

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

LABORATÓRIO DE REFERÊNCIA EM DESSALINIZAÇÃO DA SRH/MMA

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE  
INVERSA COM USO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.**

JOSÉ MOACY DE OLIVEIRA MARACAJÁ

Campina Grande – Paraíba

Abril de 2008

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE  
INVERSA COM USO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.**

**JOSÉ MOACY DE OLIVEIRA MARACAJÁ**

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. Dr. Hervé Michel Laborde  
Prof. Dr. Kepler Borges França

Campina Grande - Paraíba

Abril de 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M298a

2008 Maracajá, José Moacy de Oliveira.

Avaliação de um sistema de dessalinização via osmose inversa com uso de energia solar fotovoltaica / José Moacy de Oliveira Maracajá. — Campina Grande, 2008.

107f. : il

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

Referências.

Orientadores: Dr. Hervé Michel Laborde e Dr. Kepler Borges França

1. Osmose Inversa. 2. Dessalinização. 3. Energia Solar Fotovoltaica. I. Título.

CDU 544.725.7(043)

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE  
INVERSA COM USO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.**


**JOSÉ MOACY DE OLIVEIRA MARACAJÁ**

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 21/11/07**

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Hervé Michel Laborde**  
**Orientador**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Kepler Borges França**  
**Orientador**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Hélio Lucena Lira**  
**Examinador**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Luis Gonzaga Vasconcelos**  
**Examinador**

**Campina Grande – Paraíba**  
**Abril de 2008**



## DEDICATÓRIA

Aos meus queridos pais,  
irmãos, esposa, filhos,  
familiares e amigos.

## 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, professores Dr. Hervé Michel Laborde, pela orientação e empenho no desenvolvimento desta pesquisa e o Dr. Kepler Borges França.

A todos que fazem o Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES).

A todos os professores do mestrado em Engenharia Química, em especial ao professor Dr. Hervé Michel Laborde pela orientação, a João pelo companheirismo, a Sergio por tudo que me ensinou e a Jorge por resolver os problemas técnicos.

Aos amigos Admilson, Kleber, Eraldo e Aldo que me ajudaram na preparação deste trabalho, a Olga, Lourdinha, Sheila, Leoniza e todos os demais colegas do Colégio Panorama pela compreensão e a Maricé pela colaboração prestada durante o curso de mestrado.

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

## RESUMO

O trabalho apresenta os resultados obtidos a partir de um sistema de produção de água potável a partir do processo de dessalinização via osmose inversa e o uso de painéis fotovoltaicos como fonte energética. Analisando a radiação solar para a cidade de Campina Grande, com base em dados fornecidos pelo Atlas Solarimétrico, a Sundata e o Radiasol, uma grande semelhança em seus valores é obtida, o que nos transmite confiabilidade nestes resultados e permite verificar que a região apresenta um alto índice de irradiação solar. Com estes dados, o ano pode ser dividido em dois períodos: verão e inverno. O primeiro período iria de setembro à abril com uma insolação mínima de 7 h por dia e o segundo de maio à agosto com um valor mínimo de 4h de sol por dia. A grande demanda de sol durante o verão nos permite dessalinizar uma quantidade considerável de água, já no inverno como a insolação diminui, a necessidade de água potável pode ser suprida captando água da chuva. O consumo energético de um dessalinizador foi avaliado utilizando o software ROSA 6.1 com uma água de alimentação de concentração variando entre 1.000 e 3.500 mg/L. Com recuperação de 15% e usando-se 1 membrana; obtendo 0,3 m<sup>3</sup>/h de permeado são gastos 2,73 kWh/m<sup>3</sup> de energia e com 2 membranas obtém-se uma vazão dupla gastando 2,81 kWh/m<sup>3</sup>. Já com uma recuperação de 30% este mesmo processo pode ser realizado com uma redução no consumo de energia de 1,45 kWh/m<sup>3</sup> (0,3 m<sup>3</sup> /h) para 1,44 kWh/m<sup>3</sup> na obtenção de 0,6 m<sup>3</sup>/h de permeado. Portanto, este último seria o ideal, pois uma maior quantidade de água potável é obtida com um menor gasto de energia. O dessalinizador solar testado mostrou que, com uma concentração de 3.500 mg/L e uma pressão de 8 kgf/cm<sup>2</sup>, ele produz 0,252 m<sup>3</sup>/h com uma recuperação de 40%. Para isso o sistema necessita de uma potência de 370 W e tem um consumo de energia médio de 1,5 kWh/m<sup>3</sup>. O número de painéis fotovoltaicos utilizados é grande demais em relação à potência consumida pelo motor DC devido à ausência de um sistema “MPP Tracking”, que não é uma das funções do circuito eletrônico. A simulação feita para obtenção do permeado e o gasto de energia, quanto maior a quantidade de permeado obtido maior o número de pessoas atendidas. Quando comparamos os resultados do simulador com os do dessalinizador, percebemos um aumento nos valores práticos.

**PALAVRAS-CHAVE:** osmose inversa, dessalinização, energia solar fotovoltaica.

## ABSTRACT

This work presents the results obtained from a drinkable water production system in a reverse osmosis desalination process with the use of photovoltaic panels as a source of energy. Analyzing the solar radiation for Campina Grande, based on data supplied by Atlas Solamétrico, Sundata and Radasol, great similarity in the figures has been obtained, which gives us a sense of confidence in such results while allowing us to perceive that the region presents a high level of solar irradiation. With these results, the year can be divided into two seasons: summer and winter. The first season would be from September to April, with minimum irradiation of 7 hours per day, and the second would be from May to August, with minimum figure of 4 hours of sunlight per day. The great offer of sunlight during summer allows us to desalinate a big amount of water, whereas in winter, as the sunlight is less available, the need for drinkable water may be satisfied by catching water from rains. The energy consumption of a desalinator was evaluated by means of a ROSA 6.1 software with input water in concentration ranging between 1,000 and 3,000 mg/L. With recovery of 15% and using 1 membrane; obtained 0.3 m<sup>3</sup>/h of permeate 2, 73 kwh/m<sup>3</sup> were consumed and with 2 membranes a double flow rate was obtained consuming 2,81 kwh/m<sup>3</sup>. Yet with a recovery of 30% the same process can be done with a reduction in the consumption of 1, 45 kwh/m<sup>3</sup> (0, 3 m<sup>3</sup>/h) for 1.44 kwh/m<sup>3</sup> in the achieving of 0,6 m<sup>3</sup>/h of permeate. Therefore, the last would be the ideal, for a bigger amount of drinkable water is obtained with a smaller consumption of energy. The solar desalinator showed that with a concentration of 3,500 mg/L and a pressure of 8 kgf/cm<sup>2</sup>, it produces 0.252 m<sup>3</sup>/h with a recovery of 40%. For this the system needs a power of 370 W and it has a medium energy consumption of 1,5 kwh/m<sup>3</sup>. The number of photovoltaic panels used is too big in relation to the power consumed by the DC motor due to the lack of a MPP Tracking, which is not one of the functions of the electronic circuit. The simulation done for obtaining the permeate production and energy consumption, the bigger the amount of permeate obtained, the bigger the number of people assisted. When the results of the simulation and of the desalinator are compared, an increase in the practical numbers is perceived.

Key words: reverse osmosis, desalination, photovoltaic panels.



## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de permeação da membrana
Ca	Concentração da alimentação
CA	Corrente alternada
Cc	Concentração do concentrado
C <sub>p</sub>	Concentração do permeado
CC	Corrente continua
c <sub>i</sub>	Concentração molar do íon i
CV	Destilação por compressão de vapor
E <sub>p</sub>	Consumo de energia prático
E <sub>emp</sub>	Energia empírica consumida
ED	Eletrodialise
FV	Fotovoltaico
h	Hora
H	Altura do nível da coluna de alimentação
I	Corrente elétrica
I	Carga elétrica do íon
J <sub>i</sub>	Fluxo mássico do soluto
J <sub>w</sub>	Taxa de fluxo de permeado
K <sub>w</sub>	Coefficiente de transferência de massa do solvente
k <sub>i</sub>	Coefficiente de transferência de massa do soluto
MSF	Destilação Flash com Múltiplos Estágio
MED	Destilação Múltiplo Efeito
OI	Osiose inversa
P <sub>a</sub>	Pressão de alimentação

Pc	Pressão do concentrado
Pp	Pressão do permeado
P	Potência ativa consumida pelo sistema
Qa	Vazão da alimentação
Qp	Vazão do permeado
Qc	Vazão do concentrado
r	Recuperação do sistema
R	Constante universal dos gases perfeitos
RS	Taxa de rejeição de sais
T	Temperatura absoluta da solução
TDSa	Total de sais dissolvidos na corrente da alimentação
TDSc	Total de sais dissolvidos na corrente do concentrado
TDSp	Total de sais dissolvidos na corrente do permeado
Vca	Tensão de circuito aberto

## SÍMBOLOS GREGOS

$v_i$	Carga elétrica do íon $i$
$\Delta P$	Gradiente de pressão aplicada
$\Delta C$	Gradiente concentração
$\Delta \pi$	Gradiente de pressão osmótica
$\pi$	Pressão osmótica
$\pi_a$	Pressão osmótica de alimentação
$\pi_c$	Pressão osmótica do concentrado
$\pi_p$	Pressão osmótica do permeado
$\eta_b$	Eficiência da bomba
$\eta_m$	Eficiência do motor
$\eta_r$	Eficiência de recuperação do permeado

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Recursos hídricos da terra.....	11
FIGURA 2: Índices percentuais de exclusão elétrica, por região.....	18
FIGURA 3: Fluxos básicos do processo de dessalinização .....	22
FIGURA 4: Processos de dessalinização.....	27
FIGURA 5: Osmose/osmose inversa.....	30
FIGURA 6: Membrana de osmose inversa.....	32
FIGURA 7: Distribuição percentual da radiação solar incidente.....	41
FIGURA 8: Média de insolação anual do Brasil(kW.h/m <sup>2</sup> ).....	42
FIGURA 9: Sistema fotovoltaico básico.....	45
FIGURA 10: Módulo fotovoltaico.....	47
FIGURA 11: Gráfico da corrente elétrica X tensão.....	48
FIGURA 12: Arranjo das células em série.....	49
FIGURA 13: Conexão de células em paralelo.....	50
FIGURA 14: Sistema de dessalinização via osmose inversa e energia solar fotovoltaica.....	61
FIGURA 15: Fotos da unidade dessalinizadora.....	62
FIGURA 16: Fotos de painéis fotovoltaicos.....	63.
FIGURA 17: Média mensal da radiação global diária em Campina Grande em kW.h/m <sup>2</sup> .dia .....	66
FIGURA 18: Insolação média mensal em horas na cidade de Campina Grande .....	67
FIGURA 19: Gráfico da energia em função da pressão para uma recuperação de 15% e 30% Água de alimentação de 1000 mg/L. Simulador ROSA 6.1.....	73
FIGURA 20: Gráfico da energia em função da pressão para uma recuperação de 15% e 30%. Água de alimentação de 1500 mg/L. Simulador ROSA 6.1.....	75
FIGURA 21: Gráfico da energia em função da pressão para uma recuperação de 15% e 30% Água de alimentação de 2000 mg/L.Simulador ROSA 6.1.....	77
FIGURA 22: Gráfico da energia em função da pressão para uma recuperação de 15% e 30%. água de alimentação de 2500 mg/L. Simulador ROSA 6.1.....	79
FIGURA 23: Gráfico da energia em função da pressão para uma recuperação de 15% e 30% água de alimentação de 3500 mg/L. Simulador ROSA 6.1 .....	81



FIGURA 24: Gráfico da obtenção do permeado em função da pressão com 4h e 7h de sol. água de alimentação 2500 mg/L. Simulador ROSA 6.1.....	84
FIGURA 25: Gráfico da obtenção do permeado em função da potência com 4h e 7h de sol. água de alimentação 2500 mg/L, simulador ROSA 6.1.....	84
FIGURA 26: Variação da vazão do permeado em função da pressão aplicada usando o ROSA 6.1. água de alimentação variando de 1.000 a 4.000 mg/L; fator de fouling 0,85 e eficiência da bomba 80%.....	86
FIGURA 27: Variação da recuperação em função da pressão aplicada usando o ROSA 6.1. água de alimentação variando de 1.000 a 4.000 mg/L; fator de fouling 0,85 e eficiência da bomba 80%.....	87
FIGURA 28: Variação da energia em função da pressão aplicada usando o ROSA 6.1. água de alimentação variando de 1.000 a 4.000 mg/L; fator de fouling 0,85 e eficiência da bomba 80%.....	87
FIGURA 29: Variação da potência em função da pressão aplicada usando o ROSA 6.1. água de alimentação variando de 1.000 a 4.000 mg/L; fator de fouling 0,85 e eficiência da bomba 80%.....	88
FIGURA 30: Variação da tensão (V) e corrente (A) do motor em função do tempo. Concentração da água de alimentação variando de 1.000 a 3.000 mg/L; pressão inicial aplicada de 3 a 4 kgf/cm <sup>2</sup> .....	90
FIGURA 31: Variação da potência (W) em função do tempo. Concentração da água de alimentação variando de 1.000 a 3.000 mg/L; pressão inicial aplicada de 3 a 4 kgf/cm <sup>2</sup> .....	91
FIGURA 32: Variação da pressão (kgf/cm <sup>2</sup> ) em função do tempo. Concentração da água de alimentação variando de 1.000 a 3.000 mg/L; pressão inicial aplicada de 4 kgf/cm <sup>2</sup> .....	92
FIGURA 33: Variação da corrente (A) e da tensão (V) em função do tempo. água de alimentação de 3.500 mg/L; pressão inicial aplicada de 8 kgf/cm <sup>2</sup> .....	95
FIGURA 34: Variação da potência em função do tempo. água de alimentação de 3.500 mg/L; pressão inicial aplicada de 8 kgf/cm <sup>2</sup> .....	95
FIGURA 35: Variação da pressão em função do tempo. Água de alimentação de 3.500 mg/L; pressão inicial aplicada de 8 kgf/cm <sup>2</sup> .....	96
FIGURA 36: Variação das vazões do permeado e do concentrado em função do tempo. água de alimentação de 3.500 mg/L; pressão de 8 kgf/cm <sup>2</sup> .....	97
FIGURA 37: Variação do consumo de energia em função do tempo. Água de alimentação de 3.500 mg/L; pressão de 8 kgf/cm <sup>2</sup> .....	97

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Recursos hídricos de alguns países e continentes .....	13
TABELA 2 - Recursos hídricos dos estados brasileiros .....	15
TABELA 3 - Especificações da membrana de osmose inversa.....	62
TABELA 4 - Especificações do painel fotovoltaico.....	63
TABELA 5 - Média mensal da radiação global diária na Cidade de Campina Grande em kW.h/m <sup>2</sup> .dia .....	66
TABELA 6 - Insolação média mensal (horas) na Cidade de Campina Grande – PB (2003 a 2007).....	69
TABELA 7 - Insolação média (horas/dia) na Cidade de Campina Grande – PB .....	70
TABELA 8 - Resultados da simulação do ROSA com uma recuperação de 15% e uma água de alimentação de 1000 mg/L.....	71
TABELA 9 - Resultados da simulação do ROSA com uma recuperação de 30% e uma água de alimentação de 1000 mg/L.....	72
TABELA 10 – Resultados da simulação do ROSA com uma recuperação de 15% e ma água de alimentação de 1500 mg/L.....	73
TABELA 11 – Resultados da simulação do ROSA com uma recuperação de 30% e uma água de alimentação de 1500 mg/L.....	74
TABELA 12 - Resultados da simulação do ROSA com uma recuperação de 15% e uma água de alimentação de 2000 mg/L.....	75
TABELA 13 - Resultados da simulação do ROSA com uma recuperação de 30% e uma água de alimentação de 2000 mg/L.....	76
TABELA 14 - Resultados da simulação do ROSA com uma recuperação de 15% e uma água de alimentação de 2500 mg/L.....	77
TABELA 15 - Resultados da simulação do dessalinizador com uma recuperação de 30% e uma água de alimentação de 2500 mg/l.....	78
TABELA 16 - Resultados da simulação do ROSA com uma recuperação de 15% e uma água de alimentação de 3000 mg/L.....	80
TABELA 17 - Resultados da simulação do ROSA com uma recuperação de 30% e uma água de alimentação de 3000 mg/L.....	80
TABELA 18 - Obtenção do permeado em dois períodos (4h e 7h de insolação) com uma recuperação de 15%.....	82
TABELA 19 - Obtenção do permeado em dois períodos (4h e 7h de insolação) com uma recuperação de 30%.....	83

TABELA 20 - Avaliação fixando as pressões e variando as concentrações.....	85
TABELA.21 - Resultados obtidos com águas sintéticas de 1.000, 2000 e 3.000 mg/L.....	93
TABELA 22 - Comparação entre os dados fornecidos pelo simulador e aqueles encontrados na prática, com uso do dessalinizador.....	99



## Sumário

1	INTRODUÇÃO .....	10
1.1	OBJETIVOS .....	19
1.1.1	Objetivo Geral.....	19
1.1.2	Objetivos Específicos .....	19
1.2	ESCOPO DO TRABALHO.....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
2.1	Dessalinização .....	21
2.2	Breve história da dessalinização .....	22
2.3	Processos de dessalinização.....	24
2.3.1	Processos Térmicos.....	25
2.3.2	Processos de Membranas .....	26
2.3.3	Vantagens da dessalinização via OI.....	29
2.4	Principais equações que regem o processo de osmose inversa.....	32
2.5	Consumo de energia.....	36
2.6	Fontes alternativas de energia.....	37
2.6.1	Energia Solar Fotovoltaica: breve histórico.....	38
2.6.2	Radiação solar.....	40
2.6.3	Conversão fotovoltaica .....	42
2.6.4	Classificação dos Sistemas fotovoltaicos .....	43
2.6.5	Configurações básicas dos sistemas fotovoltaicos.....	44
2.6.6	Sistema de conversão fotovoltaica.....	45
2.6.6.1	Composição .....	45
2.6.6.2	Discrição dos Equipamentos.....	45
2.6.7	Módulo fotovoltaico .....	46
2.6.8	Arranjo dos módulos.....	49
2.6.9	Vantagens do uso das células fotovoltaicas.....	50
2.6.10	Aplicações da energia fotovoltaica.....	51
2.7	Energias renováveis para sistemas de dessalinização.....	51
3	METODOLOGIA .....	53
3.1	Metodologia aplicada à pesquisa .....	60
3.1.1	Especificações do Sistema de Dessalinização via OI.....	60
3.1.2	Especificações do sistema de conversão de energia elétrica .....	62
3.1.3	Procedimento experimental .....	63
4	ANÁLISE DE DADOS .....	65
4.1	Radiação solar global com base no Atlas Solarimétrico, Sundata e Radiasol – Potencial solar.....	65
4.2	Insolação com base em dados meteorológicos da EMBRAPA.....	67
4.3	Avaliação do consumo energético usando o ROSA 6.1 .....	70
4.3.1	Avaliação fixando o permeado e variando as concentrações .....	70
4.3.2	Número de pessoas atendidas em função da estação do ano .....	81
4.3.3	Avaliação fixando as Pressões e variando as concentrações .....	85
4.3.3.1	Gráficos da vazão do permeado, da recuperação, da potência e da energia em função da concentração.....	86
4.4	Resultados do dessalinizador.....	88
4.4.1	Águas sintéticas de 1.000, 2.000 e 3.000 mg/L.....	89

4.4.2	Água sintética de 3.500 mg/L.....	94
4.5	Comparação simulador – dessalinizador solar.....	99
5	CONCLUSÃO .....	100
6	PERSPECTIVAS.....	102
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

## CAPÍTULO I

### 1 INTRODUÇÃO

A presente pesquisa apresenta aspectos técnicos da produção de água potável, via osmose inversa, com a utilização de energia solar fotovoltaica e a avaliação dos sistemas de produção já existentes. A água é um bem vital a sobrevivência humana na Terra, seja como componente bioquímico de seres vivos; como meio de vida de várias espécies vegetais e animais; enquanto elemento representativo de valores sociais e culturais, ou ainda, como fator de produção de vários bens de consumo final e intermediário.

É ela, a substância mais comum e também a mais relevante da face da Terra, porém está cada vez mais escassa no planeta, não na redução do seu volume total, mas devido à poluição e a sua distribuição irregular. Hoje, milhares de pessoas continuam morrendo por sua falta e também, pela sua contaminação. Qualquer processo produtivo consiste em, a partir de um produto bruto que se encontra na natureza de uma forma não pronta para o uso cotidiano (matéria prima) realizar uma série de transformações ou conversões até o deixar pronto para o consumo e isto ocorre também com a água para que se torne potável, ou seja, pronta para o consumo humano.

Estimativas atualizadas calculam que a hidrosfera terrestre cobre 75% da superfície e possui cerca de 1386 milhões de quilômetros cúbicos de água. Desse total, 97,5% de toda esta água se encontra nos oceanos com uma salinidade média de 3% em peso, o que a torna imprópria a qualquer tipo de uso, que seja, agrícola, industrial ou doméstico. Por outro lado, a água doce representa apenas 2,5% de toda hidrosfera, destes apenas 0,3% estão disponíveis na



forma líquida, em rios, lagos, etc. visto que, 0,9% representa a umidade do solo e do ar, 68,9% está na forma sólida nas geleiras em picos de montanhas e nos pólos norte e sul, já os 29,9% restantes estão no subsolo armazenados nos aquíferos (FIGURA 1).

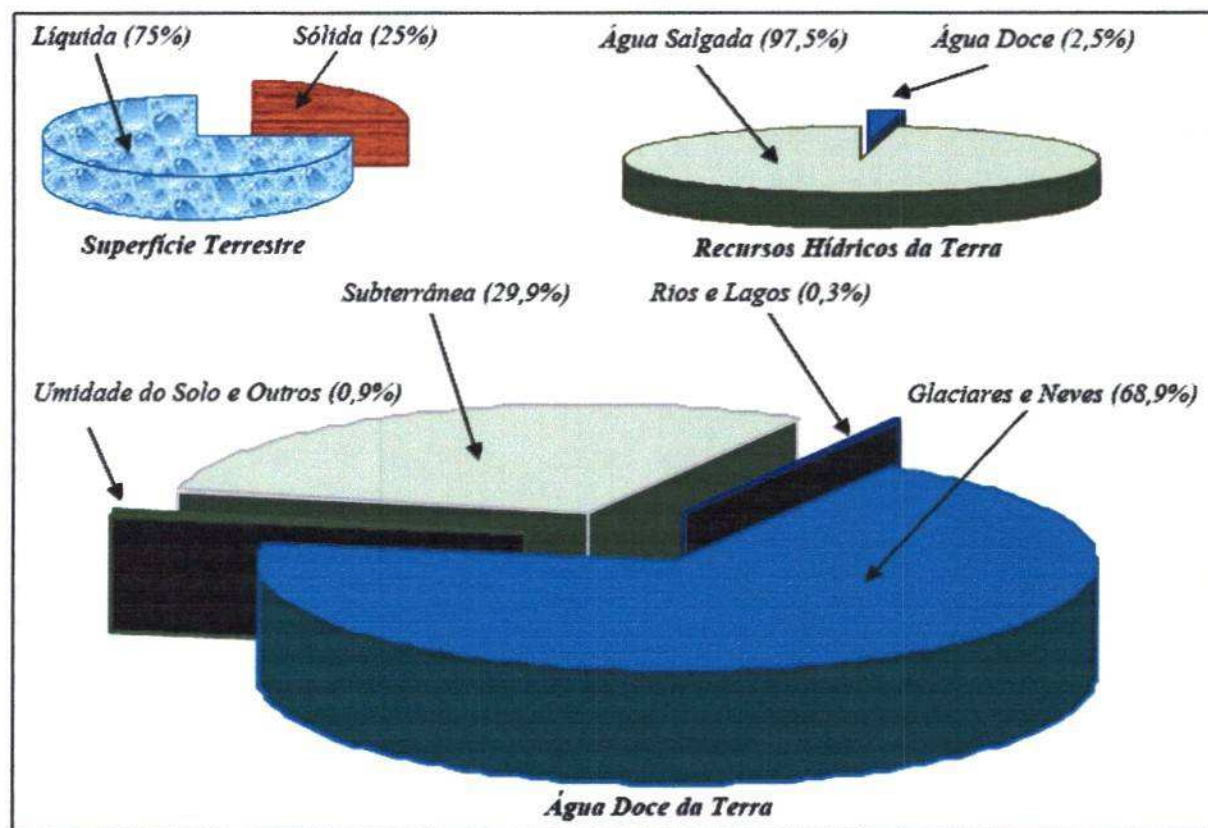


FIGURA 1 - Recursos Hídricos da Terra  
FONTE: UCHE et al., 2002

Os recursos hídricos da terra são formados pelo ciclo hidrológico e estão estimados em 42 723 km<sup>3</sup> a cada ano, portanto temos bastante água, o grande problema é a má distribuição, existindo regiões com muita água, e muitas vezes uma população muito pequena e outras, onde esse recurso é bastante escasso, com uma grande população (TABELA 1).

A situação atual corrobora com a perspectiva de que o mundo está enfrentando uma crise de água. De acordo com a Organização de Alimentos e Agricultura (*Food and Agriculture Organization - FAO*), cerca de 20 países sofriam com problemas de escassez de água no ano de 1990. Em 1996 o problema agrava-se e já tinha atingido 26 países, dados que

correspondem em termos populacionais a um número de 230 milhões de pessoas. De acordo com dados emitidos pelo Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas (*United Nations Environment Programme - UNEP*), estima-se que até 2027, um terço da população do mundo sofrerá sérios problemas com a escassez de água.

A disponibilidade de recursos hídricos na Terra é fortemente afetada pela poluição e pelo incessante crescimento demográfico. Segundo a *Water Management Institute*, devido ao crescimento de 2 a 2,5% da população anualmente nos países em vias de desenvolvimento, a demanda de áreas irrigadas para prover alimentos também cresce implicando em maior consumo de água. Segundo a *World Water Report*, a irrigação é responsável por 70% da água consumida na Terra, as indústrias consomem 22 % e só 8% é para uso doméstico, mas este número pode variar devido à crescente migração populacional do campo para a cidade. Estima-se que 48% da população mundial habita na zona urbana e prevê que 2030 este percentual será aumentado chegando a marca dos 60% (EHRENMAN, 2003).

Segundo a *World Water Report* órgão das Nações Unidas, 1.500 km<sup>3</sup> de águas residuais (poluídas) são diariamente jogadas em rios, lagos, etc. Sabendo que cada litro de água residual polui 8 litros de água potável, então 12.000 km<sup>3</sup> de água são poluídas diariamente, motivo pelo qual 50% da população dos países em vias de desenvolvimento está sujeita à água poluída e cerca de 2,2 milhões de pessoas morrem anualmente por causa de doenças relacionadas com a contaminação da água.

Vejamos agora, como se encontrava a situação de recursos hídricos de alguns países e continentes, em 2002, expressos na TABELA 1, a qual aponta que apenas 6 países: Brasil, Canadá, Rússia, Estados Unidos, China e Índia, detêm a metade dos recursos hídricos renováveis da Terra (UCHE *et alli.*, 2002).



Outra constatação acerca destes seis países, é que eles apresentam uma grande concentração populacional o que lhes impede de ser os onde se enfrenta a crise de água potável com menor intensidade. Verifica-se ainda, com base na TABELA 1, que o país mais abastecido em termos de recursos hídricos por habitante é o Canadá, seguido pela Nova Zelândia, Noruega, Peru.

Essa mesma tabela, traz o Brasil na 7ª posição e, mesmo sendo um país que apresenta-se como um dos grandes reservatórios de água doce do mundo - tem a maior reserva hidrológica do planeta, uma vez que 11, 6 % da água doce disponível, encontra-se aqui, o que corresponde a 53% dos recursos hídricos da América do Sul – é também um dos países que sofrem com a má distribuição de suas reservas hidrográficas em relação as áreas de concentração populacional.

De forma mais nítida, no Brasil, apesar da boa quantidade de água, esta é má distribuída, 80% concentram-se na Amazônia, onde vivem apenas 5 % dos habitantes do país, enquanto que os 20% restantes abastecem 95% dos brasileiros, o que gera insatisfação e sua ausência, se transforma em sinônimo de pobreza e desequilíbrio.

TABELA - 1 Recursos Hídricos de Alguns Países e Continentes

PAÍS OU CONTINENTE	TOTAL (km <sup>3</sup> /ano)	POR HABITANTE (m <sup>3</sup> /ano)
Noruega	384	87.691
Rússia	4.312,7	29.115
Suíça	42,5	5.802
<b>Europa</b>	<b>6.142,9</b>	
Canadá	3.287	120.000
Estados Unidos	2.930	11.500
<b>América do Norte</b>	<b>6.217</b>	
Argentina	270	17.000
Brasil	6.220	45.200
Colômbia	1.200	35.000
Cuba	34,7	3.110
México	345	3.670
Perú	1.100	50.300
Venezuela	856	36.830
<b>América Central e do Sul</b>	<b>10.683</b>	

Argélia	13,87	460
Angola	184	15.376
Camarões	268	18.711
Egito	2,8	43
Guiné	226	29.454
Líbia	0,6	100
Serra Leoa	160	34.957
África do Sul	44,8	1.011
<b>África</b>	<b>3.998,1</b>	
Arábia Saudita	2,4	119
China	2.800	2.231
Emirados Árabes Unidos	0,15	64
Índia	1.850	1.896
Indonésia	2.530	12.251
Japão	547	4.344
Kuwait	0,02	11
Malásia	456	21.259
Turquia	196	3.074
<b>Ásia</b>	<b>12.686,5</b>	
Austrália	343	18.596
Nova Zelândia	313	89.400
<b>Oceania</b>	<b>1.539,3</b>	

FONTE: adaptada de UCHE *et al.* (2002)

A TABELA 2 mostra a distribuição dos recursos hídricos pelos estados do Brasil, onde fica clara a desigualdade da disponibilidade dos mesmos, e que as regiões norte e nordeste são as regiões mais críticas.

Embora nenhum estado se encontre na situação de escassez absoluta, existem alguns como Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Distrito Federal, que se encontram na situação de estresse hídrico periódico e regular.

Como acontece com outros recursos, o problema hídrico do Brasil não é tanto de escassez de um modo geral e sim questões de gerenciamento e distribuição. Em muitas regiões do sertão e em ilhas como Fernando de Noronha a situação é crítica. Segundo a Embrapa, em 1999, 20 milhões de pessoas já eram afetadas pela falta de água potável em 1.000 municípios da região nordeste (EMBRAPA, 1999) e dois anos antes, Fernando de Noronha já tinha um déficit hídrico de 7,5 m<sup>3</sup> por dia (RADIOBRÁS, 1997).

TABELA 2: Recursos Hídricos dos Estados Brasileiros

RECURSOS HÍDRICOS RENOVÁVEIS		
ESTADO	TOTAL (km <sup>3</sup> /ano)	POR HABITANTE (m <sup>3</sup> /ano)
Rondônia	150,2	115.538
Acre	154,0	351.123
Amazonas	1.848,3	773.000
Roraima	372,3	1.506.488
Pará	1.124,7	204.491
Amapá	196,0	516.525
Tocantins	122,8	116.952
Maranhão	84,7	16.226
Piauí	24,8	9.185
Ceará	15,5	2.279
Rio Grande do Norte	4,3	1.654
Paraíba	4,6	1.394
Pernambuco	9,4	1.270
Alagoas	4,4	1.692
Sergipe	2,6	1.625
Bahia	35,9	2.872
Minas Gerais	193,9	11.611
Espírito Santo	18,8	6.714
Rio de Janeiro	29,6	2.189
São Paulo	91,9	2.209
Paraná	113,4	12.600
Santa Catarina	62,0	12.653
Rio Grande do Sul	190,0	19.792
Mato Grosso do Sul	69,7	36.684
Mato Grosso	522,3	237.409
Goiás	283,9	63.089
Distrito Federal	2,8	1.555

FONTE: TUNDISI (2003)

Em conseqüência de todas estas situações aqui descritas, calcula-se que hoje, 1,4 bilhões de pessoas no mundo inteiro não disponham de uma água própria para o consumo. Estima-se que esse número pode aumentar para 2,5 bilhões nos próximos 25 anos, caso as pessoas não tomem par da real situação dos recursos hídricos do planeta e não se conscientizem da gravidade da situação, o que pode gerar tensões políticas. Por outro lado,



muitos são os autores que já falam em dessalinizar a água do mar para evitar uma possível guerra da água, alertando para a necessidade de se agir antes que seja tarde.

A variação climática que ocorre nos nove estados que integram à Região Nordeste - Maranhão, Piauí, Ceará, Alagoas, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Sergipe e Bahia - ao longo de cada ano, é um dos parâmetros responsáveis pela falta de água para o consumo humano, acarretando em um dos problemas sociais e econômicos da região. Isto se deve ao fato desta região ser caracterizada por condições semi-áridas, apresentando em sua formação litológica, cerca de 90% do território nordestino é constituído por rochas cristalinas (fendas/fratura) e apenas 10% formado por rochas sedimentares.

Esse tipo de caracterização pode afetar a forma da distribuição dos recursos hídricos, uma vez que esses tipos de solo 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 permanência das águas percoladas nos aquíferos, o que de certa forma vem contribuir para a salinização dos mananciais hídricos ao longo do tempo.

As águas subterrâneas têm sido mais exploradas pelo homem, em busca de soluções para estas questões, mas constata-se que tais águas pertencentes as áreas do “polígono das secas”, devido ao seu alto grau de salinidade, tornam-se impróprias para o consumo; seja humano, animal ou uso de irrigação. O problema se agrava ainda mais, no período de longa estiagem visto que, atualmente, a distribuição do consumo de água é da seguinte forma: 70 % é usada na agricultura e 20 % na indústria e apenas 10 % é de uso residencial (KALOGIROU, 2005).

Além de medidas convencionais para aumentar a oferta de água potável, tais como a construção de cisternas e açudes, o uso de dessalinizadores, tem despertado grande interesse.

Os poços artesianos, principalmente os das bacias cristalinas, no caso do nosso semi-árido, apresentam-se na sua grande maioria com água salobra que, uma vez dessalinizada, torna-se uma excelente solução. Esses fatores fizeram com que muitos países, principalmente os mais desenvolvidos tecnicamente, investissem maciçamente nas pesquisas de dessalinização, com destaque para a Inglaterra, EUA, França, Israel, Japão e Alemanha.

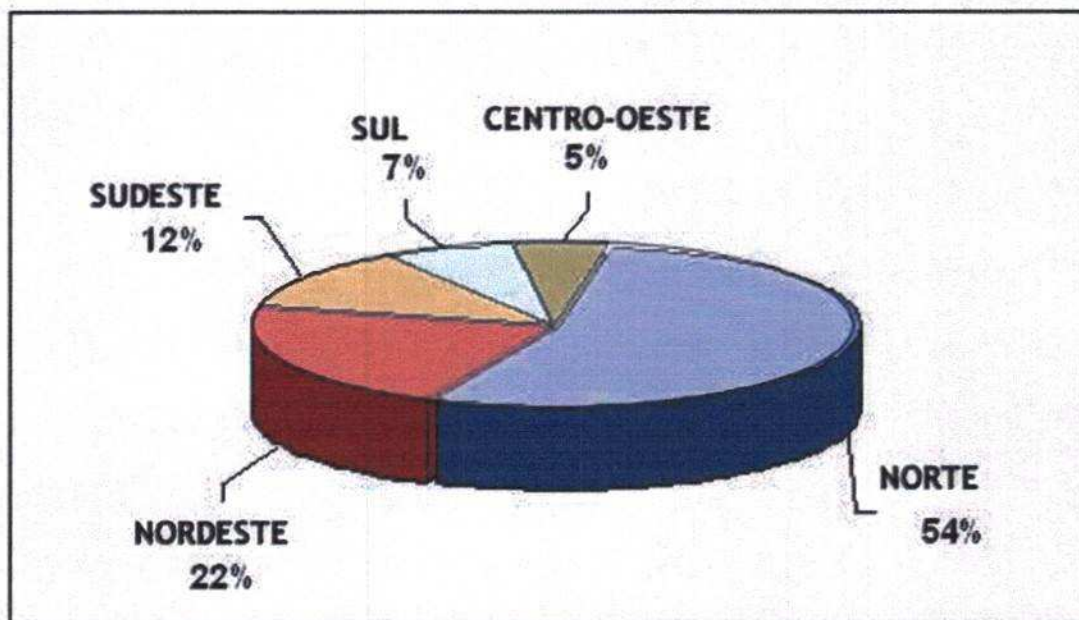
Hoje, visando-se diminuir o índice de concentração de sais e tornar a água potável, já existem várias técnicas de dessalinização, sendo que o processo mais utilizado é a chamada osmose inversa. (PESTANA, *et al*, 2004). A osmose inversa (OI) caracteriza-se como uma técnica de filtração que remove os 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. Considera-se que 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.

O acesso à energia é base importante da existência humana; essencial à satisfação de necessidades básicas como, alimentação, vestuário, habitação e também de mobilidade e de comunicação. Porém, a dependência mundial da queima de combustíveis fósseis para a geração de energia e suprimento de uma demanda sempre crescente, tanto nos países industrializados como naqueles em desenvolvimento, já ameaça a estabilidade ecológica da Terra. Ao mesmo tempo, em que os conflitos pela distribuição das últimas reservas destes recursos não renováveis ameaçam a sociedade civil.

O programa LUZ PARA TODOS, do Governo Federal instituído com o desafio de acabar com a exclusão elétrica no país, tem como objetivo levar energia elétrica para o meio rural até 2008. A FIGURA 2 apresenta o percentual de domicílios rurais não atendidos nas cinco regiões do Brasil, e aponta que as regiões Norte e Nordeste são as mais carentes, pois apresentam os seguintes percentuais: Norte (54%) e Nordeste (22%), as demais regiões, mais



servidas, apresentaram os seguintes percentuais: Sudeste (12%), Sul (7%) e Centro-Oeste (5%) (MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2006).



**FIGURA 2** Índices percentuais de exclusão elétrica por Região.  
FONTE: (MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2006).

De certo que o isolamento de algumas comunidades no interior do Nordeste, além do alto teor de sais na água, fazem com que elas fiquem sem acesso a água de boa qualidade e sem energia elétrica. Para ultrapassar estes obstáculos, as fontes de energia alternativa, também denominadas de fontes renováveis, como solar e eólica, são consideradas inextinguíveis, limpas, com mínimo impacto ambiental, apresentando na atualidade uma contribuição energética cada vez mais significativa, logo, podem ser usadas para sistemas de dessalinização (FRANÇA *et al.*, 2000) em áreas remotas e áridas / semi-áridas (MOHSEN *et al.*, 2001).

Esses recursos renováveis são 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).

A conversão fotovoltaica é hoje uma tecnologia madura e competitiva para pequenas instalações em locais remotos, onde podem ter um vasto campo de utilização em projetos de eletrificação rural, abastecimento de água, irrigação, agroindústria, comunicações e bombeamento de águas. 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.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Avaliar um sistema de produção de água potável a partir do processo de dessalinização via osmose inversa e da matriz energética solar da região, fazendo uso de painéis fotovoltaicos.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo geral, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um banco de dados da fonte energética solar no município de Campina Grande – PB.

- Caracterizar um dessalinizador via osmose inversa e energia solar fotovoltaica, em termos de consumo de energia, em função de vários parâmetros: concentração de água de alimentação, número de membranas, recuperação, etc.
- Avaliar a produção de água potável versus consumo de energia.

## 1.2 ESCOPO DO TRABALHO

Em termos de divisão estrutural, optou-se pela divisão do trabalho em capítulos, da seguinte maneira:

- **No capítulo I**, encontra-se a introdução, os objetivos e a organização do trabalho.
- **No capítulo II**, está descrita a revisão bibliográfica, a qual aborda as tecnologias de dessalinização, dando ênfase à osmose inversa, a energia solar fotovoltaica.
- **No capítulo III**, apresenta a parte experimental, descrevendo os materiais selecionados para o desenvolvimento da pesquisa e o procedimento metodológico.
- **No capítulo IV**, são apresentados e discutidos os resultados esperados.
- **No capítulo V**, têm-se as conclusões parciais.
- **No capítulo VI**, verifica-se a apresentação das perspectivas para a conclusão final da pesquisa.
- **No capítulo VII**, são descritas as referências bibliográficas.



## **CAPÍTULO II**

### **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo está disposta a teoria visitada e necessária à realização da pesquisa, nele são apresentados conceitos e características de temas como: dessalinização, osmose, osmose inversa, processos térmicos, fontes de energia renovável e energia fotovoltaica, na perspectiva de vários autores.

#### **2.1 DESSALINIZAÇÃO**

A água que se encontra na natureza, muitas vezes, tem uma salinidade muito alta tornando-a imprópria para o consumo. Esta água é aqui chamada de água bruta. A dessalinização tem por objetivo eliminar ou diminuir esta salinidade da água bruta deixando-a própria para o consumo.

A água dessalinizada é também chamada de água doce ou água potável. No processo de dessalinização não se obtém o sal como subproduto. O sal extraído sai no fluxo de salmoura (rejeito), a FIGURA 3. Mostra os principais fluxos do processo.

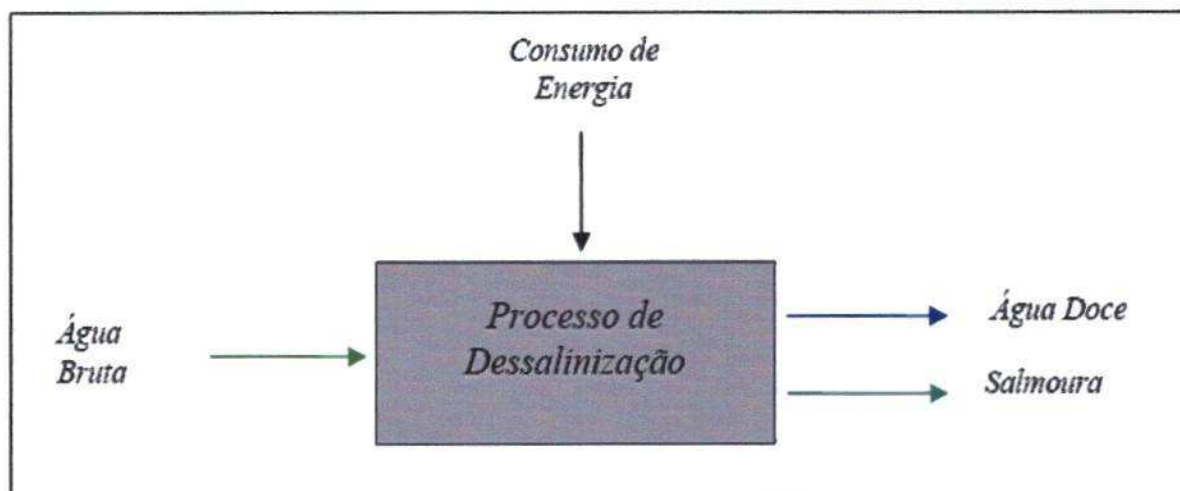


FIGURA 3: Fluxos Básicos do Processo de Dessalinização  
FONTE: Pesquisa de dados

Da água bruta que entra no dessalinizador, uma parte sai em forma de água doce ou potável que chamamos permeado e a outra chamada concentrado é devolvida à natureza. O concentrado ou salmoura é uma água mais salgada (ou mais concentrada) que a água bruta, considerada um resíduo ou rejeito do processo. A dessalinização é caracterizada pelo alto consumo de energia, que dependendo do processo pode ser totalmente na forma de eletricidade ou predominantemente na forma de calor, já que há sempre um consumo elétrico para o bombeamento e para os equipamentos auxiliares.

## 2.2 BREVE HISTÓRIA DA DESSALINIZAÇÃO

À vontade e a necessidade de separar o sal da água para aproveitar a grande reserva de água contida nos oceanos, reduzir a salinidade das águas salobras e reaproveitamento das águas residuais começou a ter resultados na Grécia antiga onde foram definidos os princípios para separação de sal e água. A partir daí começaram-se os esforços com vista a viabilizá-los tecnicamente até que no século XVI se utilizaram alambiques, ainda que rudimentares, para a obtenção de água doce nos barcos.

O fenômeno da osmose começou a ser estudado a mais de duzentos anos e é de fundamental importância na natureza, já que o transporte seletivo através de membranas é essencial à vida. Em 1748 o abade francês Abbe Nollet fez o primeiro estudo relativo a fenômenos de OI com uso de membranas, usou uma bexiga de origem animal. (LONSDALE, 1982).

Em 1855, 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.

No ano de 1867 por Moritz Traube desenvolveu a primeira membrana sintética. (TRAUBE, 1867). Porém, 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. Posteriormente, 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).

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, 1992).

Entre os anos (1960-1962), Loeb e Sourirajan, 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, a qual podia



aumentar muito o fluxo do permeado de água, mantendo elevada a retenção de sais. (HARBERT *et al.*, 1997).

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

Nos 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 à ampliação do seu mercado e, por conseguinte, a escala de produção.

### 2.3 PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO

A dessalinização de água do mar e água superficial vem sendo utilizada ao longo de 40 anos. Os processos de dessalinização surgiram com o objetivo de remover os sais da água, tornando-a potável. No final de 2001, a capacidade de plantas instaladas no mundo era de aproximadamente 33 mil m<sup>3</sup> por dia. A região do Golfo Pérsico é onde se encontra o maior número de dessalinizadores, cerca de 65%, devido a grande escassez de água potável. Hoje, o número de plantas instaladas no mundo já é bem superior ao ano de 2001, devido aos contrastes climáticos dos últimos tempos.

De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS), o limite de salinidade permissível para água potável é de 500 mg/L podendo chegar em alguns casos a 1.000 mg/L. (KALOGIROU, 2005). A água é classificada em quatro grupos: **águas doces** (concentração de 0 – 1.000 mg/L), **salobras** (concentração de sais de 1.000 – 10.000 mg/L), **salinas** (concentração de sais de 10.000 – 100.000 mg/L) e **salmouras** (concentração acima de 100.000 mg/L). (FAURE, 1991; KAHDIM *et al*, 2003).

As membranas sintéticas semipermeáveis são usadas em aplicações industriais desde a década de 1980, 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 diferentes tecnologias de dessalinização, as quais são divididas em dois grupos de acordo com as características do processo: Processos térmicos, no qual a água é submetida à mudança de fase, e o processo de membranas, onde não há mudança de fase.

### 2.3.1 Processos Térmicos

Estes processos se utilizam o princípio da destilação para a purificação de águas. Isto é, quando uma solução salina é aquecida, durante a mudança de fase da água, os sais dissolvidos, por serem relativamente não-voláteis, permanecem na solução à medida que a água evapora, na seqüência do processo, o vapor é condensado em uma superfície fria, gerando água doce. (EL-DESSOUKY, 2002). Os principais processos térmicos são:

- **Destilação Flash com Múltiplos Estágios (MSF)** é um processo onde a energia consumida é predominantemente na forma de vapor ficando a energia elétrica e/ou mecânica apenas para o bombeamento e outros equipamentos auxiliares.

- **Destilação Múltiplo Efeito (MED)** a evaporação acontece sob vácuo usando o calor de condensação do vapor de água anteriormente gerado a partir da evaporação de parte da água pura existente na solução.
- **Destilação por compressão de vapor (CV)** é um processo totalmente elétrico, ou seja, toda a energia consumida é em forma de eletricidade.

### 2.3.2 Processos de Membranas

O desenvolvimento de novos tipos de membranas mais seletivas e mais permeáveis e ainda tornaram-se mais competitivas, devido principalmente, ao surgimento das tecnologias de separação por membranas. Em muitas áreas de atividade, estas tecnologias têm custos de capital e de funcionamento inferiores aos dos processos de separação clássicos.

As membranas começaram a ser utilizadas em vários processos industriais, ao longo dos últimos 30 anos, como agentes de separação de componentes, a sua aplicabilidade tem se alargado com o tempo e atualmente os processos de separação por membranas são utilizados em diversas áreas, sendo a melhor opção para tratamento de água sem a utilização de produtos químicos. Os principais processos de membranas são:

- **Osmose inversa (OI).** Uma pressão maior que a pressão osmótica permite a passagem da água doce e os sais ficam retidos na membrana.
- **Eletro diálise (ED).** Permite a desmineralização de águas salobras fazendo com que íons de sinais diferentes se movam para locais diferentes, graças a um campo elétrico criado por uma diferença de potencial.



Dentre os diversos processos de dessalinização, os mais usados são a OI e a destilação flash com múltiplo efeito (MED), no qual o mercado é de 62.0% e 14.0%, respectivamente, a capacidade instalada no mundo. (TZEN, 2003).

Para água salobra, a técnica mais utilizada é OI e, para água do mar, os processos térmicos. Porém, nos últimos anos, o baixo consumo de energia, a baixa temperatura de operação e o custo de produção de água fizeram com que a OI tivesse um aumento significativo no mercado para a dessalinização da água do mar, devido os significativos progressos na tecnologia de membranas e nas vantagens que esta tecnologia oferece com relação aos processos térmicos de dessalinização MSF e MED (FIGURA 4).

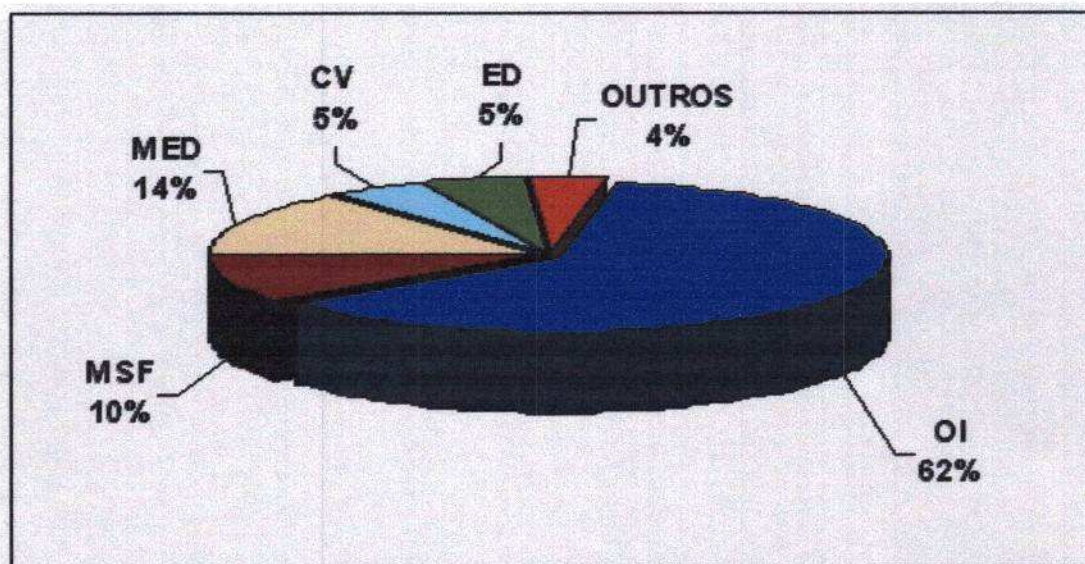


FIGURA 4: Processos de dessalinização  
FONTE: TZEN (2003).

Principais fatores que podem afetar o desempenho de um processo de dessalinização de OI:

- A condição da água bruta e o efetivo procedimento do pré-tratamento
- Membrana: tipo, tamanho e número de módulos usado e o arranjo

- A taxa e o grau de incrustação (*fouling*) e habilidade de limpeza
- As condições de operação, como pressão, temperatura e recuperação do permeado.
- A eficiência da bomba (alta pressão e bomba auxiliar) e o sistema de recuperação de energia.

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. O processo de OI apresenta um consumo de energia inferior aos outros processos de dessalinização. (CHILDS et al., 1999 e MORENO, 2004).

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).

A OI é considerada como o processo de dessalinização mais atrativo comercialmente 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. Os países do Oriente Médio usam a tecnologia de dessalinização representando mais de 50% da capacidade do mundo, seguido, a América do Norte com 19%, a Europa com 13%, a Ásia com 12% e a África com 6% (TSIOURTIS, 2001).



### 2.3.3 Vantagens da dessalinização via OI

A OI é um método de dessalinização de grande sucesso, aplicado para água do mar, água salobra e água industrial. (ABDEL-JAWAD *et al.*, 2002). Para o processo ocorrer, depende das propriedades da 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, além de micro solutos dissolvidos com peso molecular inferior a 500 g/mol, reduzir da água:

- Sais e dureza;
- Microorganismos em geral e patogênicos em particular;
- Turbidez;
- Compostos orgânicos;
- Pesticidas;

A maioria dos contaminantes presentes, 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, 1996).

A osmose inversa tem se mostrado como um dos processos da atualidade mais modernos 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 ultra pura, 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 à 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 2.2). 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; KALOGIROU, 2005).

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 5). A água obtida é denominada de permeado, ou produto, e a solução concentrada de concentrado, ou rejeito. (JOYCE *et al.*, 2001).

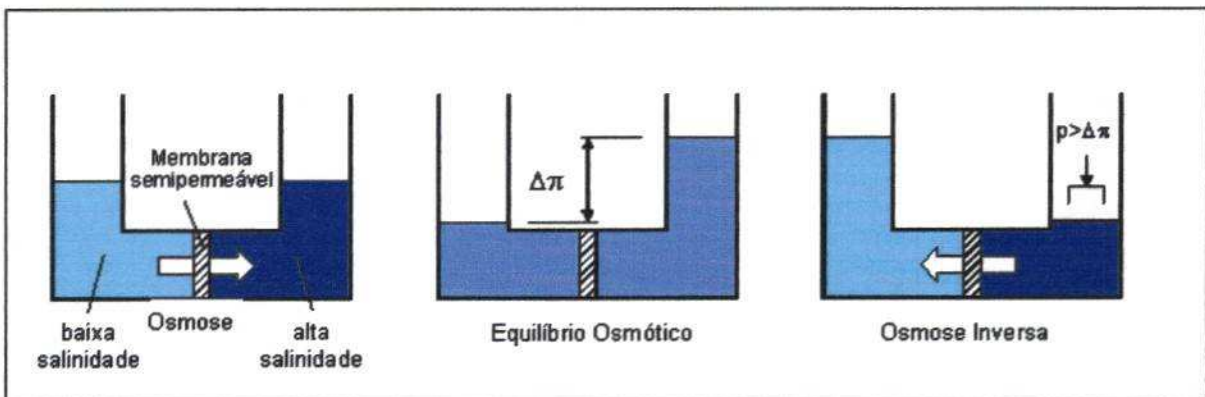


FIGURA 5: Osmose/osmose inversa  
FONTE: MALLEVIALLE *et al.* (1996).

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 17  $\text{kgf/cm}^2$  (1.724 kPa) a 27  $\text{kgf/cm}^2$  (2.758 kPa) e para a água do mar essa pressão é na faixa de 54  $\text{kgf/cm}^2$  (516 kPa) a 68  $\text{kgf/cm}^2$  (6.895 kPa). (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; KAHDIM *et al*, 2003). No modelo de fibras ocas a água afluyente, 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, que tem a função de manter as membranas separadas promovendo um caminho de fluxo que provoca turbulência, diminuindo assim problemas de incrustações. (SUDAK, 1990). Este conjunto é ligado a um tubo perfurado, localizado numa das extremidades do envoltório da membrana. Toda a estrutura do envoltório da membrana é enrolada em torno do tubo, ao modo de “rocambole” (FIGURA 6), 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. (SCHWINGE *et al*, 2004).





**FIGURA 6.** Membrana de Osmose Inversa  
FONTE: UCHE *et al.*, 2002

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

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:

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

Na qual  $\pi$  é a pressão osmótica,  $v_i$ , a carga elétrica do íon  $i$ ,  $c_i$ , a concentração molar,  $R$ , a constante universal dos gases perfeitos e  $T$ , a temperatura absoluta da solução. Esta equação é válida para soluções diluídas, para soluções concentradas ela é multiplicada por um coeficiente osmótico que é estimado de dados de pressão de vapor ou do ponto de

congelamento da solução avaliada. Para propósitos, a equação de Van't Hoff pode ser usada para água salobra. (AMJAD, 1993).

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, é dado pela seguinte equação:

$$J_w = k_w(\Delta P - \Delta\pi) = Q_p/A \quad \text{II}$$

Na qual  $J_w$  é a taxa de fluxo de permeado,  $K_w$ , o coeficiente de transferência de massa do solvente,  $\Delta P$ , o gradiente de pressão aplicada,  $\Delta\pi$ , o gradiente de pressão osmótica,  $Q_p$ , a vazão do permeado e  $A$ , 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 e JACOBS, 1996). Logo, o fluxo do concentrado pode ser representado por:

$$J_i = k_i\Delta C = Q_p C_p/A \quad \text{III}$$

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

$$\Delta P = (P_a + P_c) / 2 - P_p \quad \text{IV}$$

$$\Delta\pi = (\pi_a + \pi_c)/2 - \pi_p \quad \text{V}$$

$$\Delta C = (C_a + C_c)/2 - C_p \quad \text{VI}$$



$P_a$ ,  $P_c$  e  $P_p$  são a pressão de alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente,  $\pi_a$ ,  $\pi_c$  e  $\pi_p$  são a pressão osmótica da alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente, e  $C_a$ ,  $C_c$  e  $C_p$  são a concentração da alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente.  $\Delta\pi$  pode ser dado ainda por:

$$\Delta\pi = [(TDS_a + TDS_c)/2 - TDS_p] \quad \text{VII}$$

TDSa, TDSc e TDSp representam o total de sais dissolvidos na corrente da alimentação, na corrente do concentrado e na corrente do permeado, respectivamente. (MALLEVIALLE *et al.*, 1986). A taxa de rejeição de sais (RS) refere-se à capacidade da membrana de rejeitar sais dissolvidos durante a permeação da água (CHEN *et al.*, 1997). Devido à água e os sais terem taxas de transferência de massa diferentes, ocorre o fenômeno da rejeição dos sais.

$$RS(\%) = [(C_a - C_p)/C_a] * 100 \quad \text{VIII}$$

A taxa de remoção de sais (RS) 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.

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:

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

Na qual  $r$  é o nível de recuperação do sistema,  $Q_p$ , a vazão do permeado e  $Q_a$ , a vazão da alimentação. 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:

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

$C_r$  e  $C_a$  são as concentrações de sais dissolvidos na corrente do concentrado (ou rejeito) e na corrente de alimentação, respectivamente, e  $r$ , o nível de recuperação do sistema.

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. 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:

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

Na qual  $E_{emp}$  é a energia empírica consumida ( $\text{kWh/m}^3$ ),  $H$ , a altura do nível da coluna de alimentação (m),  $\eta_r$ , a eficiência de recuperação do sistema,  $\eta_b$ , a eficiência da bomba,  $\eta_m$ ,

a eficiência do motor, e 0,00315, o fator de conversão de energia para plantas de osmose inversa para kWh/m<sup>3</sup> (MALLEVIALLE *et al.*, 1996).

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

$$E_p = \frac{P}{Q_p} \quad \text{XII}$$

Na qual  $E_p$  é o consumo de energia prático (kWh/m<sup>3</sup>),  $P$ , a potência ativa consumida pelo sistema (W) e  $Q_p$ , a vazão do permeado (m<sup>3</sup>/h). A potência ativa consumida pelo sistema é dada por:

$$P = V * I \quad \text{XIII}$$

Na qual  $V$  é a tensão elétrica (Volt) e  $I$ , a corrente elétrica (Ampère)

## 2.5 CONSUMO DE ENERGIA

A maior parte do consumo de energia em um sistema de dessalinização, é representada pela parcela necessária para transferir as espécies iônicas da solução através das membranas e àquela desprendida para bombear as soluções da unidade de dessalinização. (MALLEVIALLE *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 kgf/cm<sup>2</sup>; 24,8 kgf/cm<sup>2</sup> e 29 kgf/cm<sup>2</sup>, bombas de alta pressão podem operar até 86,4 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. (MALLEVIALLE *et al.*, 1996).

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 a equação XI.

O consumo de energia experimental pode ser obtido através da equação XII (PERRY & GREEN, 1997). A potência ativa consumida pelo sistema é dada pela Lei de Ohm, equação XIII.

## 2.6 FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA

A energia tem sido através da história a base do desenvolvimento das civilizações. Nos dias atuais são cada vez maiores as necessidades energéticas para a produção de alimentos, bens de consumo, bens de serviço e de produção, lazer, e finalmente para promover o desenvolvimento econômico, social e cultural.

Hoje se fala muito em "energias alternativas" que são as energias renováveis, capazes de substituir o modelo energético tradicional, tanto pela sua disponibilidade (presente e futura) garantida (diferente dos combustíveis fósseis que precisam de milhares de anos para a sua formação), como pelo seu menor impacto ambiental.

Para energias "renováveis" a ciência vem pesquisando um grande número de tecnologias, baseadas nos benefícios ambientais (locais e globais), na distribuição natural, na geração de empregos, segurança de suprimento, etc. O interesse pela geração de energia a partir de fontes renováveis, principalmente as alternativas (energia solar, energia eólica e biomassa), vem experimentando uma nova fase de crescimento no Brasil. Até bem pouco tempo, o apelo ambiental era o único argumento utilizado para incentivar tais fontes, não sendo, no entanto, suficiente para atingir seu objetivo.

Em 2001, com a crise de energia elétrica, o Brasil teve que implantar um plano de racionamento de energia. Durante a crise chamou-se a atenção para um outro fator importante: a necessidade de diversificar as fontes de geração de energia. Como resultados, vêm sendo criados mecanismos legais para regulamentar o uso destas fontes, tal como a lei que cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, mais conhecido como PROINFA. (PROINFA, 2006).

Este programa tem, entre outros objetivos, o de incentivar a geração de energia elétrica a partir da energia eólica, da biomassa e de pequenas centrais hidroelétricas. O termo fonte alternativa de energia não deriva apenas de uma alternativa eficiente, ele é sinônimo de uma energia limpa, pura, não poluente, a princípio inesgotável e que pode ser encontrada em qualquer lugar pelo menos a maioria na natureza. .

### **2.6.1 Energia Solar Fotovoltaica: breve histórico**

Fim do século XIX primeiros registros sobre a conversão direta de energia solar em energia elétrica, em 1890, Henrich Hertz, descobre o efeito fotoelétrico enquanto testava a teoria eletromagnética da luz proposta por Maxwell. De 1914 a 1945, entre as duas grandes guerras mundiais, países como EUA, Alemanha, França e Inglaterra fizeram um esforço significativo na busca de materiais de interesse para a conversão fotovoltaica, principalmente o Se e o  $Cu_2O$ . (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 que “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 tornou-se possível, mas também, um grande impulso para a tecnologia do transistor e a moderna indústria eletrônica.

Em 1955, em Phoenix, no Arizona, ocorreu a primeira apresentação pública de células fotovoltaicas para a conversão de eletricidade. Entre 1955 e 1959, as células de silício já começaram a ser comercializadas. A partir de 1958, as células de silício tornaram-se quase a fonte exclusiva de energia para os satélites quando o primeiro foi lançado, o Skylab. A razão do tremendo sucesso das células solares para a Astronáutica é que os conversores solares tenham uma massa menor 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.

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. Segundo Raluy (2005), a energia fotovoltaica é a fonte de energia do futuro. Uma das razões para isto é a quantidade de energia (luz) que recebemos a cada ano do sol (RALUY *et al*, 2005).

Países como França, Japão, Rússia, Argélia, Índia, EUA, Canadá, Chile, etc, mantêm hoje muitas instalações solares. Algumas universidades brasileiras (UFRJ, UNICAMP, UFPB, UFCG, UFPE, UFSC, USP, UFCE), desenvolvem estudos sobre o aproveitamento da



energia solar. Segundo Raluy (2005), a energia fotovoltaica é a energia do futuro. Uma das razões é a quantidade de energia solar que recebemos diariamente.

Em nosso país temos vários bons exemplos deste uso; no Paraná a aldeia dos índios Wai-Wai possui 12 módulos de painéis solares com potência de 540 W, que bombeiam 10 mil litros de água e permitem a iluminação das habitações indígenas. Na Amazônia 600 moradores da comunidade Céu de Mapiá, bastante isolada, recebe energia de painéis solares.(TORRES, *et al.*,2001)

### 2.6.2 Radiação solar

A luz solar é uma radiação eletromagnética - energia de muitos comprimentos de ondas diferentes emitida pelo Sol – que, atravessa o espaço com uma velocidade, de cerca de 300 000 km/s (velocidade da luz). Essa energia fornece a luz e o calor de que necessitamos, porém nem toda a radiação solar penetra na atmosfera.

Apenas 25% da radiação solar penetra diretamente na superfície da Terra sem nenhuma interferência da atmosfera, constituindo a radiação direta ou incidente, mesmo sendo esta bastante transparente. Outra parte é a radiação difusa, gerada pelos efeitos da dispersão dos componentes da atmosfera. Uma superfície inclinada recebe ainda radiação refletida pelo solo ou objetos próximos, a soma da radiação direta, difusa e refletida resulta na radiação global (FIGURA 7).

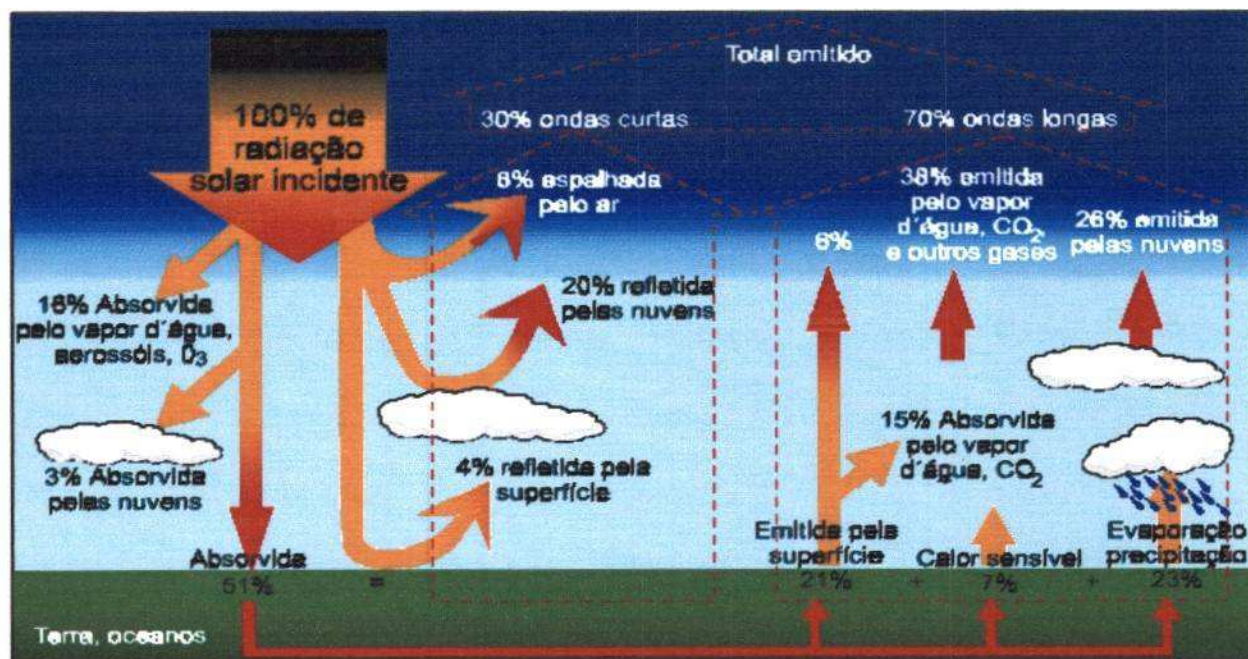


FIGURA 7: Distribuição percentual da radiação solar incidente  
FONTE: Sundata 2007.

- Radiação direta:** é proveniente diretamente do sol, sem sofrer nenhuma mudança de direção, além da provocada pela refração atmosférica.
- Radiação difusa:** provém das reflexões nas massas de ar e nas nuvens. A sua potência é cerca de 10 vezes mais fraca do que a radiação direta, dependendo da opacidade das nuvens.
- Radiação refletida:** surge da reflexão dos raios solares em superfícies claras (neve, areia, parede, etc.). Ocorre na interface entre dois meios diferentes, quando parte da radiação que atinge esta interface é enviada de volta.

Para a medição da radiação global o instrumento mais utilizado é o piranômetro, que registra os valores da radiação em intervalos de tempo determinados que em geral, são armazenados em valores horários ou diários. A irradiância é o termo dado à quantidade de fluxo que atravessa uma superfície por unidade de área, ou seja, potência por unidade de área



( $W/m^2$ ). A irradiação é a quantidade de energia que atravessa uma superfície durante um intervalo de tempo por unidade de área ( $Wh/m^2$ ).

O nível de irradiância na terra atinge um total aproximado de  $1000 W/m^2$  ao meio-dia, em boas condições climáticas, independente da localização. Ao adicionar a quantidade total da radiação solar que incide na superfície terrestre durante o período de 1 ano, obtém-se a irradiação global anual ( $Wh/m^2$ ).

Analisando a FIGURA 8 podemos observar que o mapa mostra o potencial solar de diversas regiões do Brasil em horas de insolação diária (média anual). Quanto maior o número médio de horas, maior será a capacidade de geração de energia  $kWh/m^2$ . (ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL, 2005).

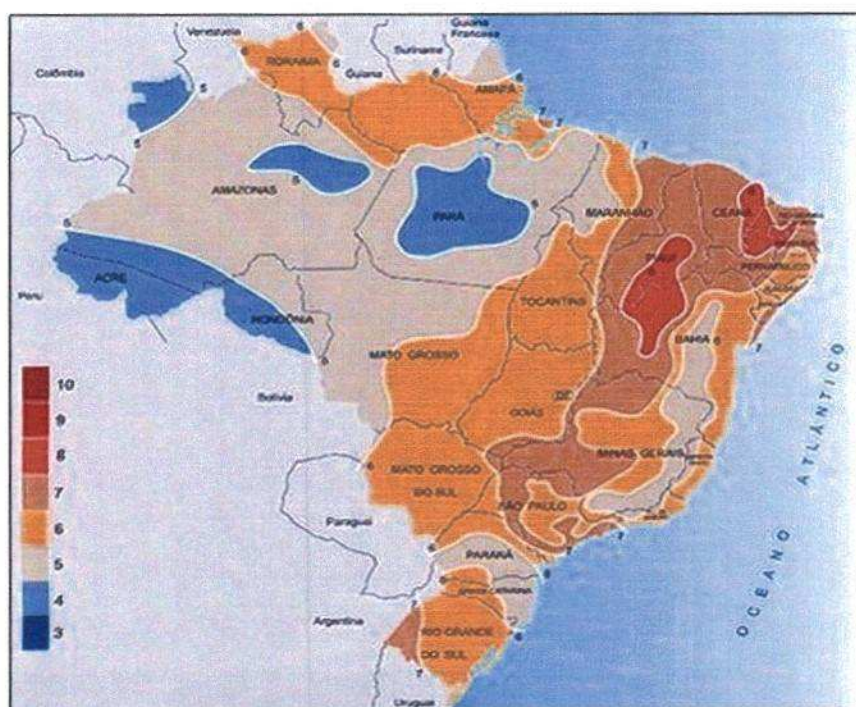


FIGURA 8: Média de insolação anual do Brasil ( $kWh/m^2$ )  
FONTE: Atlas Solarimétrico do Brasil

### 2.6.3 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).

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).

Dentre os diversos semicondutores utilizados para a produção de células solares fotovoltaicas, destacam-se os de silício mono cristalino, poli cristalino e amorfo, o telureto de cádmio (CdTe) e os compostos relacionados ao diselenieto de cobre e índio (CuInSe<sub>2</sub> - CIS). (RODRIGUES *et al*, 2005). 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), é barato, não apresentam toxicidade (SHAH, 1992), sua eficiência está próximo dos 12%, por isso, vem sendo o elemento mais comercializado para a produção de eletricidade através do efeito fotovoltaico (CHILDS *et al*, 1999).

#### 2.6.4 Classificação dos Sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três categorias principais:

- **Isolados:** Quando o sistema é puramente fotovoltaico, ou seja, não é interligado a rede elétrica comercial.
- **Híbridos:** Quando o sistema não se restringe somente à geração fotovoltaica.

- **Conectados à rede elétrica.** São sistemas que estão conectados diretamente à rede elétrica.

## **2. 6.5 Configurações básicas dos sistemas fotovoltaicos**

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 (corrente contínua) sem armazenamento:** a corrente elétrica é usada no instante em que está sendo convertida em equipamentos operados por corrente contínua.
- **Sistemas com carga CC com armazenamento:** o sistema armazena energia em baterias para que a mesma possa ser usada em momentos que não esteja havendo conversão fotovoltaica ( à noite por exemplo) .
- **Sistemas com carga CA (corrente alternada) sem armazenamento:** é usado um conversor de corrente elétrica para converter a corrente de contínua em alternada, quando o sistema operar com equipamentos que funcionem com esse tipo de corrente.
- **Sistemas com carga CA com armazenamento:** este sistema opera idêntico sistema anterior apenas com a diferença de necessitar do uso de baterias para o armazenamento da corrente de um inversor e de um controlador de carga.

## 2.6.6 Sistema de conversão fotovoltaica

### 2.6.6.1 Composição

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 (FIGURA 9).



FIGURA 9: Sistema fotovoltaico básico  
FONTE: Pesquisa de dados

### 2.6.6.2 Descrição dos Equipamentos

**MÓDULO FOTOVOLTAICO** - É a unidade básica de todo sistema de geração de eletricidade fotovoltaica.

**BATERIAS** – é o meio mais habitual de armazenar a energia 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, sendo que uma parte desta energia pode ser armazenada pelo banco de baterias e a outra parte é utilizada pelo equipamento de corrente contínua.



**CONTROLADOR DE CARGA** - A função principal dos reguladores de carga em sistemas FV (fotovoltaico) isolados é a de manter a bateria no seu estado máximo de carga enquanto a protege das sobrecargas originadas pelos módulos FV e das descargas originadas pelas cargas.

**INVERSOR ou CONVERSOR** - são elementos cuja finalidade é adaptar as características da corrente gerada à demanda total ou parcial pelas aplicações. Os inversores são responsáveis pela conversão de corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). Os inversores devem possuir outros aspectos como:

- Possuir uma eficiência alta, pois em caso contrário se terá de aumentar desnecessariamente o número de painéis para alimentar a carga.
- Está adequadamente protegido contra curtos-circuitos e sobrecargas.
- Admitir demandas instantâneas de potências maiores do que 200% de sua potência máxima.

### 2.6.7 Módulo fotovoltaico

É a unidade básica de todo sistema de geração de eletricidade fotovoltaica. A ABNT (NBR 10899/TB-328) define o módulo fotovoltaico como sendo o “menor conjunto ambientalmente protegido de células solares interligadas, com o objetivo de gerar energia elétrica em corrente contínua”. Módulos com tensão nominal de 12 VDC são constituídos por 30 a 36 células em série.

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 (15x15 cm<sup>2</sup>) só pode fornecer cerca de 1,0 - 1,5 W com tensão de 0,5 V. Os módulos, assim como as

células em um módulo, podem ser conectados em ligações série e/ou paralelo, dependendo da potência e tensão desejadas.

O gerador fotovoltaico é constituído por um conjunto de módulos unidos eletricamente entre si. Normalmente se constrói associando primeiro módulos em série, até conseguir a tensão desejada, e depois associando em paralelo várias associações em série até obter o nível de corrente pretendido. (FIGURA 10)



**FIGURA. 10.** Módulo fotovoltaico  
FONTE: Pesquisa de dados

O comportamento elétrico do gerador fotovoltaico é correspondente a de um gerador de corrente contínua, cujas características instantâneas de corrente e tensão, variam com a intensidade da luz e com a temperatura. É habitual caracterizar o tamanho do gerador fotovoltaico por sua potência nominal nas condições padrão de medida, expressa em kWp.

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

- Cobertura exterior de vidro: tem como função principal proteger as células.
- Moldura metálica: protege a estrutura exterior do painel.
- Fiação e bornes de conexão.

- Diodo de proteção contra sobrecargas ou outras alterações de funcionamento do painel.
- Encapsulante de EVA.

### 2.6.7.1 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 negativos 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 ligar 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.

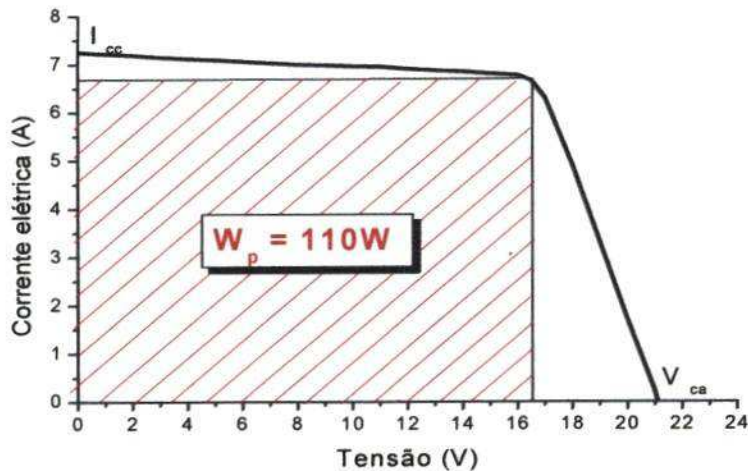


FIGURA 11. Gráfico da Corrente elétrica X Tensão  
FONTE: Pesquisa de dados



### 2.6.8 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:

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

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

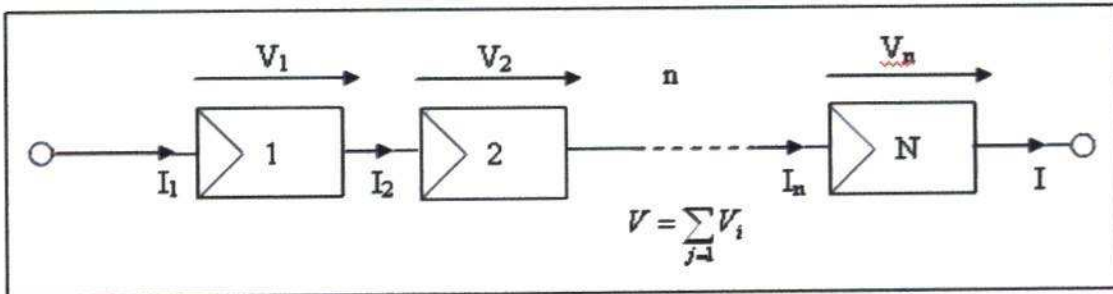


FIGURA 12: Arranjo das células em série.

FONTE: (OLIVEIRA, 2002)

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:

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

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

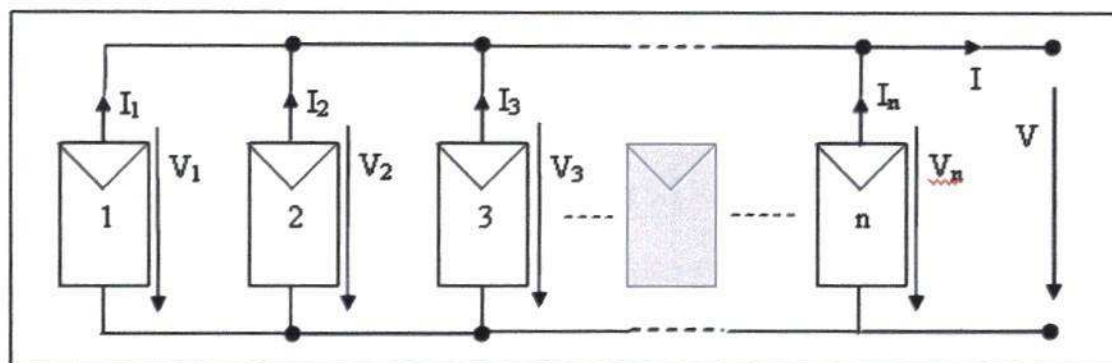


FIGURA 13: Conexão de células em paralelo.  
FONTE: (OLIVEIRA, 2002)

### 2.6.9 Vantagens do uso das células fotovoltaicas

As células solares fotovoltaicas apresentam uma série de vantagens que vem fazendo com que a sua procura cresça cada vez mais.

- É uma energia que não gera nenhum tipo de resíduo, nem causa impactos ambientais, como as usinas hidrelétricas;
- A instalação dos equipamentos de captação é muito simples, compacta, potente e quase não exige manutenção;
- A vida útil dos painéis é superior a 20 anos, segundo os técnicos;
- Só usa como combustível a energia do sol, que é gratuita;
- Possui funcionamento silencioso, simples e confiável;
- Salvo os gastos de instalação, não existe mais nenhum valor a pagar;
- Fornecem tensões de 12, 24, 36 e 48 volts (corrente contínua), dependendo da necessidade;
- Converte energia mesmo em dias nublados;

### **2.6.10 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 e sistemas autônomos.

Na categoria de produtos de consumo estão incluídas 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).

## **2.7 ENERGIAS RENOVÁVEIS PARA SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO**

Alguns estudos vêm sendo realizados com o intuito de investigar a viabilidade técnico-econômica do sistema de dessalinização com energia renovável, para serem utilizados principalmente em áreas remotas.

As fontes de energia renovável que estão sendo usadas para sistemas de dessalinização são os sistemas fotovoltaicos e os sistemas eólicos. Ambos os sistemas ainda são recentes, e as pesquisas que vem sendo realizadas buscam adquirir um menor custo para a sua instalação, de forma a tornar-se competitiva com a energia elétrica convencional. Para locais muito



distantes das cidades, desprovidos de energia elétrica convencional, o custo da utilização de energia fotovoltaica e/ou eólica já é competitivo com a energia elétrica convencional, devido à distância do local para chegar com toda a fiação elétrica. E a utilização dessa energia poderá ter outras finalidades além do sistema de dessalinização.

Na atualidade, a potência instalada desses sistemas renováveis encontra-se em rápido crescimento na Europa, Japão e Estados Unidos, basicamente devido à expansão das instalações residenciais interligadas na rede.

Existem poucos relatos sobre sistemas de dessalinização OI usando energia solar. (ISHIMURA, 1994 e ALAWAJI *et al.*, 1995) e energia eólica. Os sistemas existentes não apresentam problemas técnicos significativos tais como os apresentados abaixo.

A Jordânia se encontra numa região de clima árido e semi-árido e sofre com problema de água potável e os recursos de energia são limitados. Estima-se que em 2010 a Jordânia enfrente uma crise de água potável, esgotando todas suas fontes de água doce. De acordo com a análise de qualidade da água salobra fornecida pela Agência Internacional de Cooperação Japonesa (JICA), o total de sólidos dissolvidos varia de 5.000 - 10.000 mg/L. Foi instalado um sistema experimental para investigar o desempenho de uma planta de dessalinização usando sistema de energia fotovoltaica.

O sistema fotovoltaico aciona o moto bomba que é ligado à planta de dessalinização. A tensão, a corrente e a potência são, respectivamente, 17.9 V, 2.1 A e 35 W. O experimento foi realizado no Centro de Energia Renovável de Ciência Aplicada na universidade em Amman, durante o mês de abril de 2005. O TDS da água de alimentação era de 400 mg/L e o pH 7.2. Após a dessalinização, a água potável produzida passou a ter um TDS de 20 mg/L e o pH de 7.9. Os resultados mostraram que o sistema de energia fotovoltaica utilizada nos sistemas de dessalinização tem uma aplicação favorável. (ABDALLAHA *et al.*, 2005).

A Tunísia é um país privilegiado, pois têm bastantes recursos hídricos para cobrir todas suas necessidades até o ano 2025. Entretanto, a qualidade da água não é apropriada para o uso doméstico na parte sul do país. Assim, de acordo com as estatísticas da Autoridade Nacional de Água mais de 51% dos recursos de água disponível têm uma salinidade que varia entre 1.500 - 3.000 mg/L. Como o país possui uma energia média disponível de 5 kWh/m<sup>2</sup>/d e a qualidade da água não é apropriada para o consumo, houve um grande interesse de instalar um sistema de dessalinização OI com painéis FV.

O sistema experimental é composto pelo sistema de energia (FV), pré-tratamento (filtro de carvão ativado e filtro de cartucho), sistema de dessalinização (uma membrana em espiral de poliamida) e pós-tratamento. Os resultados mostraram que o desempenho dos painéis fotovoltaicos foi satisfatório. Foi constatado que à medida que a taxa de rejeição de sais aumenta há maior consumo específico de energia.

Na Austrália, em muitas regiões remotas, a população consome água de poço com concentração de sais de 1.500 - 5.000 mg/L. Estas comunidades consomem esta água porque não possuem energia elétrica nem tecnologia apropriada para purificar a água. Para minimizar o problema foi desenvolvido um pequeno sistema de dessalinização usando painéis fotovoltaicos para obter água potável. O sistema de dessalinização utilizado é baseado num sistema híbrido de membranas (NF e OI) e um pré-tratamento com membrana de UF. A energia utilizada no moto bomba é proveniente dos painéis fotovoltaicos.

A escolha das membranas de NF ou de OI depende da qualidade da água de alimentação e espera-se influenciar o consumo de potência devido às exigências de diferentes pressões. O sistema foi testado com dois tipos de águas: 2.000 mg/L e 3.500 mg/L. Os resultados mostraram que utilizando a água de alimentação de 2.000 mg/L produziu 40 L/h de água potável e operando a uma pressão de 9 bar é necessário uma potência elétrica de 90 W.



Aumentando a pressão de operação para 10 bars, houve um aumento significativo no consumo de energia, todavia, o fluxo do permeado permaneceu inalterado.

Com o aumento da incrustação (fouling) na membrana há aumento no consumo específico de energia. A quantidade de energia requerida para produzir 1 litro de água potável varia de 2 a 8 kW h/m<sup>3</sup>, dependendo da salinidade da água de alimentação e das condições de operação do sistema. Foi verificado que a melhor pressão de operação para dessalinizar água salobra de poço está numa escala de 6 - 7 bars. (RICHARDS, 2003).

Foi instalado no arquipélago de Canarian um sistema de dessalinização utilizando como fonte de geração de energia elétrica turbina eólica. O sistema consiste em duas turbinas (cada uma com uma potência nominal de 230 kW) que fornece energia para o sistema de dessalinização formado por um grupo de oito módulos de osmose inversa (OI). A análise dos resultados elétricos e hidráulicos obtidos deste protótipo mostra a praticabilidade técnica do projeto do sistema e da estratégia operacionais automáticas programadas para ela. A estratégia operacional automática controla o número das plantas de OI que tem que ser conectadas ou desconectadas a cada momento, a fim combinar a fonte de energia variável da turbina eólica.

Os resultados obtidos não revelaram nenhuma variação significativa no nível da qualidade ou no volume médio da água produzida, nem nenhuma deterioração física dos componentes principais do sistema em consequência das partidas e das paradas programadas requeridas em consequência das variações na fonte de energia ou nas oscilações dos parâmetros elétricos da tensão e da frequência. O sistema sob a análise pode ser aplicado para dessalinização de água do mar em regiões litorais com escassez de água para o uso doméstico e/ou agricultura. (CARTA *et al*, 2003).

Um pequeno sistema de dessalinização via osmose inversa usando energia eólica foi construído e testado no Havai. O sistema foi testado com água salobra de concentração de



3.000 mg/L. O sistema possui uma única membrana de OI, uma turbina eólica, um sistema de controle de dados, motor-bomba, pré-tratamento. Durante o experimento no campo a velocidade do vento estava em torno de 5 m/s e o fluxo da água de alimentação 13 L/min. A taxa de rejeição de sais foi de 97% e a taxa de recuperação do permeado de 20%. O principal problema encontrado durante os testes foi às incrustações na membrana. Isso foi minimizado com o pré-tratamento na água de alimentação. Mesmo com a velocidade do vento em torno de 5 m/s o sistema operou satisfatoriamente, e não foi necessária nenhuma fonte extra de energia.

Weiner *et al*, (2001) desenvolveram um projeto financiamento pelo Programa da União Européia, que tinha como objetivo a construção de uma planta de dessalinização via osmose inversa utilizando energia solar fotovoltaica e energia eólica, equipado com um inversor e bateria para armazenamento de energia. Tal planta servirá a pequenas comunidades isoladas nas áreas remotas desprovidas de recursos de água. Inicialmente foi realizado uma simulação em software, a fim de permitir a escolha apropriada das especificações dos componentes. Os dados meteorológicos do local foram usados. Este sistema atualiza continuamente o nível da água do tanque de alimentação e o estado atual de carga dos acumuladores (baterias). Dependendo destas duas variáveis, foi construída uma árvore lógica de decisão para decidir-se se a produção do vento e de energia solar pode satisfazer à carga da planta ou se terá que adicionar energia dos acumuladores ou de um gerador auxiliar (motor diesel).

O sistema de controle do processo para tal instalação deve permitir a operação nas áreas isoladas onde o pessoal qualificado da manutenção é escasso ou remoto. A planta tem uma capacidade máxima de produzir de 9 m<sup>3</sup>/d (na vista das necessidades futuras), mas produz atualmente somente 3 m<sup>3</sup>/d. A água de alimentação é fornecida dos poços de água salobra do local. A água do poço possui uma concentração de aproximadamente 3.500 - 5.000 mg/L. O sistema projetado baseou-se na premissa que a velocidade média do vento no local é

aproximadamente de 4 a 5 m/s e um nível de insolação de aproximadamente 5 a 5,5 kWh/m<sup>2</sup>/d. O tempo de vida previsto da planta é aproximadamente 15 anos. O sistema foi instalado com sucesso e foi operado continuamente produzindo 3 m<sup>3</sup>/d. As medidas experimentais estão em andamento. A programação de tempo para o projeto inteiro foi de 6- 8 meses, incluindo muitas mudanças requeridas durante a construção.

As pesquisas de dessalinização com fontes de energia renovável continuam crescendo, o intuito é ter um sistema de baixo custo, onde o custo da energia renovável seja competitivo a energia elétrica convencional. Através do Programa “Água Boa” em 1998, 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.

Esses sistemas necessitam de manutenção preventiva para ter um tempo de vida útil longo com um custo baixo, mas alguns desses sistemas hoje não funcionam por falta dessa manutenção, no entanto muitos estão deteriorados e sem funcionamento. Portanto, foi lançado em Janeiro de 2005 o Programa “Água Doce” com o objetivo de recuperar dessalinizadores que se encontram parados e/ou quebrados no semi-árido do Nordeste.

Na região Nordeste, por ser caracterizada por grandes estiagens e ser considerada como uma das regiões mais pobres do Brasil há ainda locais remotos e isolados que além de não possuir água de boa qualidade para o consumo “humano” também não são conectados 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 renovável para alimentar sistemas de dessalinização OI de pequeno porte.



A implantação desses sistemas beneficiária a população com uma melhor qualidade de vida, além da possibilidade de utilizar a energia obtida de fontes renováveis para outros fins além da dessalinização. Oliveira (2002) desenvolveu um sistema de dessalinização de pequeno porte, constituído por uma única membrana de OI, fazendo uso de painéis fotovoltaicos. Esse sistema operou com um gradiente de concentração de 1.000 mg/L a 4.000 mg/L de sais dissolvidos, e considerando uma duração média de insolação de 6 horas por dia, a produção de água potável poderá chegar até 300 L/h (OLIVEIRA, 2002). Em 2007, Oliveira estudou o desempenho de um dessalinizador solar de duas membranas usando energia fotovoltaica através de um circuito eletrônico sem a utilização de acumuladores. O sistema mostrou condições técnicas de produzir 0,25 m<sup>3</sup>/h de água potável a um preço variando de R\$ 2,77 a R\$ 4,82 / m<sup>3</sup>.

Para ser econômico, um sistema de dessalinização usando energia renovável (solar e/ou eólica) 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 e da turbina eólica. 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.

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 motor-bomba, de alta pressão, de corrente contínua. Esse sistema tem a capacidade de produzir até 500 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 produzirá até 3.000 L/d, no qual poderá abastecer em torno de 600 pessoas por dia.

### **CAPÍTULO III**

#### **3 METODOLOGIA**

A metodologia da pesquisa num planejamento deve ser entendida como o conjunto detalhado e seqüencial de métodos e técnicas científicas a serem executados ao longo da pesquisa, de tal modo que se consiga atingir os objetivos inicialmente propostos e, ao mesmo tempo, atender aos critérios de menor custo, maior rapidez, maior eficácia e mais confiabilidade de informação (BARRETO e HONORATO, 1998).

Neste sentido, a metodologia a ser desenvolvida no presente trabalho baseia-se na realização de uma pesquisa descritiva e analítica, onde, a partir da observação, análise e confronto dos índices de irradiação com base nos resultados apresentados na região de Campina Grande–PB, cidade do interior da Paraíba, objeto da presente pesquisa.

A análise consiste no estudo profundo e exaustivo de um ou mais fenômenos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento, trata-se de um estudo intensivo, visto que leva em consideração, principalmente, a compreensão, como um todo, do assunto investigado. Todos os aspectos do caso são investigados. Quando o estudo é intensivo podem até aparecer relações que de outra forma não seriam descobertas (FACHIN, 2001), como se constitui o presente trabalho.

Desta feita, foi preciso proceder-se a uma pesquisa partindo de dois métodos: o primeiro método é chamado de pesquisa bibliográfica-documental, onde se pode conhecer mais a fundo a teoria relacionada às temas como a radiação solar, energia solar, energia renovável dentre outros previamente abordados no capítulo de base teórica, bem como através

de documentação expedida por órgãos governamentais, a exemplo da Embrapa, coletar os dados relativos aos índices de radiação ora analisados.

Ao final da fase de coleta, desenvolveu-se um banco de dados do índice de insolação com resultados dos últimos 3,5 anos (três anos e meio) na Cidade de Campina Grande, com base nos dados fornecidos pelas seguintes fontes: Embrapa, SUNDATA, Atlas Solarimétrico e Radiasol. O segundo método baseou-se na pesquisa-ação, onde se pode, com base nos dados, realizar a parte prática propriamente dita, montar os equipamentos e daí analisar os resultados obtidos ao longo do experimento.

Nesta fase experimental, analisou-se consumo energético de um dessalinizador de pequeno porte, composto por duas membranas o qual foi construído no LABDES. De posse das anotações geradas pelos resultados, formulou-se uma planilha do consumo energético do processo de dessalinização, tendo como base os seguintes parâmetros: tipo e número de membranas, concentração de água bruta, recuperação, entre outros. Ao final da etapa de coleta contextualizando os resultados obtidos e com uso do software ROSA avaliou-se um modelo de produção de água potável.

Para melhor visualização e efeito dos resultados atingidos na fase de pesquisa, na apresentação utilizaram-se gráficos e tabelas, além de figuras ilustrativas durante alguns tópicos, para que os resultados e etapas fossem melhor compreendidos pelos leitores.

### 3.1 METODOLOGIA APLICADA À PESQUISA

#### 3.1.1 Especificações do Sistema de Dessalinização via OI

A FIGURA 14 mostra o sistema experimental, utilizado na parte prática da pesquisa, constituído de um sistema de dessalinização via osmose inversa acoplado a um sistema de geração de energia elétrica, painel solar fotovoltaico. (FIGURA 14).



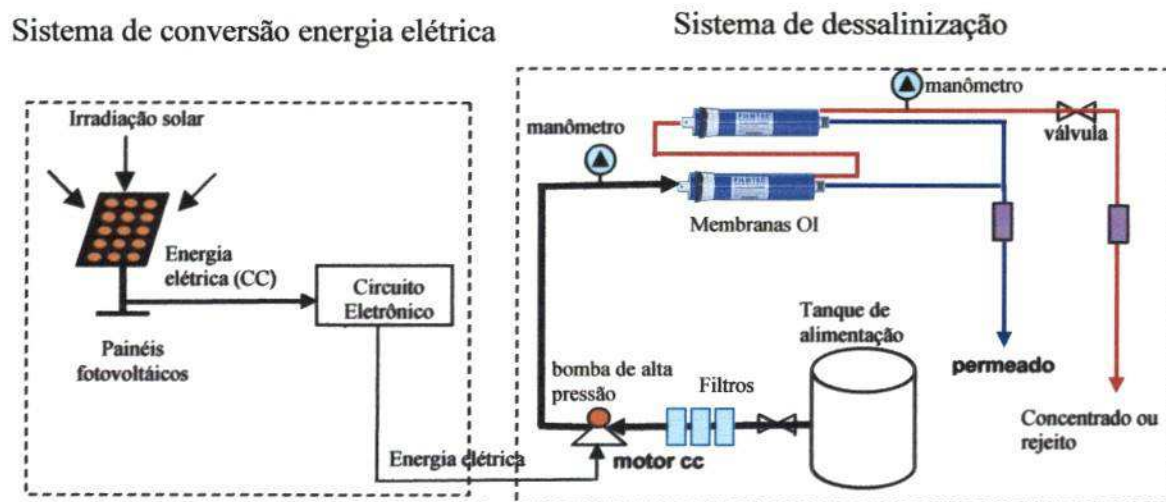
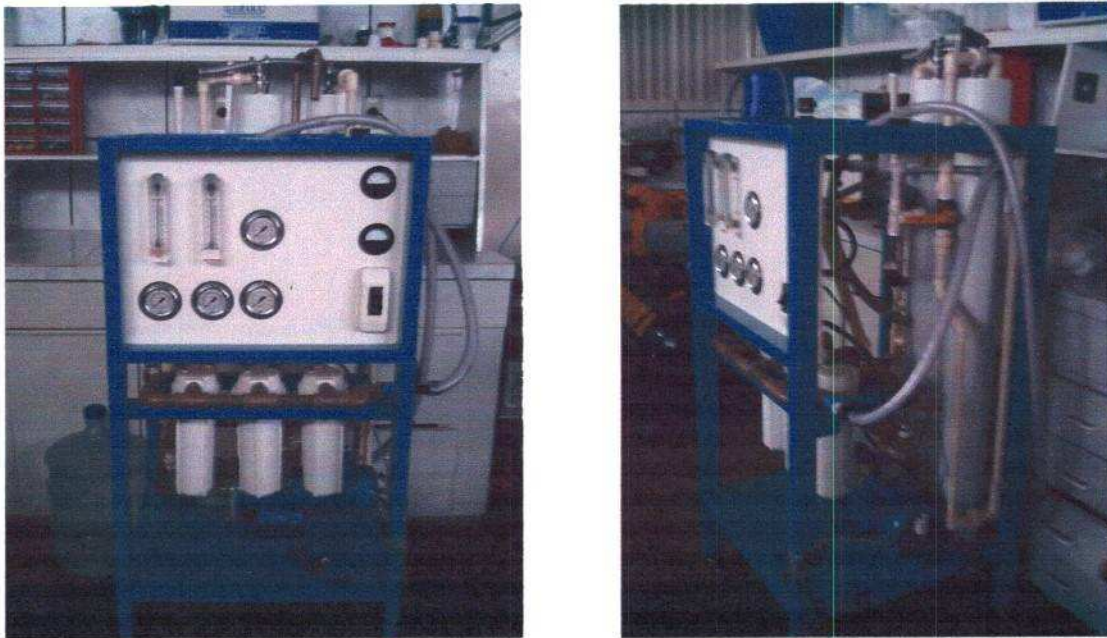


FIGURA 14: Sistema de dessalinização via osmose inversa e energia solar fotovoltaica  
 FONTE: (OLIVEIRA, 2007).

O sistema de dessalinização foi constituído por dois elementos de membrana de osmose inversa do tipo BW30LE 4040 (composto de poliamida), da Filmtec<sup>TM</sup>, cujas características específicas encontram-se na TABELA.3. Estas membranas foram inseridas num tubo de alta pressão, chamado permeador. Um motor-bomba de alta pressão de 1 HP, 90 V da Pacific Scientific, alimenta o sistema a partir de um tanque de alimentação de capacidade volumétrica de 200 litros. Antes de entrar no sistema, a água passa por um sistema de filtro. Hidrômetros da Tecnobrás, um manômetro da ASTA, um tanque de capacidade volumétrica de 200 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 15** – Fotos da unidade dessalinizadora.  
FONTE: Pesquisa de dados

**TABELA 3:** Especificações da membrana de osmose inversa.

<b>MATERIAL</b>	<b>COMPÓSITO DE POLIAMIDA</b>
Tipo	BW30LE-4040
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	9,1 m <sup>3</sup> / d
Temperatura máxima de operação	45°C
pH	2,0 – 11,0
Área nominal da membrana	7,6 m <sup>2</sup> (82 ft <sup>2</sup> )
Tempo de vida	5 anos

FONTE: Pesquisa de dados.

### **3.1.2 Especificações do sistema de conversão de energia elétrica**

A energia elétrica utilizada para o funcionamento do motor-bomba é proveniente do sistema de conversão de energia, o qual é constituído de 14 painéis fotovoltaicos (modelo KC110-1 da Kyocera Corporation) cujas especificações encontram-se na TABELA 4, e um circuito eletrônico que tem como objetivo garantir o funcionamento do sistema de dessalinização sem a utilização de baterias (OLIVEIRA, 2007). Um sistema de aquisição de



dados (Data Acquisition/Switch Unit Agilent 34970 A da Agilent Technologies) permitiu registrar a tensão e corrente elétrica do motor em função do tempo.



FIGURA 16 - Fotos de painéis fotovoltaicos.  
FONTE: Pesquisa de dados

**TABELA 4:** Especificações do painel fotovoltaico.

Potência nominal máxima de saída	110 W
Tensão nominal com circuito aberto	21,1 V
Tensão nominal máxima de saída	16,5 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>

FONTE: Pesquisa de dados.

### 3.1.3 Procedimento experimental

O ROSA (Reverse Osmosis System Analysis) Versão 6.1 é um software fornecido pela FILMTEC Membranes, o qual permite projetar um sistema de dessalinização via osmose inversa em função de vários parâmetros como: tipo e composição da água de alimentação, o



TDS, a temperatura de operação, a pressão, a eficiência da bomba, o fator fouling, o tipo e número de membranas, a vazão de alimentação, a recuperação e a água de alimentação.

Foram feitos dois tipos de simulação: Na 1ª controlamos a vazão do permeado e obtivemos: a pressão, a potência e a energia específica. Com estes dados podemos calcular o N° de pessoas atendidas e o n° de painéis fotovoltaicos necessário. (TABELAS: 8 – 19) Na 2ª simulação controlamos a pressão da água de alimentação e obtivemos: a vazão do permeado, a recuperação, a potência energética e a energia específica. (TABELA: 20)

Este projeto experimental foi realizado no LABDES / SRH / MMA, localizado na UFCG, onde o estudo foi elaborado sobre o desempenho de um sistema de dessalinização de pequeno porte, usando painéis fotovoltaicos como fonte de energia solar. O processo de dessalinização via osmose inversa usando painéis fotovoltaicos foi testado com soluções de cloreto de sódio (P.A. Chemco), com a finalidade de observar o comportamento do sistema.

No processo de dessalinização foram realizadas bateladas mantendo-se a concentração constante e variando as pressões. A capacidade de produção do permeado e concentrado foi medida por meio de dois hidrômetros. Estes valores de fluxo permitem determinar a recuperação do sistema. O valor da pressão é lido com o auxílio de um manômetro.

Para sabermos se é viável o uso da energia fotovoltaica para o sistema de dessalinização, a cada 10 segundos, foram registrados variáveis de medidas relativas da corrente elétrica e tensão do motor, através de um sistema de aquisição de dados ligado ao um computador PC. Com esses dados, foi possível calcular a potência elétrica (Watt), e, junto com o valor da vazão do permeado, o consumo de energia (kWh/m<sup>3</sup>).

## **CAPÍTULO IV**

### **4 ANÁLISE DE DADOS**

Nesta fase coletamos os dados sobre a insolação, para Campina Grande-PB, com dados fornecidos pela EMBRAPA e informações sobre os índices de radiação solar obtidos através do Atlas Solarimétrico, do Sundata e do Radiassol, chegamos enfim, a etapa de apresentação e análise dos dados obtidos.

#### **4.1 RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL COM BASE NO ATLAS SOLARIMÉTRICO, SUNDATA E RADIASOL – POTENCIAL SOLAR**

Inicialmente apresentaremos um gráfico contendo dados do Atlas Solarimétrico e do Sundata, os quais apresentam os dados referentes à radiação global diária através da média mensal apresentada na Cidade de Campina Grande no ano de 1993 e do Radiassol em 1998. Conforme (FIGURA 17).

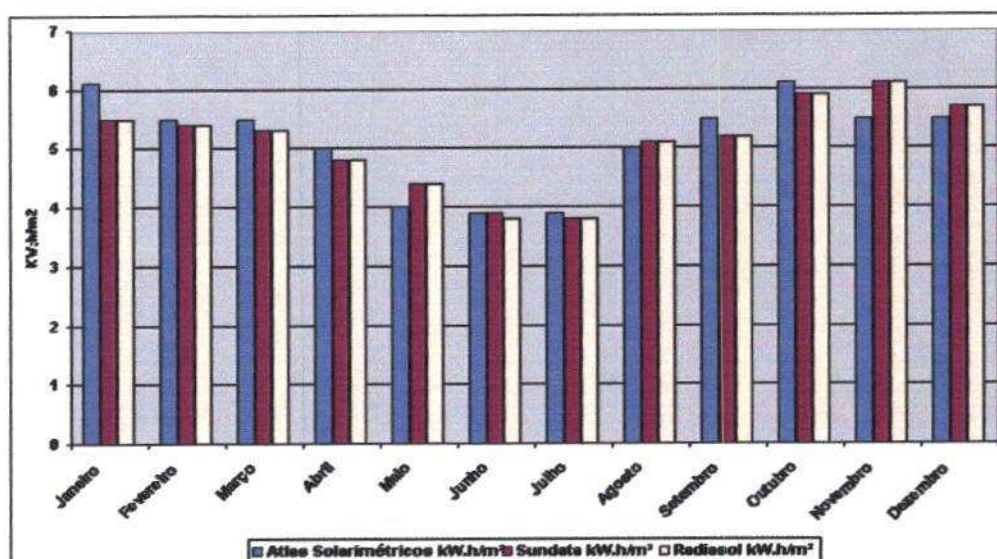


FIGURA 17 - Média mensal da radiação global diária em Campina Grande em kW.h/m<sup>2</sup>.dia  
FONTE: Adaptado do Atlas Solarimétrico e Sundata (1993) e do Radiosol (1998).

Com base nos dados apresentados na TABELA 5 e após o confronto destes dados, percebe-se que a radiação global diária, ou seja, a média mensal em Campina Grande-PB, de acordo com o Atlas Solarimétrico do Brasil, os dados do SUNDATA V 1.0 e os do Radiosol, expressa em kWh/m<sup>2</sup>, apresenta variação sendo o valor máximo de 6,1 kWh/m<sup>2</sup> nos meses de janeiro e outubro e uma incidência mínima de 3,8 kWh/m<sup>2</sup> nos meses de junho e julho, conforme apresenta a (TABELA 5):

TABELA 5: Média mensal da radiação global diária na Cidade de Campina Grande em kW.h/m<sup>2</sup>.dia

	Atlas Solarimétricos kW.h/m <sup>2</sup>	Sundata kW.h/m <sup>2</sup>	Radiosol kW.h/m <sup>2</sup>
Janeiro	6,1	5,5	5,5
Fevereiro	5,5	5,4	5,4
Março	5,5	5,3	5,3
Abril	5,0	4,8	4,8
Mai	4,0	4,4	4,4
Junho	3,9	3,9	3,8
Julho	3,9	3,8	3,8
Agosto	5,0	5,1	5,1
Setembro	5,5	5,2	5,2
Outubro	6,1	5,9	5,9
Novembro	5,5	6,1	6,1
Dezembro	5,5	5,7	5,7

FONTE: Atlas Solarimétrico e Sundata (1993) ; Radiosol (1998).



Os dados expressos na TABELA 5 mostram de forma detalhada que os resultados apresentados são bastante semelhantes.

#### 4.2 INSOLAÇÃO COM BASE EM DADOS METEOROLÓGICOS DA EMBRAPA

Passa-se agora a análise dos dados fornecidos pela EMBRAPA, os quais deram margem para criação da FIGURA 18 e da TABELA 6.

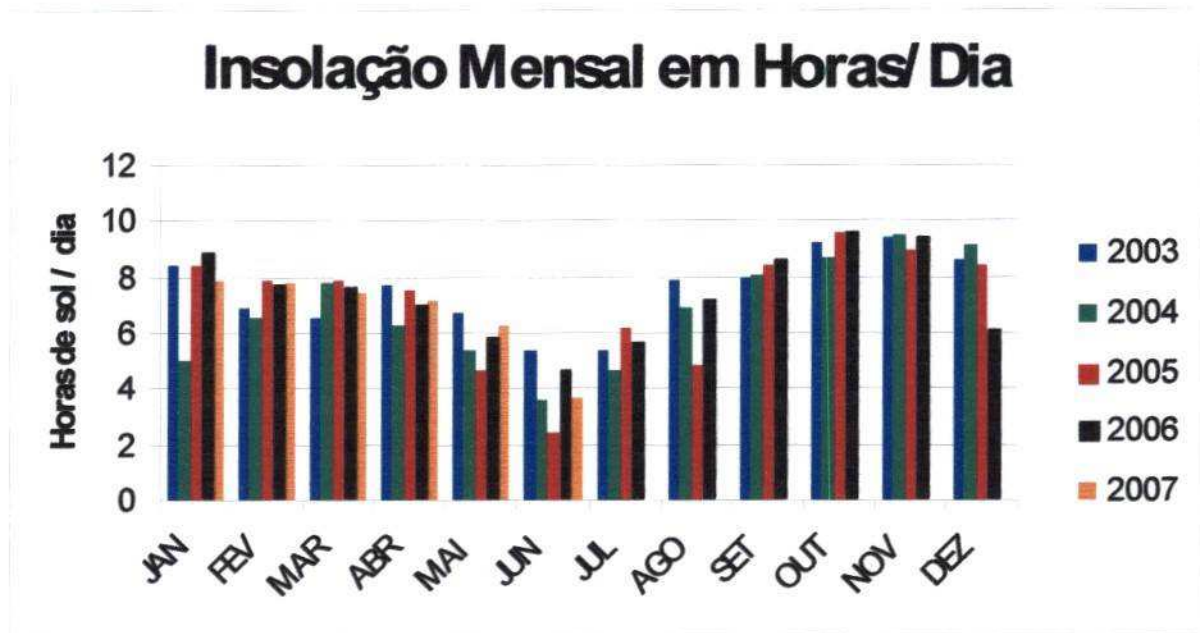


FIGURA 18 - Insolação Média Mensal em Horas na cidade de Campina Grande.  
FONTE: EMBRAPA

Analisando os dados apresentados na FIGURA 18, obtidos a partir dos dados fornecidos pela EMBRAPA, vimos que, nos quatro primeiros meses do ano - janeiro, fevereiro, março e abril – do período analisado 2003 a 2007, os dados apresentam certa reprodutibilidade quanto aos índices apresentados, visto que apresentaram uma média de 6,3 no valor mínimo e uma média de 8,9 o valor máximo de insolação diária. Isso favorece o uso

da energia solar na região na forma de conversão desta energia solar em energia elétrica através o uso de painéis fotovoltaicos.

Em contrapartida, verifica-se uma queda na insolação, sobretudo no meio do ano, mas precisamente nos meses de maio, junho, julho e agosto, correspondente a o período do inverno. Este índice diminui principalmente em junho atingindo uma insolação máxima de apenas 5,0 horas/dia, o que limita o uso dos painéis. Isto ocorre devido aos fatores climáticos, porque normalmente a nebulosidade e as chuvas são mais intensas neste período em Campina Grande-PB. Para compensar esta queda de insolação, há necessidade de uso de baterias para acumular energia quando se quer usar painéis fotovoltaicos.

Posteriormente, nos meses de setembro, outubro, novembro e dezembro, com o fim do período chuvoso, retomam os índices favoráveis, ou seja, com um valor máximo de radiação de 9,6 horas/dia e um valor mínimo de 8,0 horas/dia, ou seja, índices bem mais favoráveis que os dois primeiros bimestres, janeiro a abril. O que também deve ser avaliado positivamente, pois favorece e muito a utilização dos painéis solares fotovoltaicos.

Numa análise global, verificamos que em um período de 12 meses (1 ano), são oito meses de índices de radiação favorável ao uso da energia solar, com uma queda em apenas quatro meses, ou seja, no meio do ano, quando as médias de radiação não chegam atingir o ideal de 6.0 horas/dia de sol.

TABELA 6 - Insolação Média mensal (horas) na Cidade de Campina Grande – PB (2003 a 2007).

MESES/ANOS	2003	2004	2005	2006	2007
JANEIRO	8,4	5,0	8,4	8,9	7,9
FEVEREIRO	6,9	6,5	7,9	7,7	7,8
MARÇO	6,5	7,8	7,9	7,6	7,4
ABRIL	7,7	6,3	7,5	7,0	7,2
MAIO	6,7	5,4	4,7	5,8	6,3
JUNHO	5,4	3,6	2,4	4,7	3,7
JULHO	5,4	4,7	6,2	5,6	-
AGOSTO	7,9	6,9	4,8	7,2	-
SETEMBRO	8,0	8,1	8,4	8,6	-
OUTUBRO	9,2	8,7	9,6	9,6	-
NOVEMBRO	9,4	9,5	9,0	9,4	-
DEZEMBRO	8,6	9,1	8,4	6,1	-

FONTE: EMBRAPA

Analisando os dados da EMBRAPA sobre a média mensal de horas de sol, ou seja, de radiação, verifica-se que para os anos de 2003 a 2007, algumas variações foram observadas. Por exemplo, em 2003, dentro da normalidade com um período de chuvas em junho e julho sem grande intensidade, mas um período de insolação forte nos meses seguintes chegando a uma média de 9,4 horas de sol em novembro e uma média anual de 7,5 horas.

Em 2004, percebemos um ano atípico em relação ao registro costumeiro para o mês de janeiro principalmente pelas chuvas ocorridas de 11 a 31 onde chegamos a ter dia 18 (0,3 horas), 20 (1 hora) e 27 (não houve sol). Por isso tivemos um índice muito baixo neste mês de janeiro de 2004. O restante do ano foi normal, mas com bastantes chuvas em maio, junho e julho, reafirmando a estimativa normal anual de queda da radiação nesse período.

No ano posterior, 2005 apresenta-se como um ano com bastante sol nos 4 primeiros meses, bastante chuvoso em maio e junho (nos 10 primeiros dias tivemos um total de somente 7 horas de sol), em agosto voltou à nebulosidade e as chuvas, e o restante do ano houve muito sol com pico em outubro (9,6 horas).

No ano de 2006 os resultados se assemelharam bastante com as de 2003. Em 2007 só foi possível obter os dados referentes aos meses de janeiro a junho. Neste período,



corroborando com a perspectiva corrente, manteve-se dentro do esperado, com um valor mínimo de 3,7 horas/dia em junho a um valor máximo de 7,9 horas/dia em janeiro.

Fazendo-se uma média da insolação em Campina Grande no período de Janeiro de 2003 a Junho de 2007, podemos dividir o ano em dois períodos (TABELA 7). O primeiro período, chamado de VERÃO, seria um período com índice de insolação mínimo de 7 h de sol por dia. Durante este período a produção de água potável será máxima. O segundo período de 4 meses (de maio a agosto), chamado de INVERNO, tem um índice de insolação de 4 h/dia, com isso a produção de água diminui bastante. Esta diminuição poderia ser compensada pela captação de água da chuva diminuindo a necessidade de dessalinização da água.

TABELA 7 - Insolação média (horas/dia) na Cidade de Campina Grande - PB

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Horas/dia	7,1	7,4	7,4	7,1	5,8	4,0	5,5	6,7	8,3	9,3	9,3	8,0

FONTE: EMBRAPA

#### 4.3 AVALIAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO USANDO O ROSA 6.1

Para a avaliação do consumo energético, utilizamos o software ROSA (Reverse Osmosis System Analysis) versão 6.1, (Cf § 3.1.3) Esta avaliação foi feita de duas formas: em uma controlamos a vazão do permeado e variamos o TDS da água de alimentação, enquanto na outra fixamos a pressão da água de alimentação e variamos o TDS.

##### 4.3.1 Avaliação fixando o permeado e variando as concentrações

O ROSA foi utilizado para simular a produção de água potável de um dessalinizador constituído de 1 e/ou 2 membranas de tipo BW30LE-4040 com uma água de alimentação de concentrações variando entre 1000 e 3500 mg/L. O sistema foi testado com uma recuperação

de 15 e 30%, e com uma produção de água potável variando de 0,1 a 0,6 m<sup>3</sup>/h. A partir destes resultados, podem-se estimar a potência necessária, ou seja, a energia gasta para produzir 1 m<sup>3</sup> de água potável, o número de pessoas atendidas e o número de painéis fotovoltaicos necessários ao bom funcionamento do sistema. Veja as projeções do ROSA nas TABELAS 8 a 11, que se seguem:

**TABELA 8** – Resultados da simulação do ROSA com uma recuperação de 15% e uma água de alimentação de 1000 mg/L.

VAZÃO DO PERMEADO m <sup>3</sup> /h	Nº DE MEMBRANAS	PRESSÃO bar	POTÊNCIA kW	ENERGIA GASTA kWh/m <sup>3</sup>	PERMEADO m <sup>3</sup> /dia		Nº DE PESSOAS ATENDIDAS 5 L/Pessoa		Nº DE PAINÉIS 86 W (real)
					4h (Inverno)	7h (Verão)	4h (Inverno)	7h (Verão)	
					0,1	1	3,96	0,09	0,92
	2	2,74	0,06	0,63	0,4	0,7	80	140	1
0,2	1	6,80	0,31	1,58	0,8	1,4	160	280	4
	2	4,15	0,19	0,96	0,8	1,4	160	280	2
0,3	1	9,89	0,69	2,29	1,2	2,1	240	420	8
	2	5,62	0,39	1,3	1,2	2,1	240	420	5
0,4	2	7,15	0,66	1,65	1,6	2,8	320	560	8
0,5	2	8,72	1,01	2,02	2	3,5	400	700	12
0,6	2	10,38	1,44	2,4	2,4	4,2	480	840	17

TABELA 9 – Resultados da simulação do ROSA com uma recuperação de 30% e uma água de alimentação de 1000 mg/L.

VAZÃO DO PERMEADO	Nº DE MEMBRANAS	PRESSÃO	POTÊNCIA	ENERGIA GASTA	PERMEADO		Nº DE PESSOAS ATENDIDAS		Nº DE PAINÉIS
					m³/dia		5 L/Pessoa		
					4h (Inverno)	7h (Verão)	4h (Inverno)	7h (Verão)	
0,1	1	4,10	0,05	0,47	0,4	0,7	80	140	1
	2	2,83	0,03	0,33	0,4	0,7	80	140	1
0,2	1	7,08	0,16	0,82	0,8	1,4	160	280	2
	2	4,26	0,1	0,49	0,8	1,4	160	280	1
0,3	1	10,16	0,35	1,18	1,2	2,1	240	420	4
	2	5,68	0,2	0,66	1,2	2,1	240	420	2
0,4	2	7,15	0,33	0,83	1,6	2,8	320	560	4
0,5	2	8,71	0,51	1,01	2	3,5	400	700	6
0,6	2	10,28	0,71	1,19	2,4	4,2	480	840	8

Simulando o sistema com uma recuperação de 15% observa-se que, com uma vazão de 0,3 m³/h e usando-se **uma membrana**, a pressão é de 9,98 bars, sendo necessário uma potência de 0,69 kW para uma energia gasta de 2,29 kWh/m³. Enquanto que, com o uso de **duas membranas** uma vazão de 0,6 m³ é praticamente obtida, com a mesma pressão 10,38 bars, só que necessitaria de uma potência de 1,44 kW e uma energia gasta de 2,4 kWh/m³.

Para uma recuperação de 30% usando-se **duas membranas** o sistema produz 0,6 m³/h de permeado a uma pressão de 10,28 bars e há uma diminuição considerável tanto na potência (0,71 kW) como na energia gasta (1,19 kWh/m³).

A FIGURA 19 representa as projeções gráficas da ENERGIA X PRESSÃO para recuperações de 15% e 30% respectivamente, com dados das Tabelas 8 e 9.



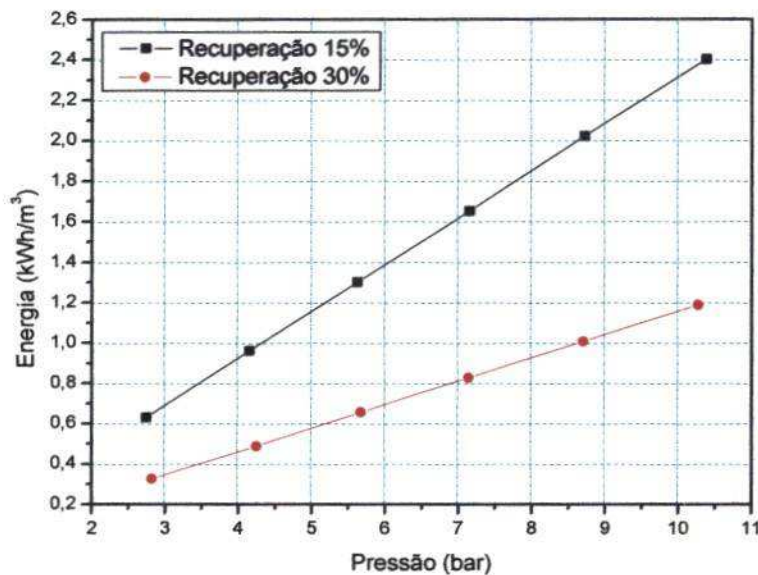


FIGURA 19: Gráfico da Energia em função da Pressão para uma recuperação de 15% e 30%. Água de alimentação de 1000 mg/L. Simulador ROSA 6.1.

TABELA 10 – Resultados da simulação do ROSA com uma recuperação de 15% e ma água de alimentação de 1500 mg/L.

VAZÃO DO PERMEADO m³/h	Nº DE MEMBRANAS	PRESSÃO bar	POTÊNCIA kW	ENERGIA GASTA kWh/m³	PERMEADO m³/dia		Nº DE PESSOAS ATENDIDAS 5 L/Pessoa		Nº DE PAINÉIS 86 W (real)
					4 h (Inverno)	7 h (Verão)	4 h (Inverno)	7 h (Verão)	
0,1	1	4,47	0,1	1,04	0,4	0,7	80	140	1
	2	3,19	0,07	0,74	0,4	0,7	80	140	1
0,2	1	7,38	0,34	1,71	0,8	1,4	160	280	4
	2	4,63	0,21	1,07	0,8	1,4	160	280	2
0,3	1	10,53	0,73	2,44	1,2	2,1	240	420	8
	2	6,13	0,43	1,42	1,2	2,1	240	420	5
0,4	2	7,69	0,71	1,78	1,6	2,8	320	560	8
0,5	2	9,28	1,07	2,15	2	3,5	400	700	12
0,6	2	10,97	1,52	2,54	2,4	4,2	480	840	18

TABELA 11 – Resultados da simulação do ROSA com uma recuperação de 30% e uma água de alimentação de 1500 mg/L.

VAZÃO DO PERMEADO  m <sup>3</sup> /h	Nº DE MEM BRAS	PRES SÃO  bar	PO TÊN CIA  kW	ENERGIA GASTA  kWh/m <sup>3</sup>	PERMEADO		Nº DE PESSOAS ATENDIDAS		Nº DE PAI NÉIS  86 W (real)
					m <sup>3</sup> /dia		5 L/Pessoa		
					4 h (Inverno)	7 h (Verão)	4h (Inverno)	7 h (Verão)	
0,1	1	4,70	0,05	0,54	0,4	0,7	80	140	1
	2	3,34	0,04	0,39	0,4	0,7	80	140	1
0,2	1	7,78	0,18	0,9	0,8	1,4	160	280	2
	2	4,83	0,11	0,56	0,8	1,4	160	280	1
0,3	1	10,96	0,38	1,27	1,2	2,1	240	420	4
	2	6,29	0,22	0,73	1,2	2,1	240	420	3
0,4	2	7,79	0,36	0,9	1,6	2,8	320	560	4
0,5	2	9,39	0,54	1,09	2	3,5	400	700	6
0,6	2	11,00	0,76	1,27	2,4	4,2	480	840	9

Simulando o sistema com uma recuperação de 15% e 30% observa-se que, para uma vazão de 0,4 m<sup>3</sup>/h e usando-se **duas membranas**, a pressão é de 7,69 bars e 7,79 bars respectivamente, sendo que há uma diminuição tanto na **potência** de 0,71 kW para 0,36 kW, como na **energia gasta** de 1,78 kWh/m<sup>3</sup> para 0,9 kWh/m<sup>3</sup>.

A FIGURA 20 representa as projeções gráficas da ENERGIA X PRESSÃO para recuperações de 15% e 30% respectivamente, com dados das Tabelas 10 e 11.

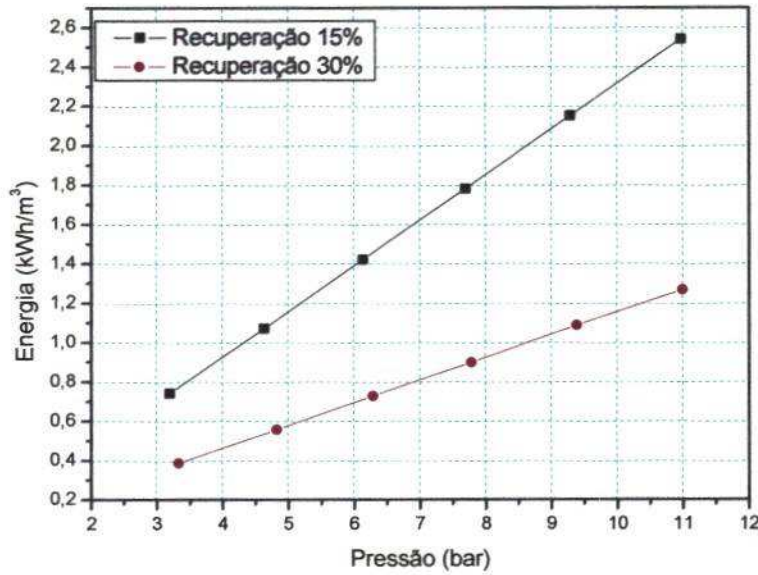


FIGURA 20: Gráfico da Energia em função da Pressão para uma recuperação de 15% e 30% Água de alimentação de 1500 mg/L. Simulador ROSA 6.1.

TABELA 12 – Resultados da simulação do ROSA com uma recuperação de 15% e uma água de alimentação de 2000 mg/L.

VAZÃO DO PERMEADO M³/h	Nº DE MEMBRANAS	PRESÃO bar	POTÊNCIA kW	ENERGIA GASTA kWh/m³	PERMEADO m³/dia		Nº DE PESSOAS ATENDIDAS 5L/Pessoa		Nº DE PAINÉIS 86 W (real)
					4h (Inverno)	7h (Verão)	4h (Inverno)	7h (Verão)	
					0,1	1	4,98	0,12	
	2	3,63	0,08	0,84	0,4	0,7	80	140	1
0,2	1	7,96	0,37	1,84	0,8	1,4	160	280	4
	2	5,12	0,24	1,18	0,8	1,4	160	280	3
0,3	1	11,16	0,78	2,58	1,2	2,1	240	420	9
	2	6,64	0,46	1,54	1,2	2,1	240	420	5
0,4	2	8,22	0,76	1,9	1,6	2,8	320	560	9
0,5	2	9,84	1,14	2,28	2	3,5	400	700	13
0,6	2	11,52	1,61	2,68	2,4	4,2	480	840	19



VAZÃO DO PERMEADO	Nº DE MEMBRANAS	PRES SÃO	POTÊN CIA	ENER GIA GASTA	PERMEADO		Nº DE PESSOAS ATENDIDAS		Nº DE PAINÉIS
					m <sup>3</sup> /dia		5L/Pessoa		
					m <sup>3</sup> /h	bar	kW	kWh/m <sup>3</sup>	4h (Inverno)
0,1	1	5,29	0,06	0,61	0,4	0,7	80	140	1
	2	3,85	0,34	0,45	0,4	0,7	80	140	4
0,2	1	8,48	0,2	0,98	0,8	1,4	160	280	2
	2	5,40	0,13	0,62	0,8	1,4	160	280	2
0,3	1	11,76	0,41	1,36	1,2	2,1	240	420	5
	2	6,89	0,24	0,8	1,2	2,1	240	420	3
0,4	2	8,43	0,39	0,98	1,6	2,8	320	560	5
0,5	2	10,06	0,58	1,16	2	3,5	400	700	7
0,6	2	11,70	0,81	1,35	2,4	4,2	480	840	9

Simulando o sistema com uma recuperação de 15% e 30%, observamos que, com uma vazão de 0,3 m<sup>3</sup>/h e usando-se **duas membranas**, as pressões são praticamente as mesmas, 6,64 e 6,89 bars, respectivamente. Necessita-se de duas vezes menos **potência** (0,24 kW) com 30% de recuperação que com 15% (0,46 kW) e a **energia gasta** diminui, passando de 1,54 kWh/m<sup>3</sup> para 0,98 kWh/m<sup>3</sup>.

A FIGURA 21 representa as projeções gráficas da ENERGIA X PRESSÃO para recuperações de 15% e 30% respectivamente, com dados das Tabelas 12 e 13.

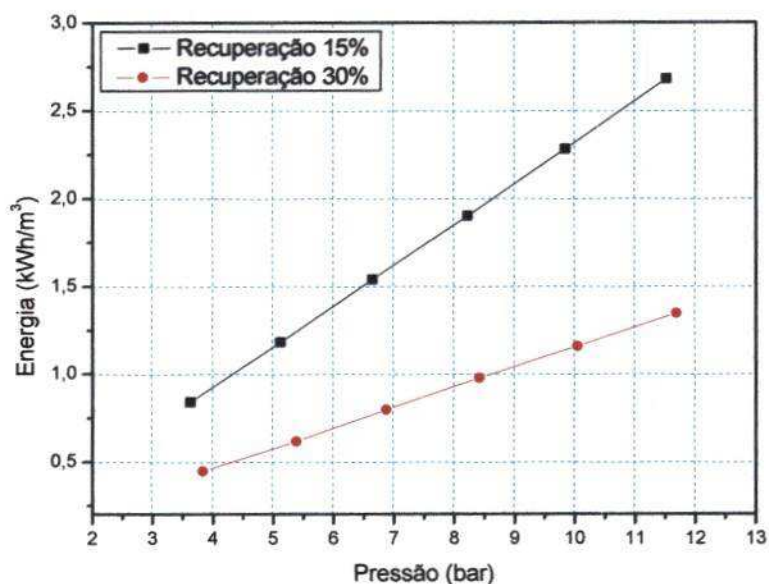


FIGURA 21: Gráfico da Energia em função da Pressão para uma recuperação de 15% e 30%. Água de alimentação de 2000 mg/L. Simulador ROSA 6.1.

TABELA 14 – Resultados da simulação do ROSA com uma recuperação de 15% e uma água de alimentação de 2500 mg/L.

VAZÃO DO PERMEADO m³/h	Nº DE MEMBRANAS	PRESSÃO bar	POTÊNCIA kW	ENERGIA GASTA kWh/m³	PERMEADO m³/dia		Nº DE PESSOAS ATENDIDAS 5L/Pessoa		Nº DE PAINÉIS 86 W (real)
					4h (Inverno)	7h (Verão)	4h (Inverno)	7h (Verão)	
					0,1	1	5,49	0,13	
	2	4,08	0,09	0,94	0,4	0,7	80	140	2
0,2	1	8,53	0,39	1,97	0,8	1,4	160	280	5
	2	5,60	0,26	1,3	0,8	1,4	160	280	4
0,3	1	11,80	0,82	2,73	1,2	2,1	240	420	10
	2	7,15	0,5	1,65	1,2	2,1	240	420	6
0,4	2	8,76	0,81	2,03	1,6	2,8	320	560	10
0,5	2	10,40	1,2	2,41	2	3,5	400	700	15
0,6	2	12,14	1,69	2,81	2,4	4,2	480	840	21

A simulação mostra que, com uma recuperação de 15% e uma vazão de 0,3 m³/h, usando-se **uma membrana**, a pressão é de 11,8 bars, sendo necessária uma potência de 0,82 kW para uma energia gasta de 2,73 kWh/m³. Enquanto que, com o uso de **duas membranas** e

uma vazão de  $0,6 \text{ m}^3$ , praticamente os mesmos valores são obtidos, ou seja, uma pressão de 12,14 bars, uma potência de 1,69 kW e uma energia gasta de  $2,81 \text{ kWh/m}^3$ .

TABELA 15 – Resultados da simulação do dessalinizador com uma recuperação de 30% e uma água de alimentação de  $2500 \text{ mg/l}$

VAZÃO DO PERMEADO	Nº DE MEMBRANAS	PRESSÃO	POTÊNCIA	ENERGIA GASTA	PERMEADO		Nº DE PESSOAS ATENDIDAS		Nº DE PAINÉIS
					m <sup>3</sup> /dia		5L/Pessoa		
m <sup>3</sup> /h		bar	kW	kWh/m <sup>3</sup>	4h (Inverno)	7h (Verão)	4h (Inverno)	7h (Verão)	86 W (real)
0,1	1	5,88	0,07	0,68	0,4	0,7	80	140	1
	2	4,35	0,05	0,5	0,4	0,7	80	140	1
0,2	1	9,18	0,21	1,06	0,8	1,4	160	280	3
	2	5,96	0,14	0,69	0,8	1,4	160	280	2
0,3	1	12,55	0,44	1,45	1,2	2,1	240	420	6
	2	7,50	0,26	0,87	1,2	2,1	240	420	4
0,4	2	9,07	0,42	1,05	1,6	2,8	320	560	5
0,5	2	10,73	0,62	1,24	2	3,5	400	700	8
0,6	2	12,41	0,86	1,44	2,4	4,2	480	840	11

Com uma recuperação de 30%, usando apenas **uma membrana** e uma vazão de  $0,3 \text{ m}^3/\text{h}$ , a pressão é de 12,55 bars, a potência necessária  $0,44 \text{ kW}$  e a energia gasta  $1,45 \text{ kWh/m}^3$ . Com o uso de **duas membranas** para uma vazão de  $0,6 \text{ m}^3$ , a pressão é de apenas 12,41 bars, a potência  $0,86 \text{ kW}$  e a energia gasta de apenas  $1,44 \text{ kWh/m}^3$ . Obviamente, aumentando a recuperação, a produção do permeado também aumenta e ainda com a vantagem de um gasto de energia menor.

A FIGURA 22 representa as projeções gráficas da ENERGIA X PRESSÃO para recuperações de 15% e 30% respectivamente, com dados das Tabelas 14 e 15.



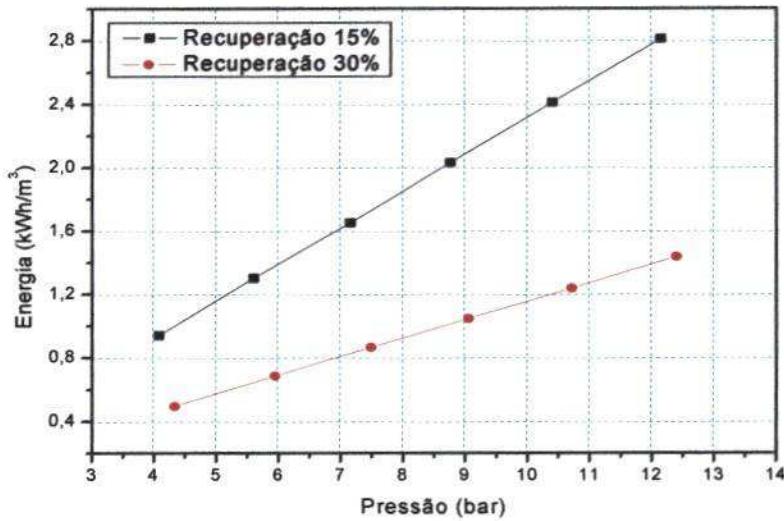


FIGURA 22: Gráfico da Energia em função da Pressão para uma recuperação de 15% e 30% Água de alimentação de 2500 mg/L. Simulador ROSA 6.1.

A obtenção do permeado em cada período depende da quantidade de horas de sol disponível por dia. Verificamos que, dependendo da vazão, temos um aumento da potência e conseqüentemente da energia gasta, proporcional a pressão. Portanto, com o aumento da pressão estaremos obtendo uma maior quantidade de permeado e em fim gastando mais energia.

TABELA 16 – Resultados da simulação do ROSA com uma recuperação de 15% e uma água de alimentação de 3500 mg/L.

VAZÃO DO PERMEADO	Nº DE MEMBRANAS	PRESSÃO	POTÊNCIA	ENERGIA GASTA	PERMEADO		Nº DE PESSOAS ATENDIDAS		Nº DE PAINEIS
					m³/dia		5L/Pessoa		
					4h (Inverno)	7h (Verão)	4h (Inverno)	7h (Verão)	
0,1	1	6,49	0,15	1,5	0,4	0,7	80	140	2
	2	4,96	0,12	1,15	0,4	0,7	80	140	1
0,2	1	9,67	0,45	2,24	0,8	1,4	160	280	5
	2	6,56	0,3	1,52	0,8	1,4	160	280	3
0,3	1	13,07	0,91	3,03	1,2	2,1	240	420	11
	2	8,17	0,57	1,89	1,2	2,1	240	420	7
0,4	2	9,82	0,91	2,27	1,6	2,8	320	560	11
0,5	2	11,51	1,33	2,67	2	3,5	400	700	15
0,6	2	13,30	1,85	3,08	2,4	4,2	480	840	22

TABELA 17 – Resultados da simulação do ROSA com uma recuperação de 30% e uma água de alimentação de 3500 mg/L.

VAZÃO DO PERMEADO	Nº DE MEMBRANAS	PRESSÃO	POTÊNCIA	ENERGIA GASTA	PERMEADO		Nº DE PESSOAS ATENDIDAS		Nº DE PAINEIS
					m³/dia		5L/Pessoa		
					4h (Inverno)	7h (Verão)	4h (Inverno)	7h (Verão)	
0,1	1	7,06	0,08	0,82	0,4	0,7	80	140	1
	2	5,32	0,06	0,62	0,4	0,7	80	140	4
0,2	1	10,58	0,25	1,22	0,8	1,4	160	280	2
	2	7,08	0,16	0,82	0,8	1,4	160	280	2
0,3	1	14,14	0,49	1,64	1,2	2,1	240	420	5
	2	8,70	0,3	1,01	1,2	2,1	240	420	3
0,4	2	10,34	0,48	1,20	1,6	2,8	320	560	5
0,5	2	12,08	0,70	1,40	2	3,5	400	700	7
0,6	2	13,83	0,96	1,60	2,4	4,2	480	840	9

Simulando o sistema para uma recuperação de 15% e 30% observamos que quando usamos **duas** membranas e uma vazão de  $0,4 \text{ m}^3$  a pressão tem praticamente o mesmo valor 9,82 bars e 10,34 bars a **energia gasta** diminui de  $2,27 \text{ kWh/m}^3$  para  $1,20 \text{ kWh/m}^3$ . Enquanto que a **potência** baixa de 0,91 kW para 0,42 kW, isto faz com que o número de painéis fotovoltaicos necessário passe de 11 para apenas 5 o que reduz bastante os gastos.

A FIGURA 23 representa as projeções gráficas da ENERGIA X PRESSÃO para recuperações de 15% e 30% respectivamente, com dados das Tabelas 16 e 17.

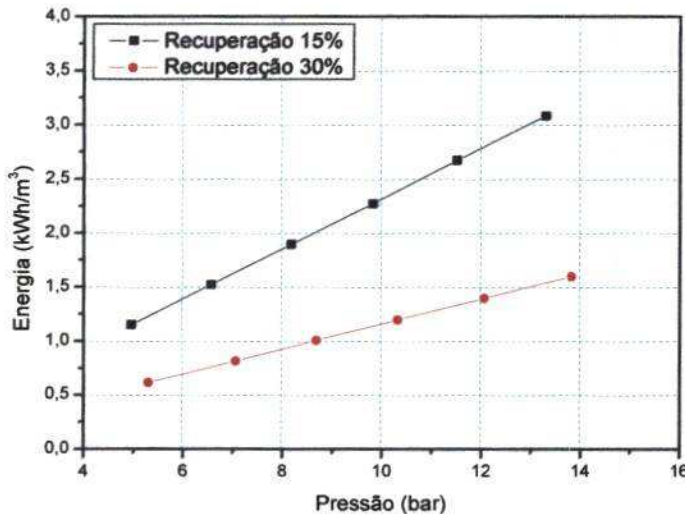


FIGURA 23: Gráfico da Energia em função da Pressão para uma recuperação de 5% e 30% . Água de alimentação de 3500 mg/L. Simulador ROSA 6.1.

#### 4.3.2. Número de pessoas atendidas em função da estação do ano

A partir dos resultados das Tabelas 6 a 14 pode-se estimar o número de pessoas a serem atendidas pelo dessalinizador e projetar o sistema de energia solar (número de painéis fotovoltaicos) para alimentar o dessalinizador

Além disso, e em função dos resultados de irradiação solar, o número de pessoas atendidas difere ao longo do ano em função dos 2 períodos estabelecidos no parágrafo 4.2. No



verão com uma média diária de sol de 7 horas, uma produção de permeado de 0,3 m<sup>3</sup>/h e uma recuperação de 15% permite produzir 2,1 m<sup>3</sup>/dia o que poderá atender em torno de 420 pessoas, considerando um valor de 5 litros p/ pessoa dia de água portátil, valor suficiente para beber e cozinhar.

No inverno, com uma média diária de 4 horas de sol, uma produção de permeado de 0,3 m<sup>3</sup>/h, ou seja, 1,2 m<sup>3</sup>/dia o dessalinizador será capaz de atender 240 pessoas. Esta diminuição na produção de água portátil durante o inverno pode ser compensada com a captação de água da chuva. Nessas condições o bom funcionamento do sistema seria alcançado com 10 painéis fotovoltaicos.

TABELA 18 – Obtenção do permeado em dois períodos (4h e 7h de insolação) com uma recuperação de 15%.

VAZÃO DO PERMEADO m <sup>3</sup> /h	Nº DE MEMBRANAS	PRESSÃO bar	POTÊNCIA kW	ENERGIA GASTA kWh/m <sup>3</sup>	PERMEADO m <sup>3</sup> /dia		Nº DE PESSOAS ATENDIDAS 5L/Pessoa		Nº DE PAINÉIS 86 W (real)
					4h (Inverno)	7h (Verão)	4h (Inverno)	7h (Verão)	
0,1	1	5,99	0,14	1,39	0,4	0,7	80	140	2
	2	4,52	0,11	1,05	0,4	0,7	80	140	1
0,2	1	9,10	0,42	2,11	0,8	1,4	160	280	5
	2	6,08	0,28	1,41	0,8	1,4	160	280	3
0,3	1	12,43	0,86	2,58	1,2	2,1	240	420	10
	2	7,66	0,53	1,77	1,2	2,1	240	420	6
0,4	2	9,29	0,86	2,15	1,6	2,8	320	560	10
0,5	2	10,96	1,27	2,54	2	3,5	400	700	15
0,6	2	12,72	1,77	2,95	2,4	4,2	480	840	21

TABELA 19 – Obtenção do permeado em dois períodos (4h e 7h de insolação) com uma recuperação de 30%.

VAZÃO DO PERMEADO	Nº DE MEMBRANAS	PRESSÃO	POTÊNCIA	ENERGIA GASTA	PERMEADO		Nº DE PESSOAS ATENDIDAS		Nº DE PAINÉIS
					MP/dia		5L/Pessoa		
					m³/h	bar	kW	kWh/m³	4h (Inverno)
0,1	1	6,47	0,07	0,75	0,4	0,7	80	140	1
	2	4,86	0,06	0,56	0,4	0,7	80	140	1
0,2	1	9,88	0,23	1,14	0,8	1,4	160	280	3
	2	6,52	0,15	0,75	0,8	1,4	160	280	2
0,3	1	13,35	0,46	1,55	1,2	2,1	240	420	5
	2	8,10	0,28	0,94	1,2	2,1	240	420	3
0,4	2	9,70	0,45	1,12	1,6	2,8	320	560	5
0,5	2	11,41	0,66	1,32	2	3,5	400	700	8
0,6	2	13,12	0,91	1,52	2,4	4,2	480	840	11

Estas tabelas mostram que com uma recuperação de 30% podemos obter o mesmo permeado, mas com um gasto de energia bem menor porque a potência também é menor.

Para uma recuperação de 15%, uma vazão de 0,3 m³/h de permeado usando-se 1 membrana, podemos atender 240 pessoas durante o INVERNO e 420 no VERÃO necessitando de 10 painéis fotovoltaicos. Este número de painéis é suficiente para gerar energia para que o sistema atenda 320 pessoas no INVERNO e 560 no VERÃO alterando-se apenas o número de membranas de 1 para 2, ou ainda mudando-se a recuperação para 30% este sistema de 2 membranas será capaz de atender 400 pessoas no INVERNO e 700 no VERÃO.

A FIGURA 24 abaixo mostra a influência da pressão na obtenção do permeado levando em consideração os períodos de verão com 7 horas de sol e inverno com 4 horas.

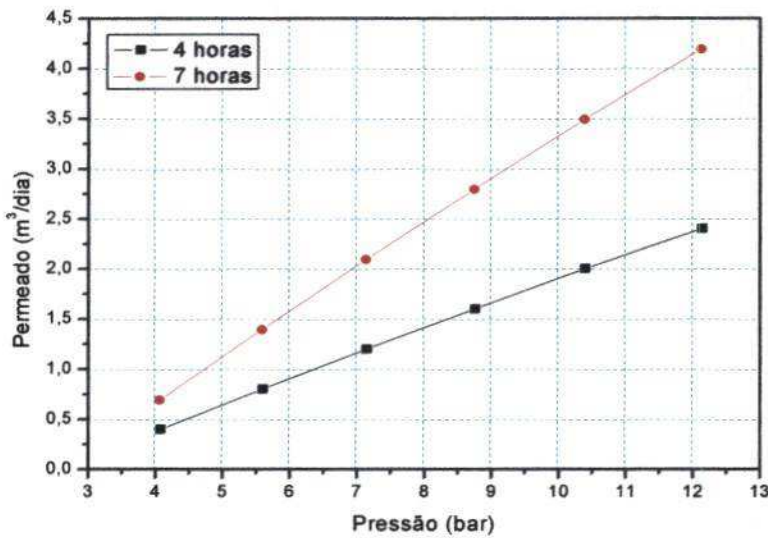


FIGURA: 24 – Gráfico da Obtenção do Permeado em função da Pressão com 4h e 7h de sol. Água de alimentação 2500 mg/L. Simulador ROSA 6.1.

A FIGURA 25 abaixo mostra a influência da potência na obtenção do permeado, levando em consideração os períodos de inverno e verão.

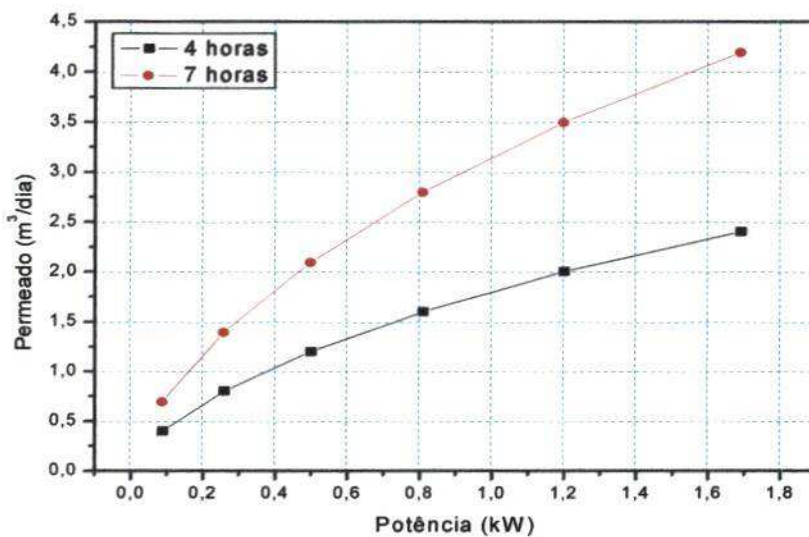


FIGURA : 25 - Gráfico da Obtenção do Permeado em função da Potência com 4h e 7h de sol. Água de alimentação 2500 mg/L. Simulador ROSA 6.1.



Com os resultados obtidos nas TABELAS 18 e 19 podemos ver que o número de pessoas atendidas depende apenas do permeado e este depende da quantidade de insolação do período. No verão, com uma insolação mínima de 7h, produz-se mais água que no inverno com insolação mínima de 4h, o que pode ser compensado armazenando-se água da chuva.

#### 4.3.3 Avaliação fixando as Pressões e variando as concentrações

A tabela abaixo mostra o comportamento: da Vazão do Permeado, da Recuperação, da Potência Energética e da Energia gasta para esta obtenção; controlando-se a Pressão (de 3 a 10 bar); utilizando-se águas com concentrações entre 1000 e 4000 mg/l. ROSA 6.1.

**TABELA 20** - Avaliação fixando as Pressões e variando as Concentrações  
Água de alimentação 2 m<sup>3</sup>/h - Duas Membranas BW30LE4040  
Fator Fouling = 0,85      Eficiência da bomba = 80%      ROSA 6.1

		<b>TDS</b>	<b>Pressão (bar)</b>							
		<b>mg/l</b>	3	4	5	6	7	8	9	10
Vazão do permeado m <sup>3</sup> //h	<b>1000</b>		0,22	0,26	0,29	0,32	0,35	0,38	0,41	0,44
	<b>2000</b>		0,16	0,19	0,23	0,26	0,29	0,32	0,35	0,37
	<b>3000</b>		0,11	0,14	0,17	0,2	0,23	0,26	0,29	0,32
	<b>4000</b>		0,07	0,1	0,13	0,16	0,19	0,22	0,25	0,28
Recuperação %	<b>1000</b>		11,9	12,79	14,46	16,07	17,64	19,18	20,67	22,11
	<b>2000</b>		8,01	9,66	11,27	12,84	14,37	15,85	17,3	18,7
	<b>3000</b>		5,51	7,1	8,66	10,19	11,67	13,12	14,52	15,89
	<b>4000</b>		3,7	5,23	6,74	8,22	9,67	11,08	12,45	13,79
Potência kW	<b>1000</b>		0,41	0,48	0,54	0,61	0,68	0,75	0,81	0,88
	<b>2000</b>		0,41	0,48	0,55	0,62	0,69	0,75	0,82	0,89
	<b>3000</b>		0,41	0,48	0,55	0,62	0,69	0,76	0,83	0,9
	<b>4000</b>		0,42	0,49	0,55	0,62	0,69	0,76	0,83	0,9
Energia Gasta kWh/m <sup>3</sup>	<b>1000</b>		1,85	1,86	1,88	1,9	1,92	1,94	1,97	1,99
	<b>2000</b>		2,58	2,49	2,43	2,4	2,38	2,38	2,37	2,38
	<b>3000</b>		3,77	3,41	3,19	3,05	2,96	2,89	2,85	2,82
	<b>4000</b>		5,61	4,64	4,11	3,79	3,58	3,44	3,34	3,26

Observa-se que a vazão do permeado aumenta com a pressão e diminui com o aumento da concentração ; o mesmo comportamento ocorre com a recuperação, enquanto que a potência praticamente não varia com a concentração aumentando apenas com o aumento da pressão ; já a energia gasta mostra um ligeiro acréscimo com a pressão para uma água de 1000 mg/L, enquanto que para águas mais salobras esta energia tem tendência a diminuir com o aumento da pressão até chegar a um valor mínimo, confirmando os trabalhos de França et al. (2000) e Laborde et al. (2001).

4.3.3.1 Gráficos da vazão do permeado, da recuperação, da potência e da energia em função da concentração.

Veja nas FIGURAS de 26 a 29 os gráficos que expressam os resultados obtidos e que se encontram na tabela 17.

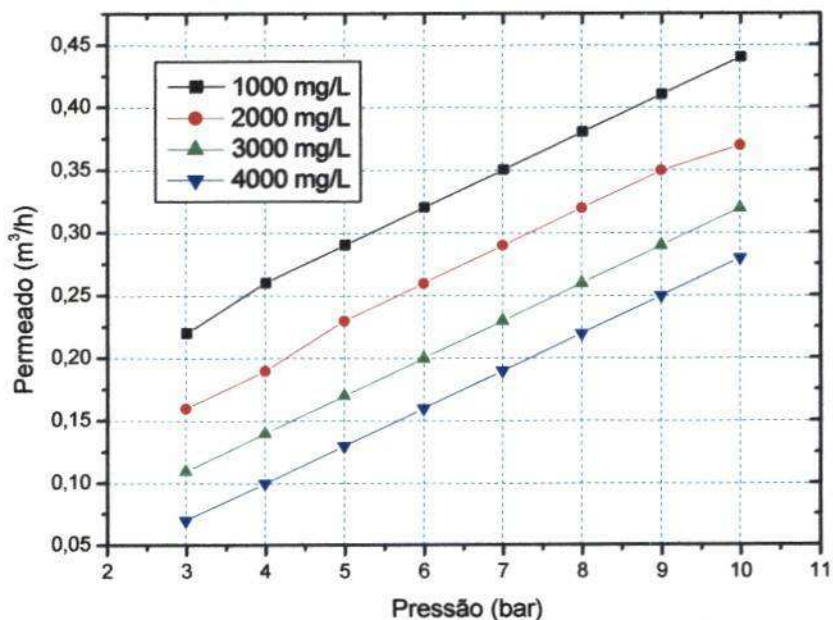


FIGURA - 26. Variação da vazão do permeado em função da pressão aplicada usando o ROSA 6.1. Água de alimentação variando de 1.000 a 4.000 mg/L; fator de fouling 0,85 e eficiência da bomba 80%.

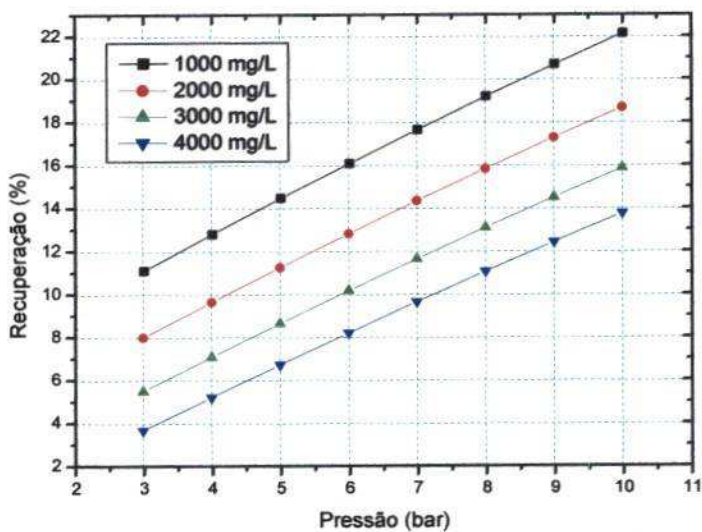


FIGURA - 27 Variação da recuperação em função da pressão aplicada usando o ROSA 6.1. Água de alimentação variando de 1.000 a 4.000 mg/L; fator de fouling 0,85 e eficiência da bomba 80%.

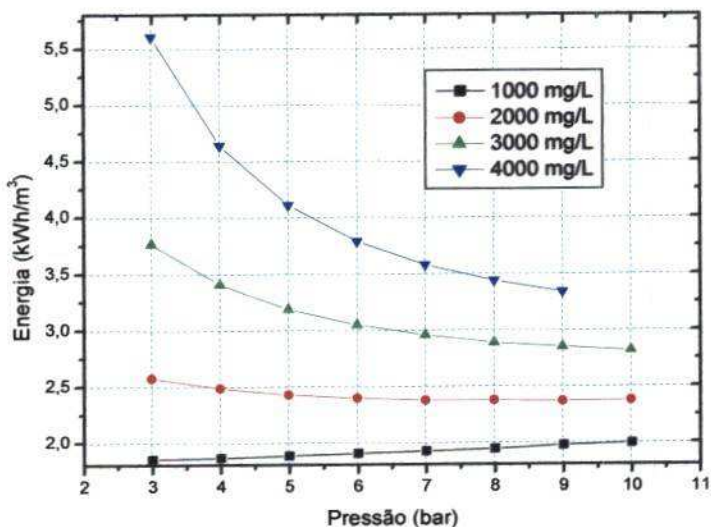


FIGURA - 28 Variação da energia em função da pressão aplicada usando o ROSA 6.1. Água de alimentação variando de 1.000 a 4.000 mg/L; fator de fouling 0,85 e eficiência da bomba 80%.



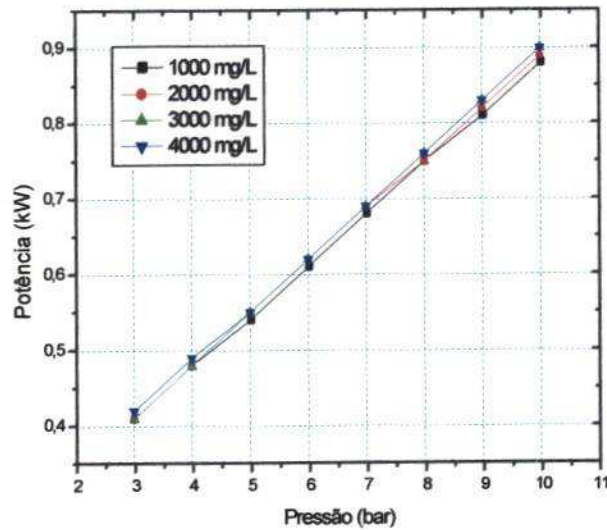


FIGURA 29: Variação da potência em função da pressão aplicada usando o ROSA 6.1. Água de alimentação variando de 1.000 a 4.000 mg/L; fator de fouling 0,85 e eficiência da bomba 80%.

#### 4.4 RESULTADOS DO DESSALINIZADOR

Estes resultados preliminares são referentes a um dessalinizador constituído de 2 membranas BW30LE4040, um motor DC de 90 V e dos demais componentes (Cf § 3.1.1). Este sistema é alimentado diretamente por um conjunto de 12 painéis fotovoltaicos (2 conjuntos de 6 painéis em série, conectados em paralelo) através de um circuito eletrônico (OLIVEIRA, 2007). O sistema operou utilizando soluções sintéticas de NaCl com concentração variando de 1.000 a 3.500 mg/L.

Para análise dos resultados são apresentados os gráficos mais representativos do comportamento da corrente e tensão do motor, da potência elétrica do motor, da pressão, das vazões do permeado e do concentrado, da recuperação do sistema e do consumo de energia.

No início do experimento, através da válvula localizada na saída da tubulação do concentrado, regulou-se manualmente a pressão de operação do sistema.

Os resultados são divididos em duas partes. A primeira é referente ao uso do dessalinizador em época chuvosa na qual a pressão de operação foi regulada para um valor de

3 a 4 kgf/cm<sup>2</sup>. Nestas condições, foram dessalinizadas águas de concentração de 1.000, 2.000 e 3.000 mg/L. A segunda parte se refere ao uso do dessalinizador numa época mais ensolarada na qual a pressão de operação foi regulada a 8 kgf/cm<sup>2</sup>. Nestas condições, a água sintética tinha concentração de 3.500 mg/L.

#### **4.4.1 Águas sintéticas de 1.000, 2.000 e 3.000 mg/L.**

A FIGURA 30 mostra a variação da tensão e da corrente do motor em função do tempo para as três concentrações consideradas. Observam-se grandes variações nos valores da tensão e da corrente, variações esperadas em função da nebulosidade elevada observada durante os dias em que foram realizados estes experimentos. Nesses dias, a irradiação solar permitiu que o conjunto dos painéis fotovoltaicos fornecesse uma corrente máxima de 6 a 8 A e uma tensão máxima de 60 a 80 V ao motor dc, dependendo da concentração da água sintética de alimentação.

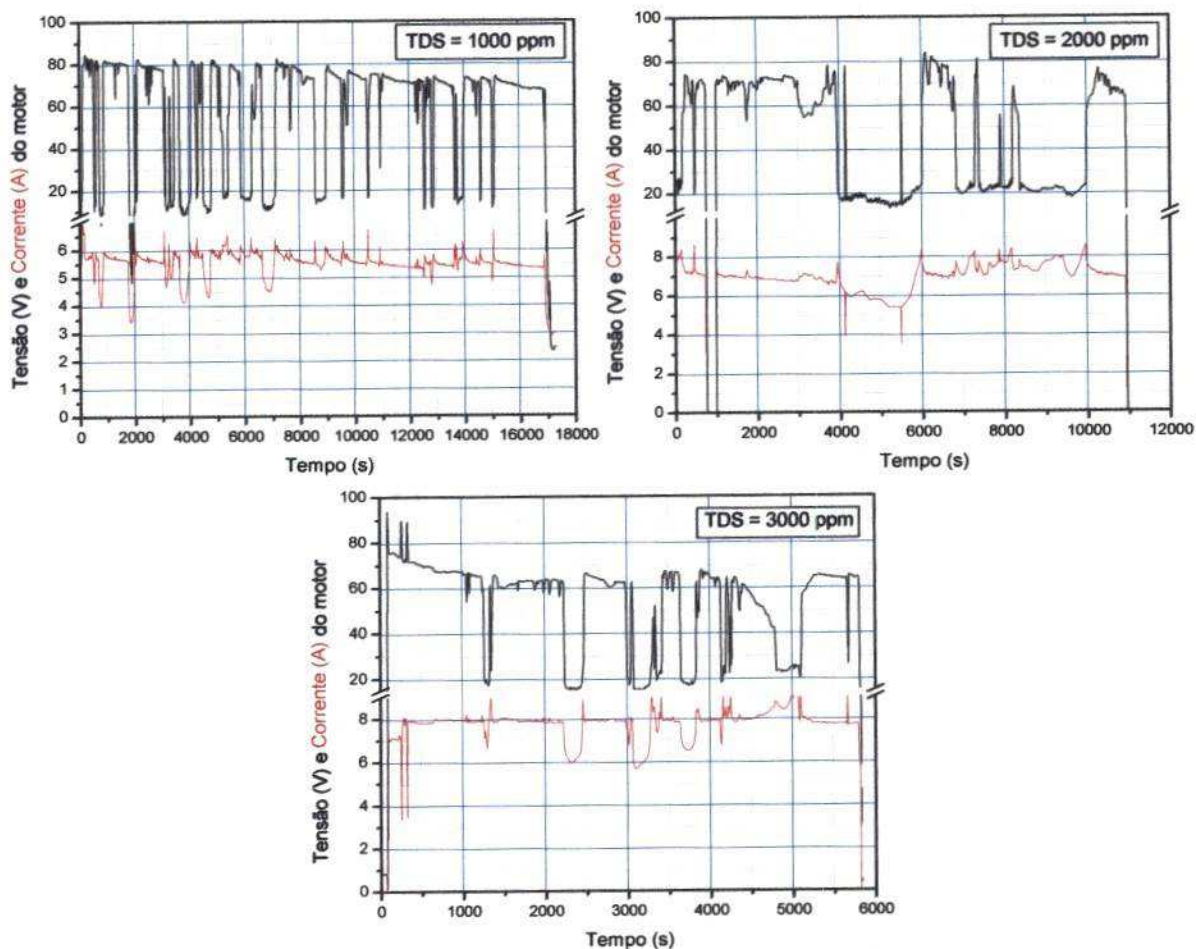


FIGURA 30: Variação da tensão (V) e corrente (A) do motor em função do tempo. Concentração da água de alimentação variando de 1.000 a 3.000 mg/L; pressão inicial aplicada de 3 a 4,7 kgf/cm<sup>2</sup>.

A partir destes dados, a potência pode ser calculada e a sua variação é mostrada na FIGURA 31. Uma potência de 500-600W é necessária nestas condições para dessalinizar a água.



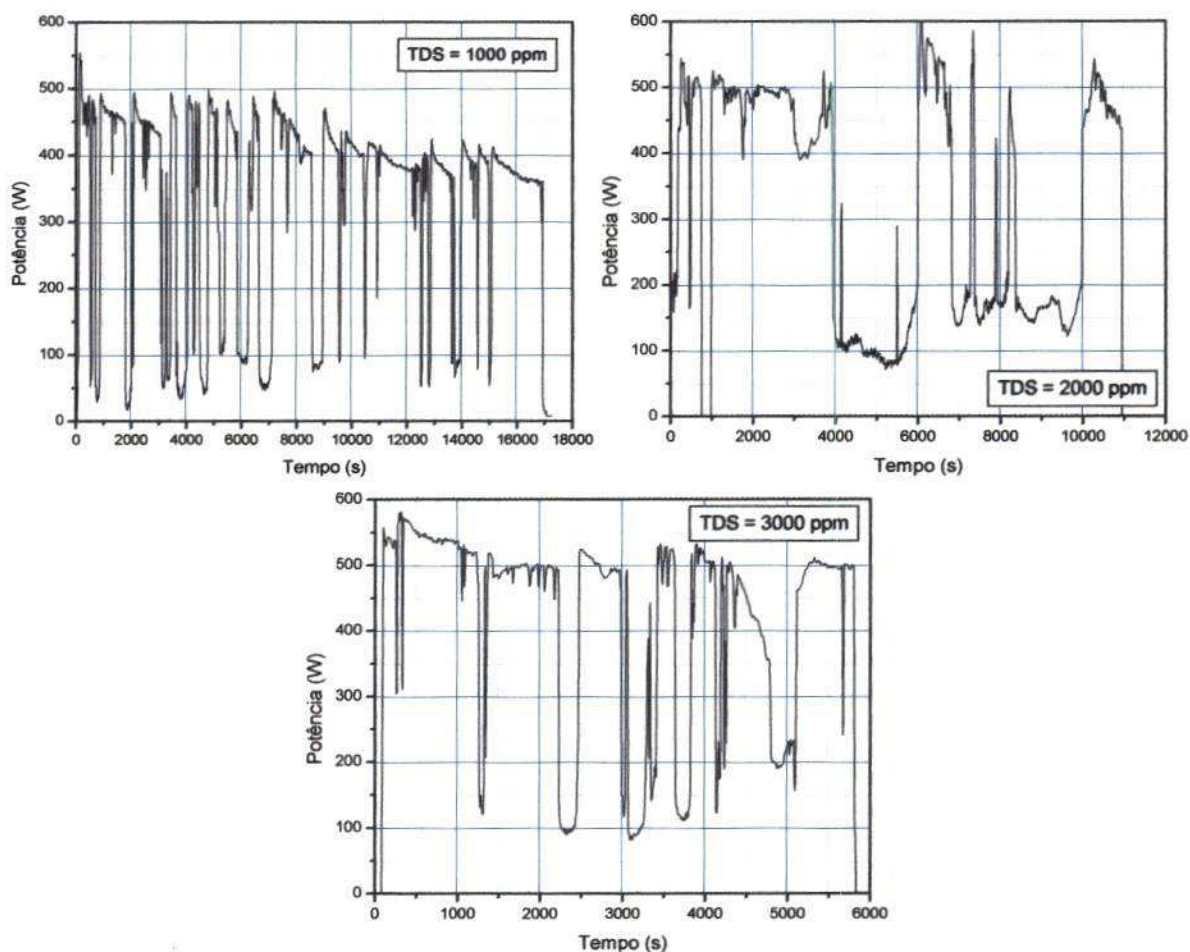


FIGURA 31: Variação da potência (W) em função do tempo. Concentração da água de alimentação variando de 1.000 a 3.000 mg/L; pressão inicial aplicada de 3 a 4,7 kgf/cm<sup>2</sup>.

A FIGURA 32 mostra a variação da pressão em função do tempo. Observam-se grandes variações da pressão aplicada provocadas pela nebulosidade elevada observada durante estes experimentos. Verifica-se que a pressão aplicada é globalmente de 3 kgf/cm<sup>2</sup>, 4 kgf/cm<sup>2</sup> e 4,7 kgf/cm<sup>2</sup> para as respectivas concentrações de águas sintéticas de 1.000, 2.000 e 3.000 mg/L.

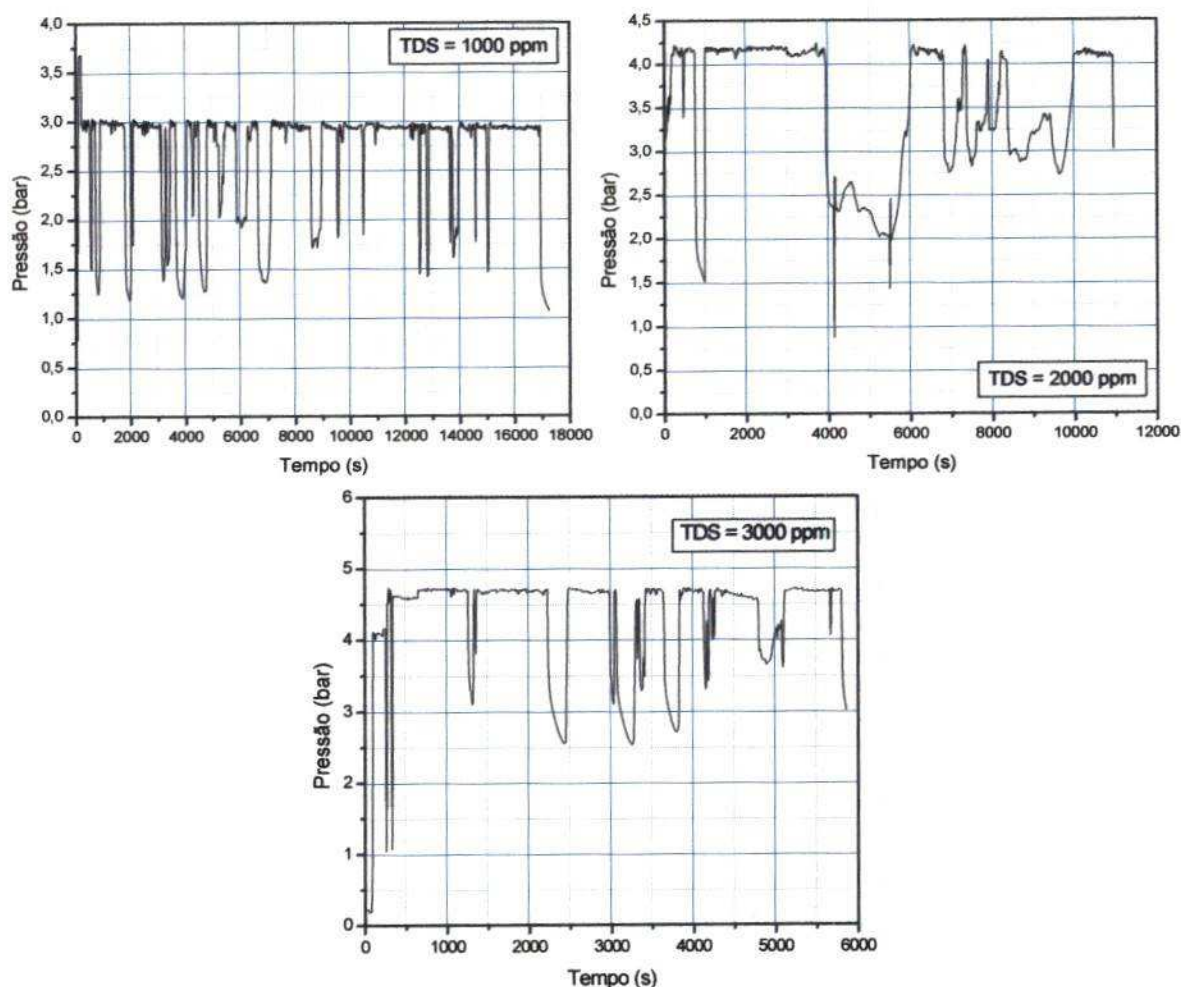


FIGURA 32: Variação da pressão ( $\text{kgf/cm}^2$ ) em função do tempo. Concentração da água de alimentação variando de 1.000 a 3.000  $\text{mg/L}$ ; pressão inicial aplicada de 3 a 4,7  $\text{kgf/cm}^2$ .

Durante as bateladas o sistema de aquisição de dados ligado ao PC não registrou a vazão do permeado, por este motivo não podemos determinar as representações gráficas, porém os valores puderam ser determinados através do registro do hidrômetro instalado na saída do permeado, os dados foram os seguintes. Com uma concentração 1000  $\text{mg/L}$ , a quantidade de água permeada produzida foi de 0,30  $\text{m}^3$  durante um tempo de batelada de 4,83 horas, ou seja, a vazão foi de 0,060  $\text{m}^3/\text{h}$ . Para a concentração de 2000  $\text{mg/L}$ , a quantidade de água produzida foi de 0,22  $\text{m}^3$  durante as 3 horas de batelada, o que dá uma vazão de 0,073  $\text{m}^3/\text{h}$  e para a concentração de 3000  $\text{mg/L}$ , 0,15  $\text{m}^3$  de água potável foram produzidas durante



as 4 horas da batelada, o que dá uma vazão de 0,0375 m<sup>3</sup>/h. (TABELA 21). O aumento da vazão do permeado durante a segunda batelada (2.000 ppm) em relação à primeira batelada (1.000 ppm) pode ser explicado pelo aumento da pressão aplicada (de 3 para 4 kgf/cm<sup>2</sup>), conforme mostra a FIGURA 32, apesar da concentração maior durante a segunda batelada. Em relação à terceira batelada (3.000 ppm), a diminuição do valor da vazão do permeado pode ser explicada pelo fato que, durante as duas primeiras horas da batelada, houve uma produção quase nula devido a baixa irradiação solar.

A tabela abaixo mostra os dados obtidos durante as bateladas utilizando-se água sintética com TDS variando de 1000 a 3000 mg/L tais como as quantidades de permeado e concentrado obtidas, o tempo que durou cada experimento, os quais permitiram calcular as vazões de permeado e concentrado, a vazão de alimentação, a recuperação e a energia gasta em cada caso.

TABELA 21: Resultados obtidos com águas sintéticas de 1.000, 2000 e 3.000 mg/L

Concentração(mg/L)	1000	2000	3000
Permeado (m <sup>3</sup> )	0,30	0,22	0,15
Concentrado (m <sup>3</sup> )	2,68	1,14	1,11
Tempo (h)	4,83	3,00	4,00
Vazão permeado (m <sup>3</sup> /h)	0,0620	0,0730	0,0375
Vazão concentrado (m <sup>3</sup> /h)	0,555	0,380	0,277
Qa (m <sup>3</sup> /h)	0,617	0,453	0,652
Recuperação (%)	10,05	16,11	5,70
Energia (kWh/m <sup>3</sup> )	8,06	6,85	13,33

Para estas 3 concentrações, a energia necessária para produzir 1 m<sup>3</sup>/h de água potável é relativamente elevada, comparando com os valores da literatura (LABORDE et al.,2001,



FRANÇA et al., 2000). Isso pode ser explicado pela baixa pressão aplicada ( $< 5 \text{ kgf/cm}^2$ ) devido às condições climáticas durante os dias em que foram realizados os experimentos

#### **4.4.2 Água sintética de 3.500 mg/L**

Neste caso, a pressão aplicada foi de  $8 \text{ kgf/cm}^2$ , considerando que este experimento foi realizado num dia ensolarado.

A FIGURA 33 apresenta o comportamento da corrente e da tensão fornecidos ao motor dc para que a bomba possa aplicar a pressão desejada. Estes dois parâmetros (corrente e tensão) mostram variações em função do tempo que são ligadas diretamente às variações da irradiação solar recebida pelos painéis. Estas variações passam por um valor máximo ( $I = 7,1 \text{ A}$ ,  $U = 52 \text{ V}$ ) que corresponde ao momento em que não há praticamente nenhuma nuvem e, então, os painéis podem fornecer a potência máxima. Elas passam também por um valor mínimo ( $I = 4,2 \text{ A}$ ,  $U = 32 \text{ V}$ ) que corresponde provavelmente a um momento durante o qual a nebulosidade em cima dos painéis é elevada, contribuindo para a baixa energia recuperada. Abaixo deste valor mínimo, o circuito eletrônico desliga automaticamente o motor DC para que ele não seja danificado. A partir da FIGURA 34, podem-se determinar o comportamento da potência elétrica em função do tempo, isto é, em função das variações de irradiação provocadas pela nebulosidade. Verifica-se que a potência elétrica varia de um valor mínimo de  $135 \text{ W}$  a um valor máximo de  $370 \text{ W}$ .

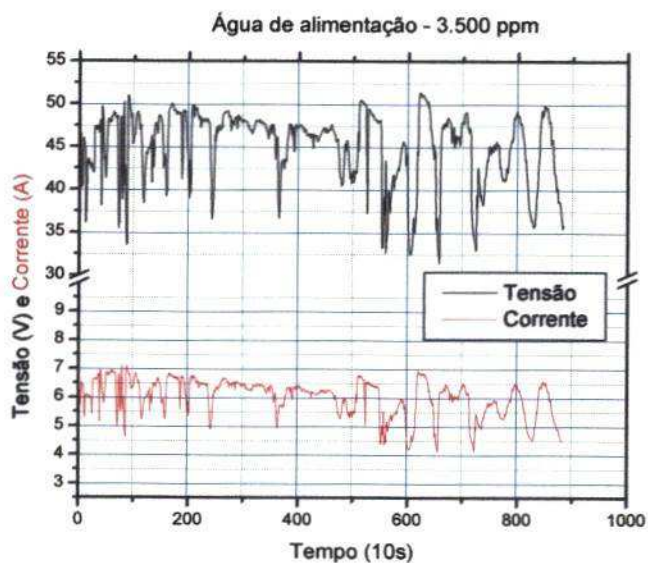


FIGURA 33: Variação da corrente (A) e da tensão (V) em função do tempo. Água de alimentação de 3.500 mg/L; pressão inicial aplicada de 8 kgf/cm<sup>2</sup>.

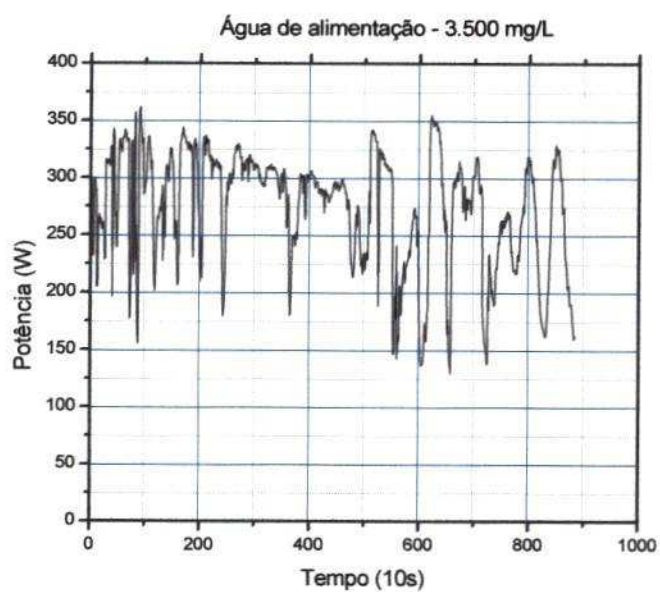


FIGURA 34: Variação da potência em função do tempo. Água de alimentação de 3.500 mg/L; pressão inicial aplicada de 8 kgf/cm<sup>2</sup>.

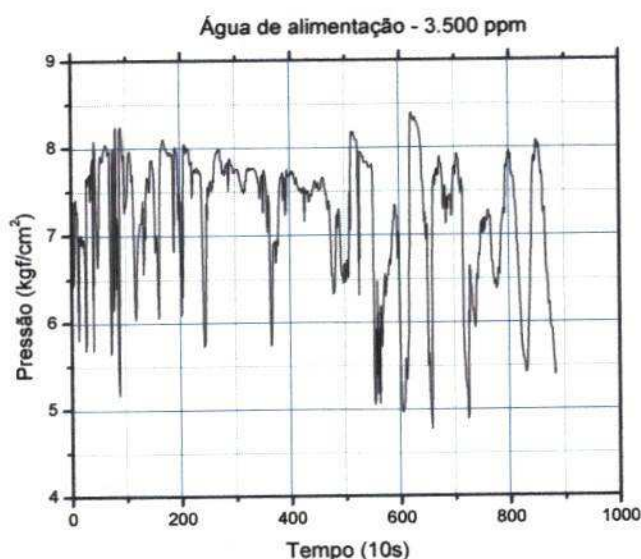


FIGURA 35: Variação da pressão em função do tempo. Água de alimentação de 3.500 mg/L; pressão inicial aplicada de 8 kgf/cm<sup>2</sup>.

Neste intervalo de potência no qual o motor trabalha, a pressão aplicada pela bomba de alta pressão varia de mais ou menos 5 a 8 kgf/cm<sup>2</sup> (FIGURA. 35). Verifica-se também que a potência elétrica aumenta com a pressão de operação. Isto se deve ao fato de que a motor bomba depende da pressão de descarga e da alimentação. Portanto, para fornecer uma pressão maior ao sistema de osmose inversa, a bomba necessita de mais potência.

Com estas pressões aplicadas, o sistema de dessalinizador solar é capaz de produzir de 1 L/min (ou seja, 0,06 m<sup>3</sup>/h) de água potável e em torno de 4 L/min de concentrado quando a insolação é baixa devido à passagem de nuvens até 4,2 L/min (ou seja, 0,252 m<sup>3</sup>/h) de água potável e em torno de 6,25 L/min de concentrado quando a insolação é alta, conforme mostra a FIGURA 36. Isto significa que, no intervalo de tempo de 2,5 horas que é tempo que durou esta batelada, o sistema foi capaz de produzir 0,468 m<sup>3</sup> de água potável. Portanto, considerando a época do ano (verão), o sistema seria capaz de produzir 1,31 m<sup>3</sup>/dia de água potável, o que permitiria atender cerca de 260 pessoas, a razão de 5 L/pessoa.



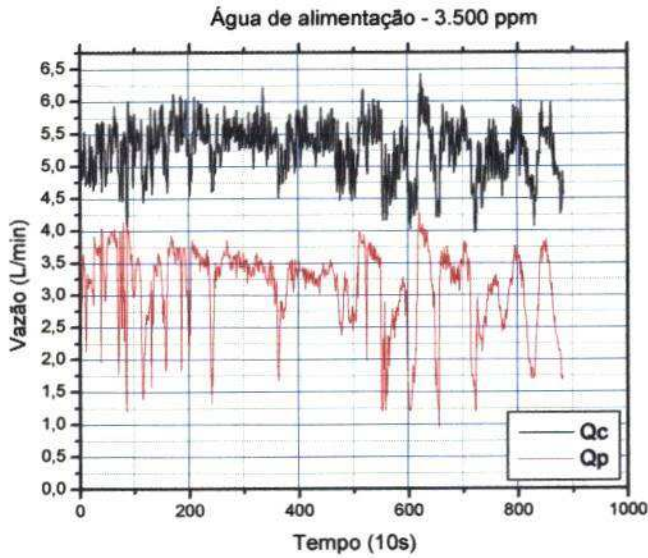


FIGURA 36: Variação das vazões do permeado e do concentrado em função do tempo. Água de alimentação de 3.500 mg/L; pressão de 8 kgf/cm<sup>2</sup>.

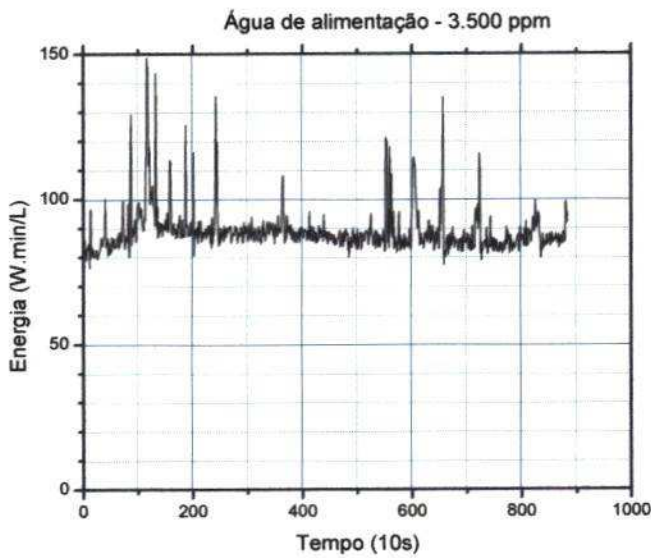


FIGURA 37: Variação do consumo de energia em função do tempo. Água de alimentação de 3.500 mg/L; pressão de 8 kgf/cm<sup>2</sup>.

Um sistema de dessalinização alimentado pela rede elétrica trabalha com uma vazão de alimentação constante. Nesta condição, quando se aumenta a pressão, a vazão do permeado

aumenta ao mesmo tempo que a vazão do concentrado diminui, provocando um aumento da recuperação.

Neste dessalinizador alimentado por energia solar não estabilizada por acumuladores, a vazão de alimentação não é constante. Ela passa de 5 L/min a 10,45 L/min quando a pressão passa de 5 kgf/cm<sup>2</sup> a 8 kgf/cm<sup>2</sup>. Portanto, quando se aumenta a pressão aplicada, aumenta-se não somente a vazão do permeado, mas também a vazão do concentrado (FIGURA. 36). Entretanto a vazão do permeado aumenta de maneira mais significativa do que a vazão do concentrado provocando um aumento da recuperação em função do aumento da pressão. Ela passa de 20% na pressão de 5 kgf/cm<sup>2</sup> e aumenta até 40,2 % na pressão de 8 kgf/cm<sup>2</sup>.

Nestas condições, o dessalinizador solar apresenta um consumo de energia médio de 90 Wmin/L (FIGURA. 37), ou seja, 1,5 kWh/m<sup>3</sup>.

Com uma pressão de 8 kgf/cm<sup>2</sup>, o dessalinizador solar testado produz 0,252 m<sup>3</sup>/h (FIGURA. 36) com uma recuperação de 40% (FIGURA.36). Pra isso o sistema necessita de uma potência de 370 W (FIGURA. 34) e tem um consumo de energia médio de 1,5 kWh/m<sup>3</sup> (FIGURA. 37).

Em relação ao sistema de energia solar, percebe-se que o número de painéis fotovoltaicos utilizados (14) para alimentar o dessalinizador solar é excessivo em relação à potência consumida pelo motor dc (130 a 370 W). Os 14 painéis fotovoltaicos têm uma potência nominal de 1,54 kW, ou seja, em torno de 1,2 kW reais. Isso mostra que, se o circuito eletrônico que substitui os acumuladores é eficiente para uma partida suave, para um controle da tensão e da corrente aplicadas, ele não substitui a função do "MPP Track" que procura o melhor ponto de funcionamento dos painéis fotovoltaicos, fazendo com que uma grande parte da energia dos painéis é desperdiçada.

#### 4.5 COMPARAÇÃO SIMULADOR – DESSALINIZADOR SOLAR

Analisando os resultados do dessalinizador podemos compará-los com os dados obtidos na simulação com o ROSA 6.1.

TABELA: 22 - Comparação entre os dados fornecidos pelo simulador e aqueles encontrados na prática, com uso do dessalinizador.

	<b>Vazão do Permeado m<sup>3</sup>/h</b>	<b>Pressão bar</b>	<b>Potência kW</b>	<b>Energia kWh/m<sup>3</sup></b>
<b>Rosa 30%</b>	0,300	8,7	0,300	1,00
<b>Sistema 20%</b>	0,060	5,0	0,135	2,25
<b>Sistema 40%</b>	0,252	8,0	0,370	1,47

Verificando o comportamento da **pressão** percebemos que existe uma diferença entre os resultados teóricos, fornecidos pelo simulador, e aqueles obtidos na prática, usando-se o dessalinizador. Vimos que na prática o sistema exige o fornecimento de uma pressão maior, o que fará com que haja também um aumento tanto na **potência** a ser fornecida como na **energia** gasta.

Este aumento pode está ligado ao seguinte fator: o motor utilizado no simulador é de corrente alternada enquanto o motor do dessalinizador trabalha com corrente contínua.



## CAPÍTULO V

### 4 CONCLUSÃO

Analisando a radiação solar para a cidade de Campina Grande, com base em dados fornecidos pelo Atlas Solarimétrico, a Sundata e o Radasol, percebemos uma grande semelhança em seus valores, o que nos transmite confiabilidade neste resultado e verificando que a região apresenta um alta índice de irradiação solar.

A EMBRAPA forneceu a **insolação média mensal** para Campina Grande, de janeiro de 2003 à junho de 2007. Com estes dados podemos dividir o ano em dois períodos: VERÃO e INVERNO. O primeiro período iria de setembro à abril com uma insolação mínima de 7h por dia e o segundo de maio à agosto com um valor mínimo de 4h de sol por dia. Podemos ver que a grande demanda de sol durante o verão nos permite dessalinizar uma quantidade considerável de água, já no inverno como a insolação diminui, podemos suprir a necessidade de água potável captando água da chuva.

O consumo energético de um dessalinizador foi avaliado utilizando o software ROSA 6.1 com uma água de alimentação de concentração variando entre 1.000 e 4.000 mg/L. Com recuperação de 15% e usando-se 1 membrana; obtendo 0,3 m<sup>3</sup>/h de permeado são gastos 2,73 kWh/m<sup>3</sup> de energia e com 2 membranas obtém-se uma vazão dupla gastando 2,81 kWh/m<sup>3</sup>. Já com uma recuperação de 30% este mesmo processo pode ser realizado com uma redução no consumo de energia de 1,45 kWh/m<sup>3</sup> (0,3 m<sup>3</sup>/h) para 1,44 kWh/m<sup>3</sup> na obtenção de 0,6 m<sup>3</sup>/h de permeado. Portanto, este último seria o ideal, pois obtemos uma maior quantidade de água potável com um menor gasto de energia.

O dessalinizador solar foi testado com uma concentração de água de alimentação variando de 1.000 a 3.000 mg/L, mostrando uma produção abaixo de 0,075 m<sup>3</sup>/h numa pressão aplicada inferior a 5 kgf/cm<sup>2</sup>. Nestas condições, uma potência de 600 W é necessária, o que conduz a um consumo de energia elevado, superior a 6,8 kWh/m<sup>3</sup>.

O dessalinizador solar foi testado com uma concentração de água de alimentação de 3.500 mg/L em melhores condições climáticas e mostrou que, com uma pressão de 8 kgf/cm<sup>2</sup>, ele produz 0,252 m<sup>3</sup>/h com uma recuperação de 40%. Para isso o sistema necessita de uma potência de 370 W e tem um consumo de energia médio de 1,5 kWh/m<sup>3</sup>.

O número de painéis fotovoltaicos utilizados é grande demais em relação à potência consumida pelo motor DC devido à ausência de um sistema "MPP Tracking", que não é uma das funções do circuito eletrônico.

Conforme vimos no parágrafo anterior, a simulação feita para obtenção do permeado e o gasto de energia, quanto maior a quantidade de permeado obtido maior o número de pessoas atendidas. Quando comparamos os resultados do simulador com os do dessalinizador, percebemos um aumento nos valores práticos.

## **CAPÍTULO V I**

### **5 PERSPECTIVAS**

Para que tenhamos dados mais precisos se faz necessário outras análises práticas, não apenas com água sintética, mas que sejam utilizados água de poços com concentrações salinas diferentes.

Uso de um motor DC de baixa tensão, entre 24 V e 48 V, o que provocaria um aumento na corrente e, conseqüentemente, uma estabilização da vazão de alimentação.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ABDALLAHA S.; ABU-HILAL, M. & MOHSEN M. S., **Performance of a photovoltaic powered reverse osmosis system under local climatic conditions**. *Desalination*, 183 (2005) 95-104.

ACIOLI, J. L. – **Fontes de energia** – Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1994. p.92.

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

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

AMJAD, Z. **Reverse Osmosis: Membrane Technology, Water Chemistry & Industrial Applications**. Van Nostrand Reinhold, 1993.

ANEEL - **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Portal da Agência Nacional de Energia Elétrica, informações sobre todo o setor elétrico. Disponível em: [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br). Acesso em: 15/02/2007.

ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL Disponível em: [www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Info5\\_pag8-9.PDF](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Info5_pag8-9.PDF) - Acesso em: 20/01/2007.

BARRETO, A. V. P. & HONORATO, C. F. **Manual de sobrevivência na selva acadêmica**. Rio de Janeiro: Objeto Direto, 1998.

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

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

CARTA, J. A., GONZÁLEZ, J. & SUBIELA, V., **Operational analysis of an innovative wind powered reverse osmosis system installed in the Canary Islands**. *Solar Energy*, 75 (2003) 153–168.

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 (1998) 105-112.

EHRENMAN, G., **Not a Drop to Drink: By the Middle of this Century, 7 Billion People could be Short of Water. At The Best, it will be 2 Billion People**. *Mechanical Engineering Magazine*. 125 (2003) 46-49.

EL-DESSOUKY, H. T. & ETOUNEY, H. M. **Fundamentals of Salt Water Desalination**. Ed. Elsevier/2002 - Capítulo 1 , p. 11-12.

EMBRAPA - **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Disponível em: < [www.embrapa.br/](http://www.embrapa.br/) - 49k - Acesso em: 20/01/2007>.

FACHIN, O. **Fundamentos de metodologia**. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2001.

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

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.

GIL, A. C., **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

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 electro dialysis**. *Desalination*, 98 (1994) 485-493.

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



- KAHDIM, A. S. ISMAIL. S. & JASSIMB, A. A., **Modelling of reverse osmosis Systems**. Desalination, 158 (2003) 239-229.
- KALOGIROU, S., **Solar thermal collectors and applications**, Progress in Energy and combustion science, 30 (2005) 231-295.
- LABORDE, H. M., FRANÇA, K. B., NEFF, H. & 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.
- 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.
- MCVEICH, J. C. **Sun Power – an introduction to the applications of solar energy**. Pergamon International Library, England, 1979.
- MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Programa Luz para todos**. Disponível em: [www.mme.gov.br/programs\\_display.do?prg=8](http://www.mme.gov.br/programs_display.do?prg=8) - 14k – Acesso em: 20/01/2007.
- MOHSEN, M. S. & JABER, J. O., **A photovoltaic-powered system for water desalination**. Desalination, 138 (2001) 129-136.
- MORENO, F. & PINILLA, A. **Preliminary experimental study of a small reverse osmosis wind-powered desalination plant**. Desalination, 171 (2004) 257-265.
- NISHUMARA, M. & KOYAMA K., **Reverse osmosis**, in Osada, y & Nakagowa, T. (ed) Membrane Science and Technology, Marcel Dekker, Inc, New York, 1992.
- OLIVEIRA, A. R., a) Desempenho de um sistema via osmose inversa, em escala piloto, alimentado por painéis fotovoltaicos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química: UFCG, Campina Grande (PB), 2002; b) Desempenho de um sistema de dessalinização via osmose inversa usando energia não-convencional, sem a utilização de acumuladores, Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande (PB), 2007.
- PALZ, W. **Energia solar e fontes alternativas**. São Paulo: Hemsun, 1981.
- PERRY, R. H. & GREEN, D. W. **Chemical Engineering Handbook**. McGraw-Hill. USA. 7<sup>th</sup> edition, 1997.
- PESTANA, I. N., LATORRE, F. J. G., ESPINOZA, C. A. & GOTOR, A. G., **Optimization of RO desalination systems powered by renewable energies. Part I: Wind energy**. Desalination, 160 (2004) 293-299.



PROINFA: **Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica.** Disponível em: [www.mme.gov.br/programs\\_display.do?prg=5](http://www.mme.gov.br/programs_display.do?prg=5) - 12k. Acesso em: 15/02/2007.

RADIOBRÁS. **Dessalinização é uma das Opções para Combater a Seca no Nordeste.** Agência Brasil. Ciência, Tecnologia & Meio Ambiente. (2001). [www.radiobras.gov.br/ct/2001/materia\\_261001\\_11.htm](http://www.radiobras.gov.br/ct/2001/materia_261001_11.htm).

RALUY, R. G., SERRA, L., & UCHE, J.; **Life cycle assessment of desalination technologies integrated with renewable energies.** Desalination, 183 (2005) 81-93.

RICHARDS, B. S. & SCHÄFER, A. I., **Photovoltaic-powered desalination system for remote Australian communities.** Renewable Energy, 28 (2003) 2013-2022.

RODRIGUEZ, L. G., **Seawater desalination driven by renewable energies: a review.** Desalination, 143 (2002) 103-113.

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, 1º ed. , 1997.

SCHWINGE, J., NEAL, P. R., WILEY, D. E., FLETCHER, D. F. & FAUL, A. G. **Spiral wound module and spacers Review and analysis.** Journal of Membrane Science, 242 (2004) 129-153

SHAH, A., MIEIR J., TSCHARNER, R. & WYRSCH, N. **Photovoltaic Power Generation.** Plasma Physics & Controlled Fusion, 37 (1992) 1893.

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

SUNDATA. **Cálculo da Radiação Solar.** Potencial Energético Solar. Disponível em: [www.cresesb.cepel.br/potencial\\_solar.htm](http://www.cresesb.cepel.br/potencial_solar.htm). Acesso em: 15/02/2007.

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

TRAUBE, M. **Physiologie und Wisseischlaftliche medicin,** In: Reischet and Dubois-REYNOUDS, eds.; Archiv fuz anatomie, Leipzig, 1867.

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

Tundisi, J. G. (2003). **Água no Século XXI – Enfrentando a Escassez.** RiMa Editora, ISBN:85-86552-51-8, São Carlos (SP).

TZEN, E. PERRAKIS, K. & BALTAS, P., **Design of stand alone PV-desalination system for rural areas.** Desalination, 119 (2003) 327.

UCHE, J., VALERO, A. & SERRA, L. (2002). **La Desalación y Reutilización como Recursos Alternativos**. Gobierno de Aragón, INO Reproducciones S. A., Z-1352, 2002.

WEINER, D., FISHER, D., MOSES, E. J., KATZ, B. & MERON, G., **Operation experience of a solar – and wind-powered desalination demonstration plant**, *Desalination*, 137 (2001) 7-13.