solução de cloreto de sódio de 3000 mg/L.

Tempo min	$\kappa$ (ms/cm) do concentrado					
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=5kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=7gf/cm <sup>2</sup>	P=8kgf/cm <sup>2</sup>	P=10kgf/cm <sup>2</sup>
1	4,85	4,95	5,3	5,59	6,6	8,15
5	4,85	4,93	5,3	5,58	6,6	8,15
10	4,84	4,94	5,29	5,56	6,61	8,15
15	4,85	4,93	5,29	5,59	6,6	8,14
20	4,84	4,94	5,3	5,59	6,61	8,15

Tabela 17: Potencial hidrogeniônico do permeado em função do tempo para a solução de cloreto de sódio de 4000 mg/L.

Tempo min	pH do permeado				
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=7kgf/cm <sup>2</sup>	P=8gf/cm <sup>2</sup>	P=10kgf/cm <sup>2</sup>
1	5,35	5,12	5	4,92	4,93
5	5,34	5,12	5,03	4,89	4,92
10	5,34	5,12	5	4,92	4,93
15	5,34	5,11	5,01	4,89	4,93
20	5,35	5,11	5	4,91	4,92
25	5,35	5,12	5	4,9	4,93

Tabela 18: Potencial hidrogeniônico do concentrado em função do tempo para a solução de cloreto de sódio de 4000 mg/L.

Tempo min	pH do concentrado				
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=7kgf/cm <sup>2</sup>	P=8gf/cm <sup>2</sup>	P=10kgf/cm <sup>2</sup>
1	6,05	6,06	6,11	6,07	6,23
5	6,04	6	6,1	6,06	6,23
10	6,05	6	6,1	6,06	6,23
15	6,05	6	6,11	6,07	6,23
20	6,05	6,06	6,11	6,07	6,23
25	6,05	6,07	6,1	6,07	6,23

Tabela 19: Condutividade elétrica do permeado em função do tempo para a solução de cloreto de sódio de 4000 mg/L.

Tempo min	$\kappa$ (ms/cm) do permeado				
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=7kgf/cm <sup>2</sup>	P=8gf/cm <sup>2</sup>	P=10kgf/cm <sup>2</sup>
1	0,35	0,25	0,24	0,24	0,21
5	0,35	0,25	0,23	0,21	0,21
10	0,35	0,25	0,23	0,22	0,22
15	0,34	0,25	0,23	0,21	0,21
20	0,35	0,25	0,23	0,22	0,21
25	0,35	0,25	0,23	0,22	0,21

Tabela 20: Condutividade elétrica do concentrado em função do tempo para a solução de cloreto de sódio de 4000 mg/L.

Tempo min	$\kappa$ (ms/cm) do concentrado				
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=7kgf/cm <sup>2</sup>	P=8gf/cm <sup>2</sup>	P=10kgf/cm <sup>2</sup>
1	7,4	8,25	8,5	8,98	10,17
5	7,41	8,24	8,52	8,93	10,17
10	7,39	8,25	8,52	8,96	10,17
15	7,46	8,24	8,5	8,94	10,17
20	7,46	8,24	8,52	8,96	10,17
25	7,46	8,25	8,52	8,98	10,17

## Água do poço de Nova Floresta (Tipo I)

Tabela 1: Pressão de operação em função da vazão, recuperação, consumo de energia potência elétrica, corrente e tensão elétrica.

Pressão Kgf/cm <sup>2</sup>	Qp m <sup>3</sup> /h	Qc m <sup>3</sup> /h	Recuperação %	Energia KWh/m <sup>3</sup>	Potência watt	Corrente ampere	Tensão volt
4	0,078	0,442	14,14	2,45	178,37	7,52	23,72
6	0,118	0,354	25	2	237,65	10,46	22,72
7	0,141	0,309	31,33	1,89	266,79	12,16	21,94
8	0,156	0,270	36,56	1,84	287,79	13,23	21,7

Tabela 2: Potencial hidrogeniônico do permeado em função do tempo.

Tempo min	pH do permeado			
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=7kgf/cm <sup>2</sup>	P=8kgf/cm <sup>2</sup>
1	3,82	3,7	4,1	4,32
2	3,84	3,71	4,12	4,3
4	3,8	3,71	4	4,3
6	3,82	3,63	3,97	4,33
8	3,82	3,63	4,1	4,32

Tabela 3: Potencial hidrogeniônico do concentrado.

Tempo min	pH do concentrado			
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=7kgf/cm <sup>2</sup>	P=8kgf/cm <sup>2</sup>
1	4,09	4,78	5,07	4,06
2	4,09	4,79	5,08	4,06
4	4,09	4,79	5,07	4,06
6	4,08	4,83	5,08	4,05
8	4,09	4,83	5,07	4,05

Tabela 4: Condutividade elétrica do permeado.

Tempo min	$\kappa$ (ms/cm) do permeado			
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=7kgf/cm <sup>2</sup>	P=8kgf/cm <sup>2</sup>
1	0,23	0,18	0,14	0,15
2	0,23	0,18	0,14	0,13
4	0,23	0,17	0,14	0,15
6	0,23	0,17	0,13	0,15
8	0,23	0,17	0,13	0,15

Tabela 5: Condutividade elétrica do concentrado.

Tempo min	$\kappa$ (ms/cm) do concentrado			
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=7kgf/cm <sup>2</sup>	P=8kgf/cm <sup>2</sup>
1	4,3	4,78	5,07	4,99
2	4,32	4,79	5,08	4,99
4	4,31	4,79	5,07	4,96
6	4,32	4,83	5,08	4,96
8	4,3	4,83	5,07	4,99

## Água do poço de Nova Floresta + água da torneira (Tipo II)

Tabela 1: Pressão de operação em função da vazão, recuperação, consumo de energia potência elétrica, corrente e tensão elétrica.

Pressão Kgf/cm <sup>2</sup>	Qp m <sup>3</sup> /h	Qc m <sup>3</sup> /h	Recuperação %	Energia kWh/m <sup>3</sup>	Potência watt	Corrente ampere	Tensão volt
4	0,064	0,43	12,95	2,44	184,86	7,8	23,7
6	0,109	0,370	22,81	2,2	241,28	7,46	23
8	0,142	0,285	33,33	2,04	291,54	13,24	22,02
10	0,191	0,181	51,3	1,88	361,05	18,18	19,86
12	0,144	0,108	58,35	2,8	403,6	21,84	18,48

Tabela 2: Potencial hidrogeniônico do permeado em função do tempo.

Tempo min	pH do permeado				
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=8kgf/cm <sup>2</sup>	P=10kgf/cm <sup>2</sup>	P=12kgf/cm <sup>2</sup>
1	5,42	5,1	5,3	4,96	5,06
2	5,42	5,15	5,25	4,96	5,05
4	5,43	5,1	5,2	4,95	5,04
6	5,34	5,09	5,3	4,96	5,06
8	5,36	5,1	5,28	4,95	5

Tabela 3: Potencial hidrogeniônico do concentrado.

Tempo min	pH do concentrado				
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=8kgf/cm <sup>2</sup>	P=10kgf/cm <sup>2</sup>	P=12kgf/cm <sup>2</sup>
1	6,51	6,52	6,75	6,55	6,7
2	6,56	6,56	6,74	6,54	6,62
4	6,58	6,59	6,75	6,55	6,68
6	6,56	6,58	6,75	6,57	6,7
8	6,58	6,6	6,75	6,55	6,73

Tabela 4: Condutividade elétrica do permeado.

Tempo min	$\kappa$ (ms/cm) do permeado				
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=8kgf/cm <sup>2</sup>	P=10kgf/cm <sup>2</sup>	P=12kgf/cm <sup>2</sup>
1	0,2	0,18	0,17	0,2	0,2
2	0,2	0,18	0,17	0,18	0,2
4	0,2	0,18	0,17	0,19	0,2
6	0,2	0,18	0,17	0,17	0,2
8	0,19	0,18	0,17	0,17	0,2

Tabela 5: Condutividade elétrica do concentrado.

Tempo min	$\kappa$ (ms/cm) do concentrado				
	P=4kgf/cm <sup>2</sup>	P=6kgf/cm <sup>2</sup>	P=8kgf/cm <sup>2</sup>	P=10kgf/cm <sup>2</sup>	P=12kgf/cm <sup>2</sup>
1	4,17	4,5	5,13	6,65	9,43
2	4,17	4,49	5,14	6,68	9,46
4	4,17	4,49	5,13	6,67	9,43
6	4,17	4,49	5,14	6,64	9,46
8	4,17	4,48	5,14	6,67	9,43