



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DE UM DESSALINIZADOR VIA OSMOSE INVERSA USANDO
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: ESTUDO DO CONSUMO
ENERGÉTICO E CUSTOS**

ANA KARLA CRISPIM SOARES

CAMPINA GRANDE – PB
MARÇO DE 2008

**AVALIAÇÃO DE UM DESSALINIZADOR VIA OSMOSE INVERSA USANDO
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: ESTUDO DO CONSUMO
ENERGÉTICO E CUSTOS**

ANA KARLA CRISPIM SOARES

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

Área de Concentração: Operações e Processos.

Orientadores: Prof. Kepler Borges França (Ph.D)

Prof. Dr. Hervé Michel Laborde

CAMPINA GRANDE – PB

MARÇO DE 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S676a

2008 Soares, Ana Karla Crispim.

Avaliação de um dessalinizador via osmose inversa usando energia solar fotovoltaica: estudo do consumo energético e custos / Ana Karla Crispim Soares. — Campina Grande, 2008.

89f. : il.

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

Referências.

Orientadores: Kepler Borges França, Ph.D, Dr. Hervé Michel Laborde.

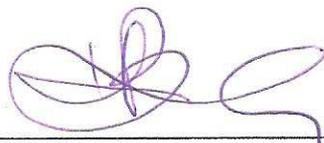
1. Água. 2. Dessalinização. 3. Osmose Inversa. 4. Painel Fotovoltaico. I. Título.

CDU-66.081.63(043)

**AVALIAÇÃO DE UM DESSALINIZADOR VIA OSMOSE INVERSA USANDO
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: ESTUDO DO CONSUMO
ENERGÉTICO E CUSTOS**

Ana Karla Crispim Soares

Dissertação defendida e aprovada em 25/03/2008, pela banca examinadora constituída dos seguintes professores.



Prof. Kepler Borges França (Ph.D)
Orientador



Prof. Dr. Hervé Michel Laborde
Orientador



Prof. Dr. Vimário Simões da Silva
Examinador



Prof. Dr. Luís Gonzaga S. Vasconcelos
Examinador

CAMPINA GRANDE – PB

MARÇO DE 2008

DEDICATÓRIA

Minha Mãe e meus Irmãos.
Companheiros de todas as horas.

Meus Parentes,
Vivos: minhas desculpas por qualquer erro ou omissão;
Aos que já se foram: minhas homenagens e saudades.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus por me dar força e coragem para vencer mais uma etapa da minha vida.

Aos meus pais, irmãos e meu querido noivo pela paciência, incentivo compreensão e apoio.

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

A todos que fazem o Laboratório de Referência em Dessalinização.

Aos amigos e colegas do curso pelo companheirismo, colaboração, paciência e discussões deste trabalho, em especial a Sérgio, Jorge, Edijoelma e à minha grande amiga Rúbia Rafaela.

A Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química e a Universidade Federal de Campina Grande, pela atenção.

A CAPES pelo suporte financeiro.

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE QUADRO.....	viii

CAPÍTULO I

1.0	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18

CAPÍTULO II

2.0	ESTUDOS BIBLIOGRAFICOS	19
2.1	A Dessalinização da Água	19
2.2	Processos de Dessalinização	21
2.3	Fundamentos da Tecnologia	24
2.4	Incrustações	26
2.5	Pré-Tratamento	26
2.6	Disposição do Concentrado	27
2.7	Principais Equações Empíricas e Fatores que regem o Processo de OI	29
2.7.1	Pressão Osmótica	29
2.7.2	Fluxo do Permeado	30
2.7.3	Fluxo do Concentrado	31
2.7.4	Taxa de Rejeição de Sais	32
2.7.5	Fluxo de Passagens de Sais	32
2.7.6	Balanço de Massa	33
2.7.7	Recuperação	33
2.7.8	Consumo de Energia	34
2.8	Energia Solar	36
2.9	Histórico da Geração Fotovoltaica	41
2.10	Conversão Fotovoltaica	42
2.11	Aplicações da Energia Fotovoltaica	43
2.12	Sistemas Fotovoltaicos Autônomos	44
2.13	Vantagens das Células Solares Fotovoltaicas	45
2.14	Configurações dos Painéis	45
2.15	Sistemas com carga CC sem armazenamento	45
2.16	Sistema de Conversão Fotovoltaica	46

2.17	Módulo Fotovoltaico	46
2.18	Energia Solar para Sistemas de Dessalinização	49
2.19	Experiências Mundiais em Unidades OR-FV	51
CAPÍTULO III		
3.0	EXPERIMENTAL	54
3.1	Sistema de Osmose Inversa	54
3.2	Sistema de Dessalinização via Osmose Inversa	54
3.3	Sistema de Conversão de Energia Elétrica	57
3.3.1	Módulos Fotovoltaicos	59
3.3.2	Sistema de medição	60
3.3.3	Sistema de controle - Circuito eletrônico regulador de tensão DC para funcionamento com células fotovoltaicas	61
3.4	Procedimento Experimental	62
CAPÍTULO IV		
4.0	RESULTADOS	64
4.1	Comportamento da Corrente, Tensão do Motor, Potência e Pressão com o Tempo	64
4.2	Comportamento das Vazões do Permeado e Concentrado com o Tempo	67
4.3	Comportamento da Recuperação com o Tempo	69
4.4	Comportamento do Consumo de Energia com o Tempo	70
4.5	Experimentos	71
4.6	Balanço de Custo de um Sistema de Dessalinização Usando Energia Solar Fotovoltaica	72
4.7	Perfil do Custo da Água Dessalinizada em Função do Consumo e Produção Diária	74
CAPÍTULO V		
5.0	CONCLUSÕES	77
CAPÍTULO VI		
6.0	PERSPECTIVAS	78
CAPÍTULO VII		
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
ANEXOS		
		86
	APÊNDICE I – Boletim técnico da membrana	87
	APÊNDICE II – Especificações do painel fotovoltaica	88
	APÊNDICE III – Simulação do ROSA (Reverse Osmosis System Analysis)	89

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	área da membrana (m^2)
ΔC	gradiente concentração (mol/L)
c_i	concentração molar do soluto (mol/L)
C_a	concentração da solução de alimentação (mg/L)
C_c	concentração do concentrado (mg/L)
C_p	concentração do permeado (mg/L)
CC	corrente contínua
d	dia
E_p	consumo de energia prático
E_{emp}	energia empírica consumida
FV	fotovoltaico
h	hora
I	corrente elétrica
J_p	fluxo do permeado ($L/m^2 \cdot h$)
J_s	fluxo mássico do soluto ($kg/m^2 \cdot h$)
K_i	Coefficiente de Transferência de Massa do Solute
K_w	Coefficiente de Transferência de Massa do Solvente
L	litro
LABDES	Laboratório de Referencia em Dessalinização
mg	miligrama
min	minuto
OI	osmose inversa
ΔP	gradiente de pressão aplicada
PPM	– mg/L
PS	passagem de sais
P_a	pressão de alimentação (kgf/cm^2)
P_c	pressão do concentrado (kgf/cm^2)
P_p	pressão do permeado (kgf/cm^2)
pH	potencial hidrogeniônico
Q_a	vazão de alimentação (m^3/h)
Q_p	vazão do permeado (m^3/h)

Q_{pr}	vazão do permeado real ($m^3/t_{operação}$)
Q_c	vazão do concentrado total (m^3/h)
V_{pr}	volume do permeado real (m^3/h)
RS	rejeição de sais (%)
r	recuperação do sistema (%)
R	constante dos gases ideais ($kgf.L/cm^2.mol.K$)
STD	sólidos totais dissolvidos
T	temperatura ($^{\circ}C$)
TDS_a	sólidos totais dissolvidos na corrente da alimentação
TDS_c	sólidos totais dissolvidos na corrente do concentrado
TDS_p	sólidos totais dissolvidos na corrente do permeado
UFMG – Universidade Federal de Campina Grande	
V	Tensão (volt)
Pot	Potência (watt)

SÍMBOLOS GREGOS

v_i	carga elétrica do íon i ($kgf.L/cm^2.mol.K$)
$\Delta\pi$	gradiente de pressão osmótica (kgf/cm^2)
π	pressão osmótica (kgf/cm^2)
κ	condutividade elétrica
η_b	eficiência da bomba (%)
η_m	eficiência do motor (%);

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Disponibilidade hídrica	19
Figura 2.2 - Representação do processo de osmose natural	20
Figura 2.3 - Representação do processo de osmose inversa	20
Figura 2.4 - Dessalinizadores: Capacidade instalada no mundo por tipo de tecnologia	21
Figura 2.5 – Mercado mundial de osmose inversa desde 1990 e projeção para 2010	23
Figura 2.6 - Secção esquemática da membrana de osmose inversa em espiral	25
Figura 2.7 - Porcentagem de custos de diferentes componentes de operação e manutenção de unidades de dessalinização de águas salobras	35
Figura 2.8 - Painel Fotovoltaico	38
Figura 2.9 - Evolução da produção mundial de módulos FV	41
Figura 2.10 - Célula Fotovoltaica	43
Figura 2.11 - Sistema fotovoltaico com carga CC sem armazenamento	46
Figura 2.12 - Sistema fotovoltaico básico em blocos	46
Figura 2.13 - Configuração da célula solar	47
Figura 2.14 - Configuração básica da unidade OI-FV pioneira no Brasil	53
Figura 3.1 - Sistema de dessalinização via osmose inversa	54
Figura 3.2 - Vista frontal do sistema de dessalinização	56
Figura 3.3 - Vista lateral do sistema de dessalinização	56
Figura 3.4 – Sistema de membranas	57
Figura 3.5 – Painéis fotovoltaicos	58
Figura 3.6 – Circuito eletrônico	58
Figura 3.7 – Janela do software Agilent BenchLink (Data Acquisition)	58
Figura 3.8 - Arranjo dos painéis fotovoltaicos	59
Figura 3.9 - Sistema de armazenamento de dados	62
Figura 4.1 - Comportamento da corrente com o tempo	65
Figura 4.2 - Comportamento da tensão com o tempo	66
Figura 4.3 - Comportamento da potência com o tempo	66
Figura 4.4 - Comportamento da pressão com o tempo	67
Figura 4.5 - Comportamento da vazão do permeado com o tempo	68
Figura 4.6 - Comportamento da vazão do concentrado com o tempo	68
Figura 4.7 - Comportamento da vazão da alimentação com o tempo	68
Figura 4.8 - Comportamento da recuperação com o tempo	69
Figura 4.9 - Comportamento da energia com o tempo	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Processos de dessalinização mais utilizados	23
Tabela 3.1: Especificações da membrana de osmose inversa (Apêndice I)	55
Tabela 3.2: Especificações do painel fotovoltaico (Apêndice 2)	59
Tabela 4.1: Média das variáveis de medidas em função da concentração da solução de NaCl.	71
Tabela 4.2: Perfil do custo da água dessalinizada em função do consumo e produção diária	75

LISTA DE QUADRO

Quadro 4.1 - Valores dos componentes do dessalinizador com os painéis	73
Quadro 4.2: Valores de instalação e manutenção	73

RESUMO

A água trata-se do constituinte mais característico e abundante da Terra. Bem comum e indispensável à humanidade, destina-se aos mais diversos fins, desde ao consumo humano até o uso industrial; podendo ser caracterizada como a forma de energia mais essencial à vida e à manutenção dos ecossistemas. Apesar de sua imensa importância e essencialidade à existência de vida na Terra verifica-se uma indolência inaceitável quanto a gestão e conservação dos recursos hídricos do nosso planeta. Em virtude disto busca-se melhorar a qualidade de vida e minimizar o problema de falta de água potável, este trabalho tem como objetivo avaliar o processo de dessalinização via osmose inversa usando energia solar fotovoltaica, seus consumos energéticos e custos. Para isso foi desenvolvido e instalado no Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES), na Universidade Federal de Campina Grande, um sistema constituído de duas membranas de osmose inversa, alimentado por um conjunto de dezesseis painéis fotovoltaicos. O desempenho do sistema foi avaliado com soluções de cloreto de sódio com concentração variando de 1000, 1200, 1500 e 2000mg/L. As variáveis medidas, como: pressão, tensão, corrente e vazão as quais foram obtidas através dos sensores elétricos e armazenadas no computador pelo Software Data Aquisition permitiram avaliar os seguintes parâmetros: corrente elétrica, tensão do motor, potência elétrica, vazões do permeado e concentrado, recuperação e consumo de energia por m³ de água produzida. As concentrações de água de alimentação e irradiação solar influenciam consideravelmente a pressão, e conseqüentemente a produção de água permeada. O sistema mostrou condições técnicas de produzir 0,17 m³/h de água dessalinizada a um custo de R\$ 6.78.

PALAVRAS-CHAVE: água, osmose inversa, dessalinização, painel fotovoltaico.

ABSTRACT

Water is the most characteristic and abundant constituent of the Earth. Well common and essential to humanity, is the most diverse purposes, provided for human consumption until the industrial use, can be characterized as a form of energy more essential to life and the maintenance of ecosystems. Despite its enormous importance and essentiality to the existence of life on earth there is an earnestness unacceptable as the management and conservation of water resources of our planet. Because of this quest is to improve the quality of life and minimize the problem of lack of drinking water, this work aims at evaluating the process of desalination by reverse osmosis using solar photovoltaics, their energy consumption and costs. For that has been developed and installed at the Reference Laboratory in Desalination (LABDES), at the Federal University of Campina Grande, a system consists of two membranes, reverse osmosis, powered by a set of sixteen photovoltaic panels. The performance of the system was evaluated with sodium chloride solutions with concentrations ranging from 1000, 1200, 1500 and 2000 mg/L. Variables measures such as: pressure, voltage, current flow and which were obtained through the electric sensors and stored on the computer by the Software Data Aquisition allowed to assess the following parameters: current, voltage of the engine, electric power, flow rates of the permeate and concentrate , retrieval and consumption of energy per m³ of water produced. Concentrations of water, food irradiation and solar influence considerably the pressure, and consequently the production of water permeate. The system showed technical conditions to produce 0.17 m³ / h of desalinated water at a cost of \$ 6.78.

KEY-WORDS: water, reverse osmosis, desalination, photovoltaic panel.

1 – INTRODUÇÃO

A água apresenta-se como a substância mais comum e a mais importante na face da terra, sendo considerada um dos produtos mais nobres do nosso planeta. Devido a sua distribuição irregular, milhares de pessoas continuam morrendo por sua falta e também pelos seus abastecimentos contaminados. Embora 70% da superfície do planeta esteja coberta pela água, 97% é de água salgada não adequada para o consumo ou agricultura, salvo através de técnicas de dessalinização.

A disponibilidade de água potável em todo o mundo vem diminuindo, de forma a merecer atenção especial de entidades internacionais e da comunidade científica. Segundo estudo publicado pela UNESCO (2003), estima-se que na metade deste século, de 2 a 7 bilhões de pessoas, em mais de quarenta países, sofrerão de escassez de água. Esse assunto vem sendo debatido nos últimos anos em todo o mundo e alerta a humanidade para a necessidade da procura de novas formas de suprir a demanda de água potável. Embora o problema seja previsto tanto em países industrializados como em países em desenvolvimento, os efeitos da falta de água são mais sentidos nos últimos, onde a infra-estrutura é mais deficiente.

O Brasil concentra, hoje, entre 13% a 15% da água doce acessível de todo o planeta.

A dificuldade de uma região que se encontra em situação de “alerta de escassez hídrica”, alcançar uma produção industrial ou de alimentos satisfatória, decorre da necessidade mínima de água requerida para satisfazer os três principais usos consuntivos e de manter água suficiente para os ecossistemas, atender os demais usos não consuntivo (navegação, hidroelétrica, piscicultura, lazer etc.), que apresentam perdas em especial por evaporação, e para assimilação e diluição de resíduos (vazão salubridade) (CHISTOFIDIS, 2006).

O problema é que a distribuição é irregular como por exemplo: do volume total, 80% concentram-se na Amazônia, região com pouca densidade demográfica. Os 20% restantes ficam distribuídos nas demais regiões, que abrigam a maior parte da população.

É notório que até pouco tempo atrás o racionamento do uso e a importância da qualidade da água não ensejavam muita preocupação no Brasil. Não obstante, a consciência da população brasileira vem começando a mudar, por imperativo da própria realidade que já se transformou. Por essa razão, nunca se indagou e se discutiu tanto o uso adequado da água como meio de propiciar a melhora da qualidade de vida das populações atuais e futuras e o desenvolvimento sustentável do planeta.

A distribuição da população no sertão se caracteriza, em grande parte, por comunidades pequenas e dispersas, onde as famílias não possuem o mínimo de infraestrutura, como energia elétrica, escolas, postos de saúde ou saneamento básico.

De acordo com estudos realizados pela Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS), pelo menos 19,5 bilhões de metros cúbicos de água poderiam ser extraídos por ano do subsolo nordestino sem o risco de esgotamento dos mananciais. No entanto, os poços perfurados na rocha cristalina, encontrada em cerca de 788.358 km², apresentam pouca vazão, grande profundidade e, na maioria das vezes, produzindo água considerada salobra pela resolução CONAMA nº 20 de 1986, que define o patamar máximo de 500 mg.L⁻¹ de sólidos totais dissolvidos (STD) para considerar a água doce, e entre 500 e 3000 mg.L⁻¹ para considerá-la salobra, acima disso é salgada.

Um fato observado é que determinadas populações, devido à falta de estudo realizado pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2003), intitulado “Projeto cadastro da infra-estrutura hídrica do Nordeste”, cadastrou todos os poços, fontes naturais, barragens subterrâneas e reservatórios superficiais significativos em uma área de 225.000 km² da região semi-árida brasileira. Os resultados preliminares mostraram que 55% dos poços se encontram em funcionamento, 34% estão paralisados devido à salinidade e/ou não foram instalados por falta de energia elétrica e os 11% restantes foram abandonados, por estarem secos ou obstruídos. O estudo revela ainda que mais de 70% dos sistemas de bombeamento de água acionados por módulos fotovoltaicos instalados no Nordeste encontram-se em operação. Uma das opções mais econômica da atualidade para dessalinizar essa água salobra é através de membranas de osmose inversa (OI).

O processo de osmose inversa consiste, basicamente, no bombeamento de água com alta concentração de sais contra membranas seletivas, sendo necessário uma pressão superior à pressão osmótica, $\Delta\pi$, para reverter o processo natural da osmose.

Essas membranas permitem o fluxo da água através delas, ao mesmo tempo em que barram a passagem da maior parte dos sais, assim como os vírus e bactérias presentes na água de alimentação.

A instalação de pequenos dessalinizadores em comunidades isoladas pode ajudar a amenizar os problemas da seca no Nordeste brasileiro. Esses locais, devido a dificuldades de manutenção, requerem uma instalação confiável e simples. A tecnologia fotovoltaica apresenta todas essas características e, ainda, se torna viável, técnica e economicamente, em locais sem acesso à rede elétrica convencional. Essa tecnologia é apontada como uma das mais confiáveis formas de geração de energia elétrica, fato comprovado pelo extenso período de garantia fornecido pelos fabricantes, 25 anos.

A unidade de osmose inversa analisada opera com pressão variável e é acionada por módulos fotovoltaicos sem a utilização de baterias. A ausência das baterias traz como vantagens a redução do custo e da necessidade de manutenção, fatores de importância para a viabilidade de projetos no semi-árido do Nordeste.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O presente trabalho se propôs a estudar o desempenho de um sistema de um dessalinizador com dois elementos de membranas de osmose inversa em série fazendo uso dos painéis fotovoltaicos.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Montagem de um sistema piloto de dessalinização via osmose inversa e energia solar fotovoltaica.
- Teste e desempenho do dessalinizador em termos de consumo energético.
- Estudar dos custos de produção de água potável e outros parâmetros pertinentes ao desempenho do dessalinizador.

2.0 ESTUDOS BIBLIOGRAFICOS

2.1 – A Dessalinização da Água

Há muitos anos o processo de dessalinização surgiu com o objetivo de remover os sais da água, tornando-a potável para o consumo. Diversas regiões do planeta que convivem diariamente com a falta de água utilizam variadas técnicas para separar o sal da água. Algumas utilizam processos térmicos que envolvem mudança de fase, sejam a evaporação ou o congelamento, outros, mais recentemente, permeiam a água através de membranas.

Embora, em média, no Brasil ocorra um alto indicador de água renovável por ano por habitante, há alguns estados brasileiros em especial a Paraíba, o Rio Grande do Norte e o Distrito Federal que apresentam uma situação que exige elevada capacidade de gerenciamento da água, por já estarem em situação de “alerta de escassez hídrica” (Figura 2.1)(CHISTOFIDIS, 2006).

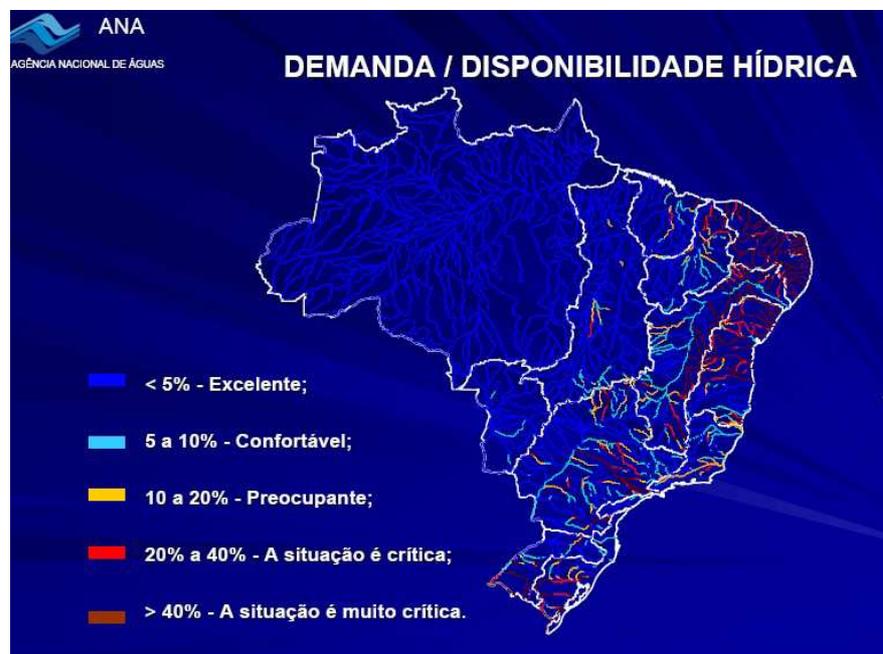


Figura 2. 1: Disponibilidade Hídrica
Fonte: (NETTO, 2005)

A instalação de pequenos dessalinizadores em comunidades isoladas pode ajudar a amenizar os problemas da seca no Nordeste brasileiro.

O maior passo no desenvolvimento das tecnologias de dessalinização foi dado durante a Segunda Guerra Mundial, devido à necessidade de água potável para suprir as tropas militares em áreas áridas. A escassez da água em muitas regiões do planeta também determina uma demanda por processos de dessalinização seguros e econômicos.

E, entre os processos de dessalinização que vêm sendo comercializados, a osmose inversa (OI) vem sendo considerado como o processo mais atrativo para a produção de água potável a partir da água salobra e água do mar, sendo assim colocado até ao alcance do indivíduo, viabilizando novos projetos antes impensáveis. (JOYCE *et al*, 2001). As (Figura 2.2) e (Figura 2.3) mostram o processo de osmose natural e o processo de osmose inversa.

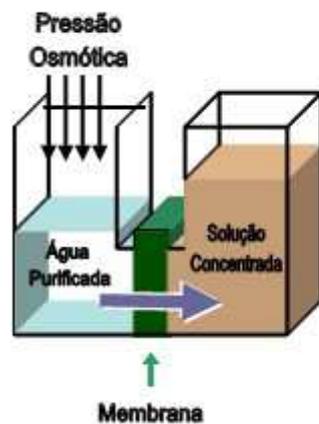


Figura 2.2: Representação do Processo de Osmose Natural

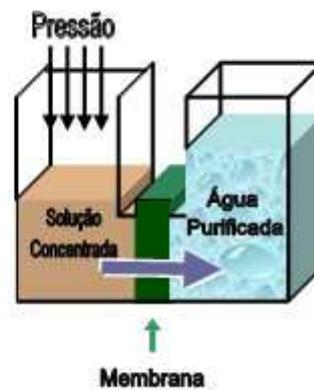


Figura 2.3: Representação do Processo de Osmose Inversa

Dentre os processos que utilizam a separação por membranas, a osmose inversa evoluiu tanto, que hoje domina o setor de dessalinização, não só para potabilizar a água em locais de escassez, como para diversos setores industriais. Destacam-se, entre as principais aplicações industriais: o setor alimentício (refrigerantes e sucos) e as termelétricas. A vasta aplicabilidade, desde o reuso de águas até a produção de água

ultrapura, unida às características como a modularidade e a baixa demanda energética, formam as principais razões da rápida difusão do processo de osmose inversa.

2.2 – Processos de Dessalinização

A dessalinização começou a ser utilizada regularmente a cerca de 50 anos, quando se estabeleceram, em vários países, unidades de dessalinização capazes de suprir ininterruptamente uma comunidade com água potável. Atualmente a tecnologia é considerada técnica e economicamente viável para produzir grandes quantidades de água potável em diversas aplicações.

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

Existem hoje, basicamente, duas tecnologias distintas em processos de dessalinização, a térmica e as membranas. A (Figura 2.4) mostra a curva de tendência dessas duas tecnologias no contexto mundial. A tecnologia que utiliza processos de membranas vem se aproximando cada vez mais dos processos térmicos, devido, basicamente, à escala de produção e à evolução da tecnologia.

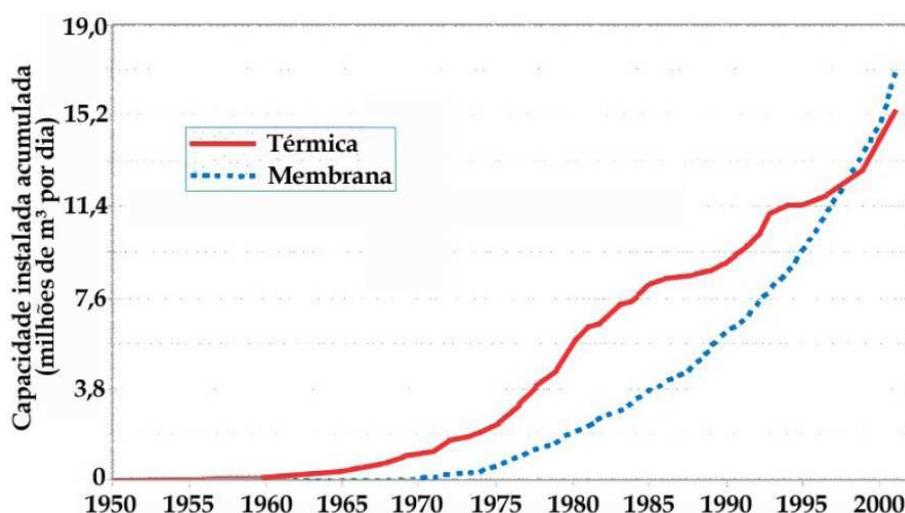


Figura 2. 4: Dessalinizadores: Capacidade instalada no mundo por tipo de tecnologia
Fonte: (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2004)

As exigências sobre a escolha da tecnologia devem ser estudadas as conexões entre vários parâmetros locais como circunstâncias geográficas, a topografia do local, a capacidade, o tipo de energia disponíveis no custo baixo, a disponibilidade de infraestrutura, o tamanho da planta e o salinização da água de alimentação (MATHIOULAKIS *et al.*, 2007).

As energias usadas nos processos de dessalinização são principalmente, eletricidade e calor. 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 dessalinização baseada na osmose inversa possui uma carga mais baixa do que a dessalinização térmica, este resultado é mais reforçado se o modelo da produção de energia for através de energias renováveis e também se a redução do consumo de energia da osmose inversa for conseguida com sistemas novos de recuperação de energia. Entretanto, as tecnologias térmicas de dessalinização não devem ser desconsideradas porque apresentam uma redução grande do potencial do impacto ambiental quando integradas com outro processo de produção (RALUY *et al.*, 2006).

Seu principal campo de aplicação é a dessalinização de águas salobras e marinhas, para uso em navios, plataformas de extração de petróleo, em poço artesianos nas regiões áridas, etc. Este processo é também aplicado em larga escala na produção de água ultrapura nas indústrias eletrônicas, nos hospitais, indústrias farmacêuticas, etc. (OLIVEIRA, 2007)

Na dessalinização de água o processo de OI, juntamente com o processo de evaporação (“flash”), é o mais utilizado, ficando uma pequena parcela do mercado para o processo de eletrodialise (ED), conforme mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Processos de dessalinização mais utilizados (MILLER, 2003)

País	Capacidade (m ³ /dia)	Produção mundial (%)	“flash” (%)	OI(%)	ED(%)
Arábia Saudita	5.253.200	25,9	65,7	31	1,9
Estados Unidos	3.092.500	15,2	1,7	78	11,4
Emirados Árabes	2.164.500	10,7	89,8	6,5	0,2
Kuwait	1.538.400	7,6	95,5	3,4	0,3
Japão	745.300	3,7	4,7	86,4	6,8
Líbia	683.300	3,4	67,7	19,6	9,8
Quatar	566.900	2,8	94,4	0,0	0,0
Espanha	529.900	2,6	10,6	68,9	10,9
Itália	518.700	2,6	43,2	20,4	19,2
Bahrain	309.200	1,5	52,0	41,7	4,5
Oman	192.000	0,9	84,1	11,7	0,0
TOTAL	15.594.500	76,9	54,8	36,1	4,8

Segundo relatório do BCC Research (2006), o mercado de membranas cresce em média 10,3% ao ano e em 2005 superou a marca dos US\$ 1,9 bilhões na comercialização de membranas e sistemas de filtração. Como se pode observar na (Figura 2.5), os EUA detêm a grande maioria do mercado de osmose inversa, seguido pela Ásia, Europa, África/Oriente Médio e América Latina.

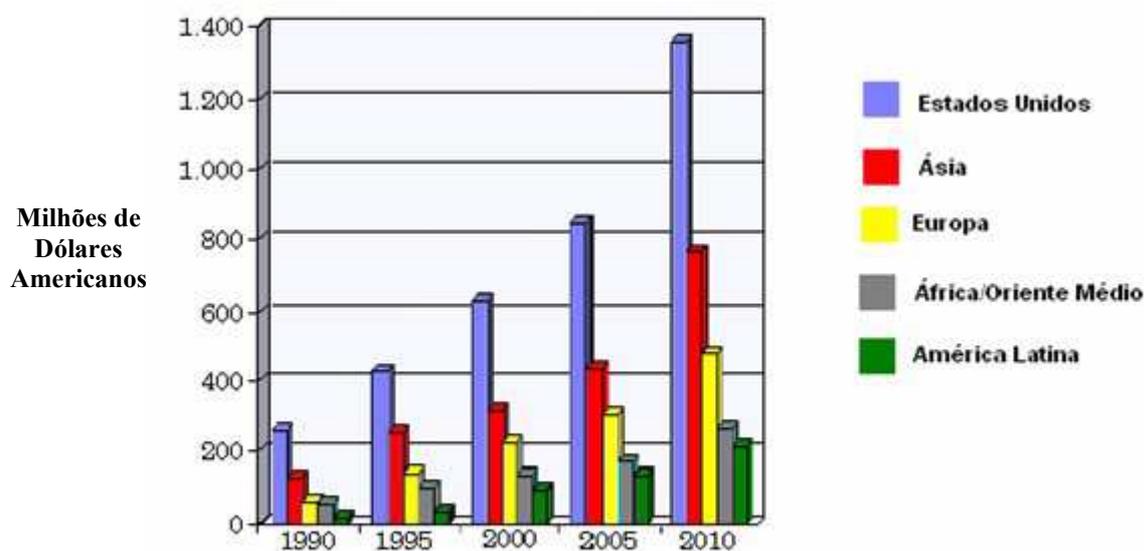


Figura 2.5: Mercado mundial de Osmose Inversa desde 1990 e projeção para 2010

Fonte: BCCRESEARCH, 2006

Outro ponto marcante é a diferença entre as unidades de dessalinização da água do mar e salobra, isso se deve à relação direta existente entre o consumo específico e a

concentração de sais. Outros pontos, como a diferença de níveis de pressão e de taxa de recuperação, podem ser comparados.

O que diferencia os vários dessalinizadores disponíveis no mercado é a qualidade dos materiais neles empregados, a tecnologia de produção, o grau de automação incorporado, a experiência do fabricante e a disponibilidade de assistência e serviços técnicos (AQUANET, 2006).

2.3 – Fundamentos da Tecnologia

A osmose inversa é um método de dessalinização de grande sucesso aplicado para água do mar, água salobra e água industrial (ABDEL-JAWAD *et al.*, 2002).

Uma membrana de osmose inversa consiste, basicamente, de um filme que separa duas soluções de diferentes concentrações de sólidos dissolvidos. No entanto, para iniciar o transporte do líquido, é necessária uma pressão externa superior à pressão osmótica, gerada naturalmente pela diferença de concentração entre as soluções. O processo não requer nenhuma transformação química ou biológica, dependendo somente do tamanho dos poros para alterar a seletividade.

A tecnologia utilizada na síntese de filmes de porosidade controlada é dominada pelos polímeros orgânicos, podendo-se destacar três gerações distintas de membranas (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001). A primeira se caracterizou por membranas simétricas com poros regulares, quase cilíndricos que atravessavam toda a espessura da membrana. Os principais problemas foram a baixa resistência mecânica e a baixa produtividade. Com o avanço no controle da polimerização da membrana, a segunda geração, chamada de membranas assimétricas ou anisotrópicas, possibilitou a criação, normalmente por um único tipo de polímero, de uma fina película filtrante sobre uma estrutura mais grossa e porosa, responsável pela estabilidade mecânica do conjunto. A redução na espessura da película filtrante diminuiu consideravelmente a resistência à filtração e, conseqüentemente, o consumo de energia. A terceira geração possibilitou a criação de membranas com diferentes polímeros, possibilitando a diminuição da espessura da película filtrante, entre 0,1 μm a 0,5 μm ou 1% da espessura do suporte poroso. Essas medidas reduziram ainda mais o consumo energético, bem como

elevaram a resistência mecânica. No mercado da osmose inversa, predominam as membranas de terceira geração ou membranas compostas.

As membranas são comercializadas por módulos, sendo estes conjunto de estruturas necessárias para a operação como unidade de separação. Além da membrana, o módulo contém estruturas de suporte mecânico e canais de alimentação e remoção do permeado e do concentrado, visando limitar o acúmulo de material e a maximizar a superfície de contato sem contaminar o permeado com o concentrado.

Normalmente, utilizam módulos em espiral, como a apresentada na (Figura 2.6). Diversos elementos ou cartuchos de membrana espiral podem ser inseridos em um único módulo. Cada elemento consiste em um conjunto de membranas e espaçadores enrolados em volta de um tubo coletor de permeado central. Os canais de alimentação são delimitados por membranas dos dois lados, sendo que o canal de concentrado é mantido aberto por espaçadores no formato de telas. Diversos outros desenhos de módulos podem ser encontrados na literatura (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001), além dos módulos espirais, como: os módulos com placas, os módulos tubulares, os módulos com fibras ocas e os módulos com discos rotatórios.

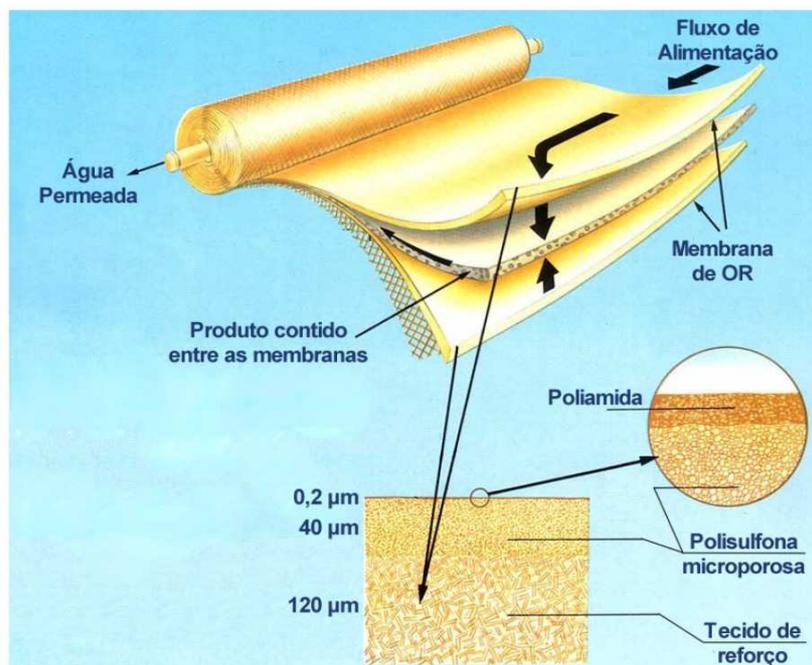


Figura 2.6: Seção esquemática da membrana de osmose inversa em espiral
Fonte: Adaptado de DOW, 2004

2.4 Incrustações

Difícilmente poderemos projetar um sistema de osmose inversa sem levar em consideração a incrustação e seus efeitos, tanto na produção de água permeada, como na redução da vida útil da membrana. Nesse caso, o rendimento seria prejudicado, acarretando perda na qualidade da água permeada e aumento do consumo específico (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

A incrustação sempre estará presente na operação das membranas de osmose inversa. Entretanto, um convívio “pacífico” se torna possível, à medida que métodos de manutenção preditiva sejam mitigados, ou seja, exista uma melhora na capacidade de se prognosticar os problemas. Essa intervenção preventiva visa minimizar os efeitos através de correções da manutenção, operação ou mesmo erros de projeto. O diagnóstico preciso é de fundamental importância para manter o sistema operando satisfatoriamente (CAVALCANTE, 2003).

2.5 – Pré-Tratamento

Na dessalinização de águas, a osmose inversa, do ponto de vista técnico e econômico, é um dos processos mais versáteis podendo ser usado numa ampla faixa de concentração de sais dissolvidos (SILVA, 2005).

As águas subterrâneas profundas são, geralmente, biologicamente estabilizadas, isto é, apresentam baixa concentração de microorganismos e, conseqüentemente, uma baixa possibilidade de formação de biofilme. Entretanto, uma análise físico-química da água é extremamente importante para evitar, principalmente, a incrustação inorgânica.

Para que se obtenha um desempenho adequado na produção de água potável e no tempo de vida das membranas, a água subterrânea ou de superfície deve ser pré-tratada antes do processo de osmose inversa. O pré-tratamento da água *in natura* protege os elementos de membranas contra vários fenômenos de incrustações de ordem inorgânica e orgânica. Esses tipos de incrustações denominados como “fouling”, consistem na formação de depósitos indesejáveis na superfície da membrana (LIRA, 2004). O “fouling” pode ser proveniente de sais dissolvidos, sólidos suspensos e microorganismos na superfície da membrana.

Essas águas, portanto, podem ser utilizadas como água de alimentação da membrana, utilizando apenas pré-tratamentos simplificados como um filtro cartucho, desde que se respeite o limite de operação imposto pela membrana e pela concentração de cada composto, evitando assim a saturação e, conseqüentemente, a precipitação de minerais dissolvidos (RIFFEL, 2005).

Por outro lado, as águas de superfície possuem uma alta concentração de microorganismos e dependem, então, de um pré-tratamento eficaz para removê-los e, assim, viabilizar a dessalinização por membranas. Vale lembrar que todas as características da água, seja físico-química ou microbiológica, variam durante o ano, dependendo da quantidade de chuva e de outros fatores, naturais ou não.

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

As análises físico-química e bacteriológica da água são os principais parâmetros na determinação do pré-tratamento necessário e na escolha dos tipos de elementos de membranas que irão operar durante o processo, nos dessalinizadores. O número de elementos de membranas depende do potencial hídrico e da demanda de água. Atualmente, existem mais de mil unidades de dessalinização instaladas no Nordeste e nenhuma delas apresenta um sistema de proteção para os componentes do dessalinizador, inclusive para os elementos de membranas (NOTÍCIAS CNPQ, 2005).

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

2.6 – Disposição do concentrado

Estima-se que a atual capacidade instalada de dessalinização no mundo seja superior aos 32,37 milhões de m³ por dia (WATSON *et al*, 2003). Diversas opções para dessalinização existem e sua escolha depende de considerações econômicas e ambientais. Dentre os sistemas de dessalinização, a osmose inversa se destaca tanto em

número de instalações (68% das instalações), quanto em percentual da capacidade instalada (44% da capacidade) (WATSON *et al*, 2003).

Conforme supracitado, mediante osmose inversa se tem a água dessalinizada como produto, mas também um subproduto, ou seja, o concentrado. Em geral, nos países desenvolvidos, o rejeito está sendo transportado para os oceanos ou injetados em poços de grande profundidade; todavia, alternativas estão sendo estudadas, como: bacias de evaporação, redução de volume do rejeito por plantas aquáticas, bacias de percolação e irrigação de plantas halófitas (PORTO *et al*, 2001).

O devido tratamento do concentrado da dessalinização vem preocupando e instigando os cientistas, que propõem soluções como a criação de peixes do tipo tilápias e/ou plantas halófitas capazes de se desenvolverem em um meio salino. O concentrado de unidades próximas à costa do mar normalmente é simplesmente lançado ao mar, não causando, com isso, grandes impactos ambientais. Entretanto, o maior problema se encontra em unidades de dessalinização de águas salobras instaladas no interior do continente, onde o concentrado chega a possuir uma concentração até 10 vezes a da água bruta original. Este concentrado é, muitas vezes, despejado novamente no poço de origem, salinizando-o ainda mais. Em outras ocasiões, o concentrado é lançado sobre o solo o que, em pouco tempo, pode esterilizá-lo.

A escolha da melhor opção para se dispor o rejeito da dessalinização deve atender, dentre outros fatores, às disponibilidades locais (terra, compatibilidade das águas receptoras e distância), às disponibilidades regionais (geologia, leis estaduais, geografia e clima), ao volume de concentrado, aos custos envolvidos, à opinião pública e à permissibilidade (MICKLEY, 2004b).

A emissão em águas superficiais é o método mais usado para destinação do rejeito da dessalinização. Esta opção é usual para todos os tamanhos projetos, mas pressupõe compatibilidade com as águas receptoras, podendo haver necessidade de diluição (MICKLEY, 2004b). Ainda que os custos desta destinação sejam relativamente baixos deve-se atentar para o impacto sobre a vida aquática, nos rios e mares receptores (MICKLEY, 2004a).

No Brasil, o rejeito não está recebendo, na quase totalidade dos casos, qualquer tratamento, mesmo assim, está sendo despejado no solo, propiciando alto acúmulo de sais nas camadas superficiais do terreno (PORTO *et al*, 2001). A deposição deste rejeito

poderá trazer, em curto espaço de tempo, sérios problemas para as comunidades que se beneficiam da tecnologia de dessalinização (PORTO *et al*, 1997).

Um estudo no município de Petrolina, Estado de Pernambuco, confirmou a salinização do solo causada pelo despejo indiscriminado dos efluentes de dois dessalinizadores instalados em duas comunidades (AMORIM *et al*, 1997). No Estado do Ceará, verificou que, somente em Canindé, em 25% das localidades estudadas foram observados problemas de erosão e salinidade nos solos que recebem os rejeitos (PESSOA, 2000).

Também no Estado do Ceará, verificaram, considerando 79 comunidades com dessalinizadores em operação, que apenas 20% aproveitavam os rejeitos, muito embora sem qualquer fundamentação técnico-científica ou econômica para o seu uso, segundo eles, lavagem de roupa e automóveis constituem a maior frequência em utilização dos rejeitos (38%), não se podendo afirmar que as referidas práticas tragam benefício significativo às pessoas, sendo apenas experiências isoladas e motivadas pela absoluta falta de água de boa qualidade (PINHEIRO & CALLADO, 2004).

A questão do fim dado ao concentrado se torna muito importante no momento do projeto, pois, com algumas mudanças, como a redução da taxa de recuperação, pode-se produzir um concentrado que traga impactos ambientais menores e prolongar a vida da membrana.

2.7. Principais Equações Empíricas e Fatores que Regem o Processo de Osmose

2.7.1 Pressão Osmótica

A pressão osmótica depende da concentração do soluto, da temperatura da solução e das espécies de íons presentes. Quanto maior for a concentração da solução, maior será o valor da pressão osmótica da mesma (BRANDT *et al.*, 1993). A pressão osmótica nas condições indicadas e conhecidas é dada pela equação seguinte, (Equação de Van't Hoff):

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

Onde:

π - pressão osmótica da solução iônica em questão (kgf/cm²)

v_i - carga elétrica do íon i , ou número de íons formados na dissociação;

c_i - concentração molar do soluto na solução (mol/L);

R - constante universal dos gases perfeitos (kgf. L/cm²mol K);

T - temperatura da solução, absoluta (K).

Esta equação é válida para soluções diluídas. Para soluções concentradas ela é multiplicada por um coeficiente osmótico que é estimado de dados de pressão de vapor ou do ponto de congelamento da solução avaliada, no caso, a água. A pressão osmótica para água salobra, no caso da osmose inversa, é função da concentração de sais e do tipo das moléculas orgânicas contidas na água de alimentação (AMJAD, 1993).

2.7.2 Fluxo do Permeado

O fluxo do permeado através de uma membrana de osmose inversa é inversamente proporcional à área da membrana e proporcional à variação de pressão osmótica e hidráulica (TAYLOR & JACOBS, 1996), é dado pela seguinte equação:

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

Onde:

J_w - fluxo de permeado (L/ cm². min);

K_w - coeficiente de transferência de massa do solvente (L/ kgf.min);

ΔP - gradiente de pressão aplicada (kgf/ cm²);

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

Q_p - vazão do permeado (L/min);

A - área de permeação da membrana (cm²).

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

2.7.3 Fluxo do Concentrado

O transporte de sais através da membrana é proporcional à concentração ou à diferença de potencial químico, dependendo de concentração e independentemente da pressão aplicada ao sistema (TAYLOR & JACOBS, 1996). Desta maneira, o fluxo do concentrado pode ser representado pela seguinte equação:

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

Onde, neste caso:

J_i - fluxo mássico do soluto ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$);

K_i - coeficiente de transferência de massa do soluto (cm/min);

ΔC - gradiente concentração (mg/L);

Q_p - vazão do permeado (L/min);

C_p - concentração do permeado (mg/L).

ΔP , $\Delta \pi$ e ΔC são dados por:

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

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

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

De forma que:

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

π_a , π_c , π_p são a pressão osmótica da alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente.

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

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

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

Na qual:

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

TDS_a – sólidos totais dissolvidos na corrente da alimentação;

TDS_c - sólidos totais dissolvidos na corrente do concentrado;

TDS_p - sólidos totais dissolvidos na corrente do permeado;

O TDS (*Totais de Sólidos Dissolvidos*), é dado em mg/L e $\Delta\pi$ é dado em kgf.cm⁻². O valor $7,033 \times 10^{-4}$ trata-se de um fator de conversão de pressão de lb/pol² para kgf/cm².

2.7.4 Taxa de Rejeição de Sais (RS)

A taxa de rejeição de sais (RS) demonstra a capacidade da membrana de rejeitar os sais dissolvidos durante a permeação da água (CHEN et al., 1997). Esta rejeição ocorre devido a água e os sais terem taxas de transferência de massa diferentes.

$$RS(\%) = \left[\frac{C_a - C_p}{C_a} \right] * 100 \quad 2.8$$

Onde:

$RS\%$ - taxa rejeição de sais;

C_a - concentração de alimentação (mg/L);

C_p - concentração do permeado (mg/L).

A taxa de rejeição de sais indica a efetividade da remoção de sais e outras espécies químicas pela membrana. Os valores de rejeição variam de 90 a 99,8%, dependendo do tipo de membrana utilizada e da água de alimentação (HYDRANAUTICS, 2002).

2.7.5 Fluxo de Passagem de Sais (PS)

Este fluxo é oposto a rejeição de sais e é porcentagem do sal na água de alimentação que atravessa a membrana, é calculado de acordo com a seguinte equação:

2.9

Onde:

PS – passagem de sais (%);

C_a – concentração inicial de sais dissolvidos na corrente de alimentação (mg/L);

C_p – concentração de soluto na corrente de permeado (mg/L).

Se a rejeição de sais tiver um valor muito alto, a passagem de sais pela membrana tem um valor pequeno sendo, portanto, valores inversamente proporcionais que indicam capacidade de remoção e quantidade de sais na água a ser permeada.

2.7.6 Balanço de Massa

O balanço de massa para um sistema de dessalinização é apresentado ou indicado pela equação seguinte;

$$Q_a C_a = Q_p C_p + Q_c C_c \quad 2.10$$

Onde:

Q_a – vazão de alimentação (m^3/h);

C_a – concentração inicial de sais dissolvidos na corrente de alimentação (mg/L);

Q_p – vazão do produto (m^3/h);

C_p – concentração de sais dissolvidos na corrente de produto (mg/L);

Q_c – vazão do concentrado (m^3/h);

2.7.7 Recuperação

A recuperação do sistema $r(\%)$ 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. Esta recuperação do sistema é dada pela seguinte expressão (BYRNE, 2002):

$$2.11$$

Onde:

r - nível de recuperação do sistema

Q_p - vazão do permeado (m^3/h)

Q_a - vazão da alimentação (m^3/h)

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

2.12

Onde: C_a , C_p e C_c são as concentrações da alimentação, do permeado e do concentrado, respectivamente, e Q_c é o fluxo volumétrico do concentrado.

A recuperação máxima em qualquer instalação de osmose inversa depende dos componentes presentes na água de alimentação, da pressão aplicada, da área de transferência de massa e do tipo de membrana utilizada no processo (SILVEIRA, 1999).

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

2.7.8 Consumo de Energia

A partir de 1995, o consumo de energia por m^3 de água filtrada foi reduzido consideravelmente. Tal redução ocorreu, em parte, pelo aumento da capacidade instalada por arranjo de membranas, que permitiu uma melhor otimização hidráulica da planta, e pelo aumento da eficiência energética do bombeamento, pela instalação de sistemas rotação variável em bombas de alta pressão (HOFERT, 1999).

Vejamos alguns avanços que estão contribuindo para a diminuição dos custos de dessalinização de águas marinhas.

- Redução dos custos de produção e melhoria da qualidade das membranas pela automação do processo de produção;
- Mais área de membrana por módulo;
- Aumento significativo da produtividade dos módulos;
- Melhor rejeição de sais;

- Aumento da resistência ao cloro;
- Operação estável a pressões mais elevadas.

O custo de energia elétrica para operação de membranas é o elemento mais importante dos custos de operação e manutenção de sistemas de dessalinização de águas salobras, operadas com membranas convencionais.

O percentual de custos de diferentes componentes de operação e manutenção de unidades de dessalinização de águas salobras pode ser observado na (Figura 2.7).

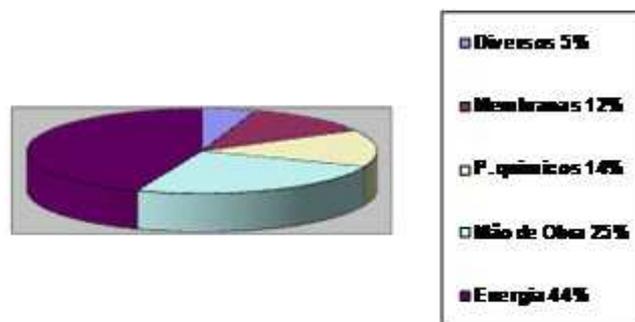


Figura 2. 7: Porcentagem de custos de diferentes componentes de operação e manutenção de unidades de dessalinização de águas salobras.

Fonte: (FILTEAU & MOSS, 1997).

A equação empírica que geralmente é usada para calcular a energia gasta durante o processo de dessalinização é dada por (TAYLOR & JACOBS, 1996):

$$E_{emp} = H.(0.00315)/r.\eta_b.\eta_m \quad 2.13$$

Onde:

E_{emp} – Energia empírica consumida (kWh/m³);

H – altura do nível da coluna de alimentação (m);

r – recuperação do sistema (%);

η_b – eficiência da bomba (%);

η_m – eficiência do motor (%);

(0.00315) – fator de conversão de energia para plantas de osmose inversa para kWh/m³ (TAYLOR & JACOBS, 1996).

Na prática, para os sistemas de dessalinização que estudamos, o consumo de energia é dado pela razão entre a potência consumida pela bomba e a vazão do permeado (OLIVEIRA, 2002). Vejamos a equação simplificada:

$$E_p = \text{Pot}/Q_p \quad 2.14$$

Onde, neste caso:

E_p – consumo de energia prático (kWh/m³);

Pot – potência ativa consumida pelo sistema (W);

Q_p – vazão do permeado (m³/h).

A potência ativa consumida pelo sistema é dada por:

$$\text{Pot} = V \cdot I \quad 2.15$$

Na qual:

V – tensão elétrica (volt)

I – corrente elétrica (ampére)

2.8 – Energia Solar

O sol é fonte de energia renovável, o aproveitamento desta energia tanto como fonte de calor quanto de luz, é uma das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentarmos os desafios do novo milênio.

A energia solar é uma fonte inesgotável e gratuita que deve ser explorada ao máximo, principalmente em zonas tropicais que dispõem de alta incidência de radiação, o que torna viável a transformação de energia solar em energia elétrica, química, mecânica, térmica, etc.

Vivemos todos os dias em contato com a energia mais expressiva do planeta, a do sol. E o Brasil tem fortes motivos para utilizar essa energia oferecida em abundância, já que é um dos países mais ricos no mundo em incidência de raios solares, principalmente nas regiões Norte e Nordeste. Apesar disso, a geração de energia solar é ainda pequena e um dos principais motivos é a falta de investimentos em pesquisas para

desenvolver sistemas mais eficientes, que poderiam assegurar o uso eficiente da energia solar.

A Energia Solar soma características vantajosamente para o sistema ambiental, pois o Sol, trabalhando como um imenso reator à fusão, irradia na Terra todos os dias um potencial energético extremamente elevado e incomparável a qualquer outro sistema de energia, sendo a fonte básica e indispensável para praticamente todas as fontes energéticas utilizadas pelo homem.

A conversão direta de energia solar em eletricidade tem sido objeto de estudo desde o fim do século XIX. O efeito fotoelétrico foi descoberto em 1890, quando Lenrich Hertz, testando a teoria eletromagnética da luz proposta por Maxwell, verificando a existência de ondas eletromagnéticas quando uma placa metálica era exposta à luz ultravioleta.

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

Em 1954, nos Laboratórios de Bell Telephone, nos Estados Unidos, foram desenvolvidos pastilhas de silício, onde se viu que o silício tem uma eficiência de 10 vezes mais, do que as outras substâncias, na transformação de luz em eletricidade. Em 1955, em Phoenix, no Arizona, ocorreu a primeira apresentação pública de células fotovoltaicas para a geração de eletricidade.

Desde então, o silício mostrou ser o material mais barato e eficiente para a produção de eletricidade através do efeito fotovoltaico, aonde vem sendo o elemento mais comercializado para a produção de painéis fotovoltaicos.

A transformação da radiação eletromagnética em energia elétrica é feita por células fotovoltaicas, ou células solares, que podem ser entendidas como dispositivos semicondutores que produzem uma corrente elétrica quando expostos à luz.

Um conjunto de células fotovoltaicas interligadas forma um módulo, (Figura 2.8). Os módulos são encapsulados com materiais que garantem rigidez mecânica que protegem as células contra danos e condições climáticas, e evitam que a umidade do ar atinja os contatos elétricos e conduzem bem o calor, para reduzir a temperatura de trabalho das células.

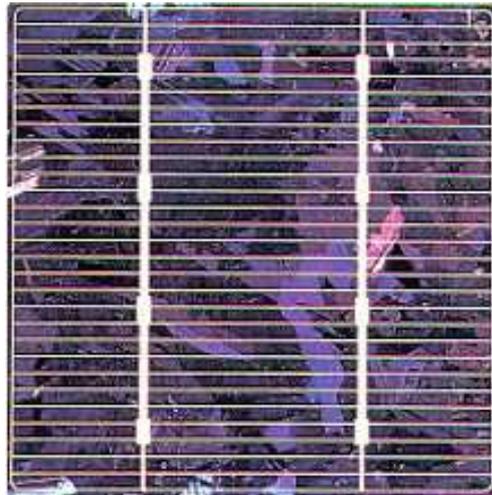


Figura 2. 8: Painel Fotovoltaico
Fonte: NETTO, 2006

A energia solar para dessalinização é uma idéia atrativa em todas as partes do mundo onde a água potável é escassa, e particularmente em áreas remotas sem eletricidade, mas o mar e o sol são abundantes para este tipo de tecnologia. Nas últimas décadas a energia solar vem sendo muito promissora para os dessalinizadores, particularmente por pequenos sistemas onde outras tecnologias são competitivas (THOMSON & INFIELD, 2002).

Realmente os dessalinizadores de osmose inversa e energia solar de pequeno porte vêm sendo bem sucedidos. Infelizmente, entretanto, o sistema entre outros, permanece com custos altos, em comparação com sistemas de osmose inversa alimentados por eletricidade ou diesel.

Os projetos para estes sistemas tendem requerer melhores arranjos dos painéis fotovoltaicos, para melhorar sua capacidade de dessalinização. Os preços globais de painéis estão caindo firmemente ano a ano e com o aumento da eficiência das células, atribuindo assim ao estudo contínuo do projeto (THOMSON & INFIELD, 2002).

Na ilha de Gran Canaria foi instalado painéis fotovoltaicos ligados a um dessalinizador via osmose inversa de pequeno porte. Isto é, uma solução conveniente para regiões onde há pequenas quantidades de água potável e energia suficiente para alimentar os painéis fotovoltaicos, anualmente a média da irradiação solar diária em uma superfície horizontal está em 5,6 kWh/m². Este valor é representado para regiões semi-áridas, onde tal energia fornecida alimenta o sistema projetado para produção

diária de água potável de no mínimo 800L/d, onde o sistema proposto permite um aumento de produção de água por meios de fontes adicionais de energia.

Em 1981 foi instalado na Jordânia e Arábia Saudita um dessalinizador via osmose inversa e energia solar, que tinha uma energia útil de 8kW, com dois estágios de membranas, onde produz 3,2 m³/d de água potável, e tinha como água de alimentação a água do mar de concentração 42800ppm, no México, foi instalado células fotovoltaicas que forneciam 2,5kW, produzindo 1,5m³/d, de água potável. Já em uma pequena aldeia de pesca no Cituis, na costa Norte de Java, foi instalado painéis fotovoltaicos numa usina elétrica que fornecia 25,5kW, com o objetivo de fazer gelo, preservar o peixe e produzir água fresca por osmose inversa para 780 habitantes com uma vazão de 12m³/d, com 8 horas de operação (DELYANNIS, 1987).

O sistema de painéis fotovoltaicos é empregado em algumas regiões remotas para bombeamento de água, fornecimento de energia elétrica para clínicas, escolas, e umas aldeias pequenas.

Os painéis fotovoltaicos operam a partir de células solares, a conversão da radiação solar ocorre entre dois eletrodos anexados num sistema líquido ou sólido, onde absorve a luz solar, onde gera a energia elétrica. Assim o material tem que ser de alta pureza e de alta perfeição cristalina. O material de célula solar ideal: é constituído de material não tóxico; fácil para instalação em grandes áreas; uma ótima eficiência do painel fotovoltaico e longo tempo de estabilidade, no futuro surgiram novas classes de materiais de células solares orgânicas, do ponto de vista global, isto pode ser considerado uma vantagem, de alta potência e baixo custo na eficiência da célula solar (GOETZBERGER *et al.*, 2002).

O silício tem um pequeno problema, onde 50% do custo de um módulo é devido ao custo da produção de bolachas de silício. A tecnologia presente está relativamente amadurecendo, mas vários estudos têm mostrado que isto ainda pode ter uma redução nos custos. Simulações mostraram que os parâmetros ideais para uma alta eficiência, apontam que com o descrever da espessura da célula a voltagem do circuito aberto aumenta, devido à corrente reduzir, que é resultado da geometria dos painéis (GOETZBERGER *et al.*, 2002).

Performance de um sistema de energia solar sem armazenamento de energia composto de um painel fotovoltaico, um motor e uma bomba (LOXSOM *et al.*, 1994).

Há duas possibilidades para este tipo de sistema sem armazenamento de energia: em altos níveis de insolação, a energia solar fornecida pelos painéis é suficientemente alta para ter um bombeamento da água, já em baixos níveis de insolação este valor diminui, temos um caso simples onde o valor de bombeamento é linearmente relacionado à insolação do ambiente.

A partir deste sistema, pode-se recolher os dados a cada hora e assim estimar a radiação total diária e mensal do ambiente.

No Brasil em cada m² de solo, irradia em um ano aproximadamente 1.500 quilowatt-hora de energia. Esta energia pode ser transformada em outras formas úteis como, por exemplo, em eletricidade. É preciso tirar vantagem por todos os meios possíveis desta inesgotável fonte de energia que pode nos tornar independente do petróleo ou de alternativas menos seguras, mais caras, com preços atrelados ao dólar. Porém, ainda existem problemas a superar. É preciso lembrar que esta energia é sujeita a flutuações e variações. Por exemplo, a radiação é menor no inverno, quando mais precisamos dela. É muito importante continuar buscando tecnologia de recepção, acumulação e distribuição da energia solar. No ano de 2004, o Sol irradiou na Terra quatro mil vezes mais energia que do que foi consumido. O Brasil possui os mais elevados índices mundiais dessa fonte de energia. A incidência solar na área do Distrito Federal, corresponde a produção energética de 162 Itaipus, conforme dados da ABRAVA (www.fabioenergia.hpg.com.br) 04/05/2004.

O atendimento de comunidades isoladas tem impulsionado a busca e o desenvolvimento de fontes renováveis de energia. No Brasil, por exemplo, 15% da população não possui acesso à energia elétrica. Coincidentemente, esta parcela da população vive em regiões onde o atendimento por meio da expansão do sistema elétrico convencional é economicamente inviável. Trata-se de núcleos populacionais esparsos e pouco densos, típicos das regiões Centro-Oeste, Nordeste e Norte.

No Brasil a geração de energia elétrica por conversão fotovoltaica teve um impulso notável, através de projetos privados e governamentais, atraindo interesse de fabricantes pelo mercado brasileiro. A quantidade de radiação incidente no Brasil é outro fator muito significativo para o aproveitamento da energia solar.

Atualmente o custo das células solares é um grande desafio para a indústria e o principal empecilho para a difusão dos sistemas fotovoltaicos em larga escala. A

tecnologia fotovoltaica está se tornando cada vez mais competitiva, tanto porque seus custos estão decrescendo, quanto porque a avaliação dos custos das outras formas de geração está se tornando mais real, levando em conta fatores que eram anteriormente ignorados, como a questão dos impactos ambientais.

2.9 – Histórico da Geração Fotovoltaica

As primeiras aplicações do efeito fotovoltaico foram para o uso espacial, como fonte de eletricidade para satélites, no final da década de 50. Já os primeiros estudos datam de 1839, ano em que Edmund Becquerel descobriu o efeito fotovoltaico do silício, quando ele produziu uma corrente, expondo eletrodos de prata à radiação solar em um eletrólito. Contudo, a primeira célula produzida foi com selênio em 1883 por Fritts e Uljanin. O descobrimento do transistor por Shockley em 1949, fatos que marcaram o início da era do semicondutor, possibilitou o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica. Na década de 70, com a chamada *crise do petróleo*, se iniciaram as primeiras aplicações para uso terrestre (GOETZBERGER *et al.*, 1998).

Desde então, a indústria fotovoltaica mundial tem demonstrado um crescimento médio do setor (últimos 4 anos) de quase 39% ao ano, chegando a 48% ao ano, quando se analisa somente o mercado Europeu. Em 2003, a produção mundial alcançou os 744,08 MW, desses quase 49% vieram do Japão, como mostra a curva de crescimento, mundial e dividido por país, da (Figura 2.9).

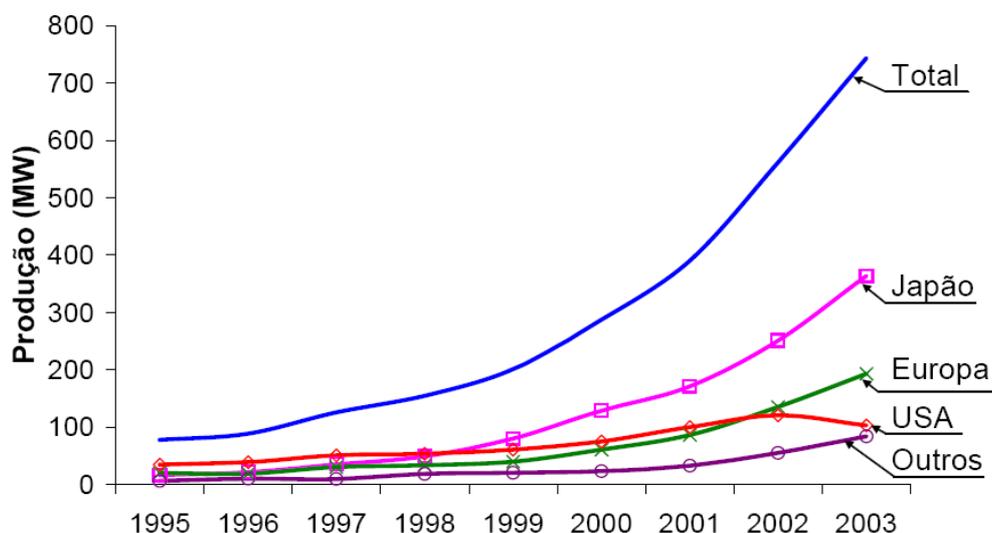


Figura 2.9: Evolução da produção mundial de módulos FV
Fonte: MAYCOCK, 2004.

2.10 – Conversão Fotovoltaica

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

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

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

O princípio de funcionamento da célula fotovoltaica (Figura 2.10) baseia-se na propriedade que alguns materiais (principalmente os cristais) têm, quando devidamente manuseados, de gerar uma corrente elétrica quando neles incide um feixe de luz. Estes materiais são denominados de semicondutores, que são substâncias isolantes a temperaturas muito baixas, mas condutores elétricos a temperatura ambiente (ACIOLI,1994). Quando estes semicondutores são submetidos à ação de um feixe luminoso, liberam elétrons, produzindo uma corrente contínua. Ao liberar os elétrons, os lugares por eles ocupados na rede do cristal recebem o nome de vazios, aos quais se atribui simbolicamente uma carga positiva. O deslocamento dos elétrons na rede do cristal se faz até que eles se combinem com os átomos incompletos e preenchendo assim os vazios. Nos cristais puros os elétrons e os vazios, são em igual número e, portanto as recombinações são freqüentes dando origem a uma fraca condutibilidade.

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

Quando o número de elétrons está em excesso, tem-se um semicondutor do tipo n. E quando o excesso é de vazios, tem-se um semicondutor positivo tipo p. Então, quando é feita a dopagem há a formação de duas regiões: uma rica em elétrons e outra

rica em vazios. Entre estas duas regiões forma-se uma junção p-n, região de pequena espessura no qual a condutividade passa do tipo p para o tipo n. Portanto, quando a superfície do semiconductor for exposta aos raios solares, os elétrons passam pela junção p-n em direções opostas, surgindo assim um campo elétrico (E) de p para n, conseqüentemente dando origem a corrente elétrica (GREEN, 2002).

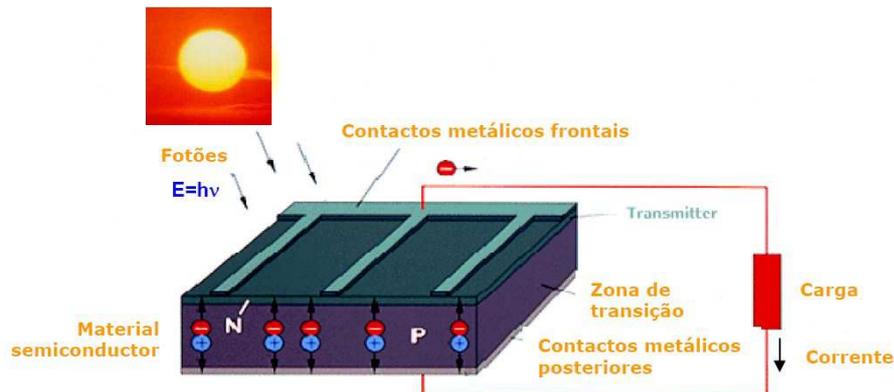


Figura 2.10: Célula Fotovoltaica
Fonte: HIMALAYA. 2007

O Si é a matéria-prima mais tradicional o que representa uma maior limitação em termos de redução de custos de produção. Todas as outras tecnologias estão baseadas em películas delgadas (filmes finos, com espessura da ordem de $1\mu\text{m}$) de material ativo semiconductor e é neste aspecto que reside o grande potencial de redução de custos que estas tecnologias detêm. Filmes finos para aplicações fotovoltaicas estão sendo desenvolvidos para a conversão de energia elétrica por apresentarem baixos custos de produção decorrentes das quantidades diminutas de material envolvido, das pequenas quantidades de energia envolvidas em sua produção, do elevado grau de automação dos processos de produção (grande capacidade de produção) e seu baixo custo de capital (RUTHER, 1996). A luz solar contém relativamente pouca energia, se comparada a outras fontes energéticas, os painéis solares fotovoltaicos têm de ter um baixo custo para poder produzir energia elétrica a preços competitivos.

2.11 – Aplicações da Energia Fotovoltaica

As fotocélulas possuem os mais diversos empregos, tanto no campo espacial quanto no campo terrestre.

No campo espacial possuem aplicação na geração de eletricidade para equipamentos lançados ao espaço (nos satélites).

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

- produtos de consumo;
- sistemas autônomos.

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

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

2.12– Sistemas Fotovoltaicos Autônomos

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

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

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

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

2.13 – Vantagens das Células Solares Fotovoltaicas

As células solares fotovoltaicas apresentam uma série de vantagens que fazem com que a sua procura cresça cada vez mais. Entre estas, podemos citar: funcionamento silencioso, simples e confiável; fonte renovável de energia elétrica; maior potência por unidade de área; instalação simples; compacto e potente; construção reforçada e duradoura; não possui partes móveis que podem se desgastar, sistema de baixa manutenção, sistema modular leve; compatível com qualquer bateria; grande vida útil (em torno de 20 anos); energia solar como combustível; converte energia mesmo em dias nublados; fornece tensões de 12, 24, 36 e 48 volts (corrente contínua), dependendo da necessidade; tem fácil manuseio e transporte, podendo ser ampliado conforme sua necessidade; oferece baixo impacto ambiental, etc. (OLIVEIRA, 2002).

2.14 – Configurações dos Painéis

A configuração dos painéis depende da potência e tensão desejada, assim será escolhida a ligação em série e/ou paralelo.

As ligações em série permitem a obtenção de uma maior tensão por uma corrente constante enquanto as ligações em paralelo permitem obter uma maior corrente por uma tensão constante. Logo, as ligações em série serão vantajosas para aparelhos que precisam utilizar baixa corrente e alta tensão e as ligações em paralelo serão favoráveis ao uso de equipamentos que necessitam de baixa tensão e alta corrente.

2.15 – Sistemas com carga CC sem armazenamento

Neste tipo de configuração a energia elétrica é usada no momento da conversão por efeito fotovoltaico em equipamentos que operam em corrente contínua. Um exemplo deste tipo de uso é em sistemas de bombeamento de água com bombas com motor de corrente contínua. A (Figura 2.11) mostra um esquema de blocos deste tipo de configuração.

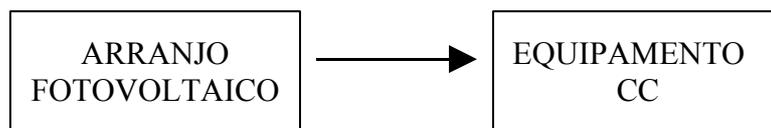


Figura 2.11: Sistema fotovoltaico com carga CC sem armazenamento

2.16 – Sistema de Conversão Fotovoltaica

O sistema de conversão fotovoltaica engloba todo o agrupamento de módulos em painéis fotovoltaicos e outros equipamentos convencionais. Este sistema resume-se basicamente a três blocos (Figura 2.12): o módulo fotovoltaico, o controlador de potência, outros equipamentos, como fiação, diodos de proteção, sistemas de consumo da energia obtida (cargas).



Figura 2.12: Sistema fotovoltaico básico em blocos

2.17 – Módulo Fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico normalmente é simplificado como um conjunto de células fotovoltaicas iguais (Figura 2.13), trabalhando sobre a mesma radiação e temperatura. Entretanto, quando acontece de uma ou mais células estarem danificadas ou estarem submetidas a uma radiação inferior às demais, como no caso de um sombreamento por um galho de árvore, ocorre a geração de pontos quentes. Isso ocorre, porque a célula mal iluminada ou com defeito encontra-se polarizada inversamente, passando a funcionar como carga. A célula não foi fabricada para dissipar essa energia e, quando a temperatura na célula supera os 85 °C, corre-se o risco de diminuir a vida útil ou mesmo danificar irreversivelmente o módulo fotovoltaico.

O módulo é a unidade básica de todo sistema de geração de eletricidade fotovoltaica. O módulo é composto de células conectadas em arranjos que produzem tensões e correntes suficientes para o aproveitamento prático da energia, já que cada célula tem (15x15cm²) só pode fornecer cerca de 1,0 -1,5 W com tensão de 0,5 V.

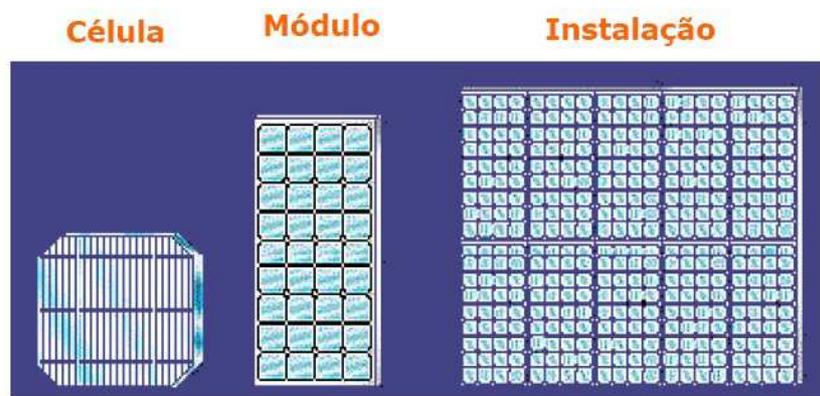


Figura 2.13: Configuração da célula solar
Fonte: HIMALAYA, 2007

- Tensão de circuito aberto e corrente de circuito aberto

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

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

- Arranjo dos módulos

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.18 – Energia Solar para Sistemas de Dessalinização

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

Embora a osmose inversa e as células fotovoltaicas sejam cada vez mais usadas em todo o mundo, sua combinação é recente (CARVALHO, 2000). A sua utilização para dessalinizar água do mar e água salobra foi encontrada em algumas regiões remotas da Índia, América Latina, África, Austrália e outras. O número de aplicações cresce aceleradamente, devido à necessidade de água potável para consumo humano (JOYCE *et al.*, 2001; MOHSEM & JABER, 2001).

O custo de energia invariavelmente representa cerca de 50 a 75% de custo para a máquina em operação, apesar da tecnologia e design do dessalinizador, o foco principal está, portanto no seu consumo de energia. As tecnologias disponíveis não oferecem muitas possibilidades de reduzir o consumo de energia, para assim baixar o custo de água dessalinizada, mas através, dos conhecimentos da engenharia pode-se alcançar a eficiência destes custos, para isso deve-se focar um estudo sobre a eficiência da energia (MESA *et al.*, 1996).

Diferentes simuladores estão disponíveis para modelar a eficiência, as necessidades energéticas e, finalmente, o custo e as limitações de produção de água potável, utilizando sistemas de dessalinização de osmose inversa de pequeno porte (FRANÇA *et al.*, 2000).

Para ser econômico, um sistema de dessalinização usando energia solar fotovoltaico requer um projeto do sistema perfeitamente eficiente em termos de consumo de energia, tendo em vista os custos relativamente altos dos painéis fotovoltaicos.

O primeiro sistema (LABDES) de dessalinização via osmose inversa usando painéis fotovoltaicos foi montado e testado (LUCENA FILHO, 2000). O sistema de dessalinização de pequeno porte fez uso de um arranjo de três membranas 2514 em série com um motor de corrente alternada. Nesse sistema, a pressão variou de 3 kgf/cm² a 15 kgf/cm² e a água de alimentação de 4,6mg/L a 10000mg/L, o trabalho buscou com este procedimento determinar a tensão e a corrente elétrica mínima onde o sistema pudesse operar, os resultados obtidos mostraram que o consumo de energia era de aproximadamente 6,0 kWh/m³, valor este considerado alto, sendo assim o sistema de dessalinização necessitava partir para testes experimentais utilizando painéis fotovoltaicos, tendo em vista que o sistema possuía condições de funcionar com outra fonte de energia.

Foi analisados e ilustrados por LABORDE *et al* (2001) quais os parâmetros num sistema de dessalinização OI de pequeno porte que afetam o consumo energético e devem ser otimizados e há dois componentes críticos: as bombas de alta pressão, combinada com o motor elétrico, e a configuração do arranjo das membranas, estes afetam crucialmente o consumo de energia do sistema.

Em seguida (OLIVEIRA, 2002) desenvolveu um sistema experimental de pequeno porte para dessalinizar águas salobras via o processo de osmose inversa usando energia solar fotovoltaica para acionar uma motor-bomba de alta pressão, de corrente contínua. Esse sistema operou com solução de cloreto de sódio de concentração de 1000mg/L a 4000mg/L para as pressões de 4,0 kgf/cm² a 10,0 kgf/cm². O sistema tinha a capacidade de produzir até 200 litros de água potável por hora durante 6 horas de radiação solar, valor bastante significativo para atender pessoas que se encontram desprovidas de água e apresentou o menor um consumo de energia de 1,5 kWh/m³.

Considerando que a água gerada pelo processo seja somente para beber, o protótipo poderá abastecer em torno de 300 pessoas por dia (OLIVEIRA, 2002).

OLIVEIRA, 2007 desenvolveu um sistema de maior capacidade, fazendo uso de um gerador fotovoltaico com a utilização de um circuito eletrônico, no qual substituiu os acumuladores de carga (baterias). A ausência do banco de baterias proporcionou uma redução dos custos e de manutenção, entretanto o sistema tornou-se subordinado às condições instantâneas da radiação solar e da temperatura ambiente. Esse sistema operou com solução de cloreto de sódio de concentração de 1000mg/L a 2500mg/L e água de poço com concentração de 3800mg/L. A pressão máxima obtida foi de 8,2 kgf/cm², mesmo com a grande variação de tensão em função da irradiação solar, o sistema mostrou condições técnicas de produzir 0,25 m³/h de água dessalinizada.

A fim de aperfeiçoar a pesquisa na área de dessalinização e energia fotovoltaica propomos dar continuidade ao trabalho iniciado por (OLIVEIRA, 2007) com algumas modificações, como: aumento do número de painéis fotovoltaicos, inclusão de uma válvula de alívio com intuito de minimizar as alterações na pressão e operação do sistema com soluções de cloreto de sódio na faixa de concentração de 1000mg/L a 2000mg/L.

2.19 – Experiências Mundiais em Unidades OI-FV

A crescente escassez de água potável e energéticos aponta positivamente para soluções que utilizem o potencial energético local sem degradar o meio ambiente. A união dessas duas tecnologias modulares, a fotovoltaica e a osmose inversa, possibilita a obtenção de água potável em locais remotos onde a energia solar é abundante.

Na atualidade, os sistemas fotovoltaicos encontra-se em rápido crescimento na Europa, Estados Unidos e Japão, devido à expansão das instalações residenciais interligadas a rede (RIFFEL, 2005)

Na Austrália, em muitas regiões remotas, a população consome água de poço com concentração de sais variando de 1.500 mg/L a 5.000 mg/L. Um pequeno sistema de dessalinização foi desenvolvido usando painéis fotovoltaico para obter água potável. O sistema de dessalinização utilizado é baseado num sistema híbrido de membranas (NF ou OI) e um pré-tratamento com membranas de UF. A energia utilizada no motor-bomba é proveniente de painéis fotovoltaicos. Os resultados mostraram que utilizando a água de alimentação de 2.000 mg/L NaCl produziu 40 L/h de água potável e operando a uma pressão de 9 bar foi necessário uma potência elétrica de 90 W. A quantidade de energia requerida para produzir 1 litro de água potável variou de 2 a 8 kWh/m³, dependendo da salinidade da água de alimentação e das condições de operação do sistema (RICHARDS, 2003).

Na Tunísia 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 mg/L a 3.000 mg/L. Um pequeno sistema experimental de dessalinização foi desenvolvido usando painéis fotovoltaico. O sistema é composto de uma membrana em espiral de polyamida, os painéis fotovoltaicos, pré-tratamento e pós-tratamento. O sistema operou numa pressão de 5 bar e a produção de permeado foi de 1,2 L/h, produção relativamente abaixo da capacidade nominal que é de 50 L/d (BOUGUECH, 2004).

No Jordânia foi instalado um sistema experimental para avaliar o desempenho de uma planta de dessalinização usando sistema de energia fotovoltaica. 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 5000 mg/L a 10.000 mg/L. O sistema desenvolvido é constituído de uma membrana de OI, dois painéis fotovoltaicos, baterias, controlador de carga, inversor, motor-bomba e um sistema de pré-tratamento. O TDS da água de alimentação utilizado no experimento foi 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 a corrente elétrica e a voltagem variam de acordo com a hora do dia, mas os valores máximos são obtidos entre a0h30min e 15h30min, a partir dessa hora, há um decréscimo, afetando

consequentemente o sistema de dessalinização, onde há uma diminuição na produção do permeado. O fluxo máximo de permeado obtido foi de 10,8 L/h às 12h30min (ABDALLAH *et al.*, 2005).

Brasil – Caucaia

A primeira unidade de osmose inversa acionada por módulos fotovoltaicos do Brasil foi instalada na comunidade de Cuité – Pedreiras em Caucaia (MONTENEGRO, 2001), no estado do Ceará, região Nordeste, onde se encontra uma temperatura anual média de 28 °C e um potencial anual de energia solar de cerca de 2.000 kWh/m². Os componentes principais da instalação são: 8 baterias (12V, 100Ah) com controlador de carga, 1 membrana de OI (produção de água potável nominal de 250 L/h) e 20 módulos FV de 55 Wp cada. A planta é equipada com sensores para a medição da radiação solar global, temperatura ambiente e do módulo, velocidade do vento, fluxo de água potável e a tensão e a corrente fornecida para as baterias e para o motor. Dois sensores de fluxo são usados para medir o fluxo de água de alimentação e do concentrado. A (Figura 2.14) apresenta um esquema com a configuração básica da unidade. Nesse projeto, somente a energia necessária para acionar o processo da osmose inversa foi suprido pelos módulos fotovoltaicos; a bomba do poço foi acionada diretamente pela rede convencional de distribuição.

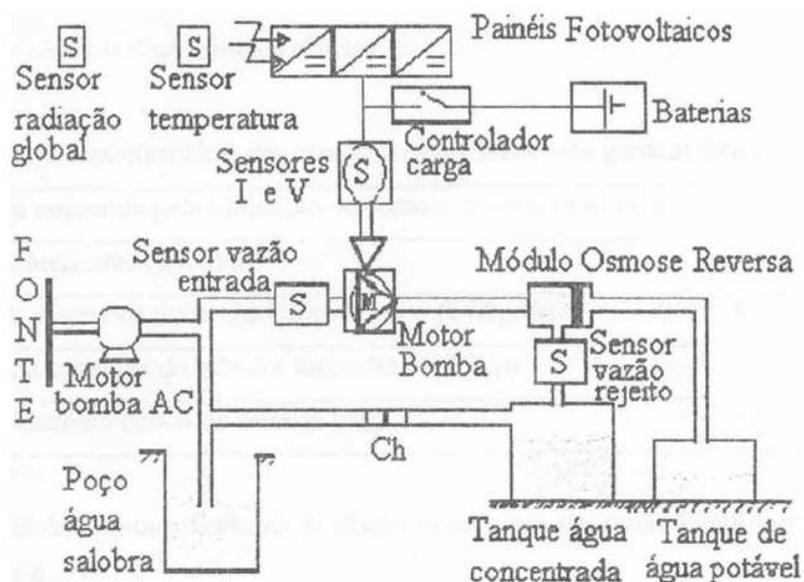


Figura 2.14: Configuração básica da unidade OR-FV pioneira no Brasil
Fonte: RIFFEL, 2005

A escolha da localidade para instalar o projeto, pioneiro no Brasil, levou em consideração a situação do suprimento de água potável e a organização social local. A comunidade beneficiada conta com uma população de cerca de 150 famílias. O poço da localidade possui uma concentração de sais da ordem de 1200 mg.L^{-1} (água salobra), considerada imprópria para o consumo humano. A comunidade buscava água potável de outro local, a aproximadamente 2 km de distância, esse serviço é feito normalmente por mulheres ou crianças.

3.0 EXPERIMENTAL

Este capítulo trata da descrição dos materiais e equipamentos utilizados na parte experimental, bem como o procedimento metodológico utilizado.

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES) da Universidade Federal de Campina Grande, e concentrou-se em estudar o desempenho de um sistema de dessalinização via osmose inversa, fazendo uso de energia não-convencional, sem a utilização de baterias.

3.1 Sistema de Osmose Inversa

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

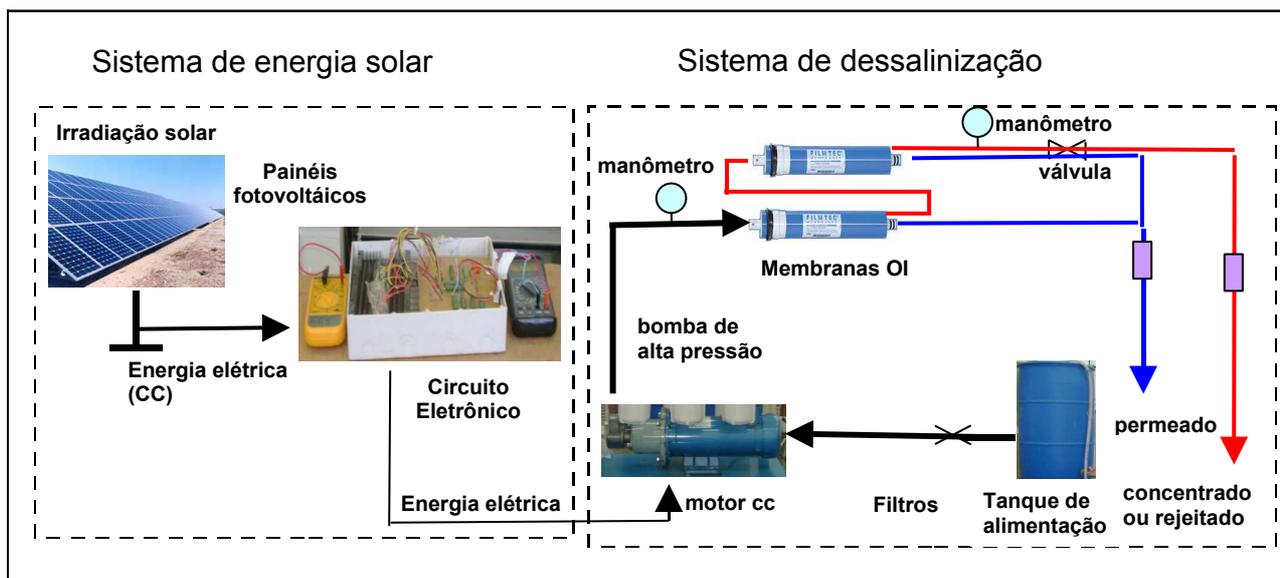


Figura 3.1: Sistema de dessalinização via osmose inversa

3.2 Sistema de Dessalinização via Osmose Inversa

O sistema de dessalinização (Figura 3.2 e Figura 3.3) é constituído por dois elementos de membranas de osmose inversa do tipo BW30LE-4040 (composto de poliamida), da FILMTEC, cujas características específicas encontram-se na Tabela 3.1.

Estas membranas são inseridas em tubos de alta pressão ou permeador (pressão máxima de operação 600psi=42kgf/cm² e temperatura máxima 49°C). Para recuperar uma quantidade maior de água, as membranas são colocadas em série. Um motor-bomba de alta pressão de 1 HP, 90DC / 9,3 A / 746W / 1750rpm da *Pacific Scientific*, alimentam as membranas a partir de um tanque de alimentação de capacidade volumétrica de 200 litros. Dois rotâmetros analógicos (1 a 18 LPM) da *Purotecn*, dois manômetros analógicos da *WIKA* (1 a 21kgf/cm² e 1 a 4kgf/cm²), 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.

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

Material	Compósito de poliamida
Tipo	BW30LE-4040
Configuração	Enrolado em espiral
Pressão máxima aplicada	42,18 kgf / cm ²
Vazão máxima de alimentação	3,6 m ³ / h
Vazão nominal do permeado	8,7 m ³ / d
Temperatura máxima de operação	45°C
pH	2,0 – 11,0
Área nominal da membrana	7,6 m ² (82ft ²)
Tempo de vida	5 anos

O sistema de dessalinização estudado operou sem os filtros de acetado de celulose de 5µm de porosidade. Considerando que os elementos de filtros são outra fonte de demanda de energia, foi assumida que a água de alimentação decantou antes do processo para evitar a formação de incrustações. Para os casos onde há de fato a necessidade de filtros, a posição do recipiente de alimentação pode ficar em uma posição mais elevada para evitar o uso de um motor-bomba de auxílio. Isso significa menor consumo de energia durante o processo.

Em resumo dependendo da qualidade da água o processo de operação pode ser dividido em duas etapas:

- (I) Uso da energia dos painéis fotovoltaicos para bombear água para o tanque de alimentação que possa oferecer uma dada coluna de água para os elementos de membranas;
- (II) Uso da energia dos painéis fotovoltaicos para o processo de dessalinização sem elementos filtrantes para casos que a água de alimentação possua uma turbidez menor de que 0,5 UTN (Portaria 518 de 2004 do M.S.).



Figura 3.2: Vista Frontal do Sistema de Dessalinização



Figura 3.3: Vista Lateral do Sistema de Dessalinização

O sistema de dessalinização tem como objetivo obter água permeada com baixa salinidade e uma maior recuperação, desta forma na (Figura 3.4) podemos observar que as membranas estão ligadas em série, sendo assim temos que a água de alimentação do tanque entra apenas na primeira membrana, produzindo água permeada e água concentrada. Em seguida a água concentrada da primeira membrana torna-se a água de alimentação da segunda membrana que também irá produzir água permeada e água concentrada. Essa ligação em série permite que a primeira membrana sofra um desgaste menor que a segunda, em virtude da concentração da água de alimentação da segunda ser maior que da primeira membrana.

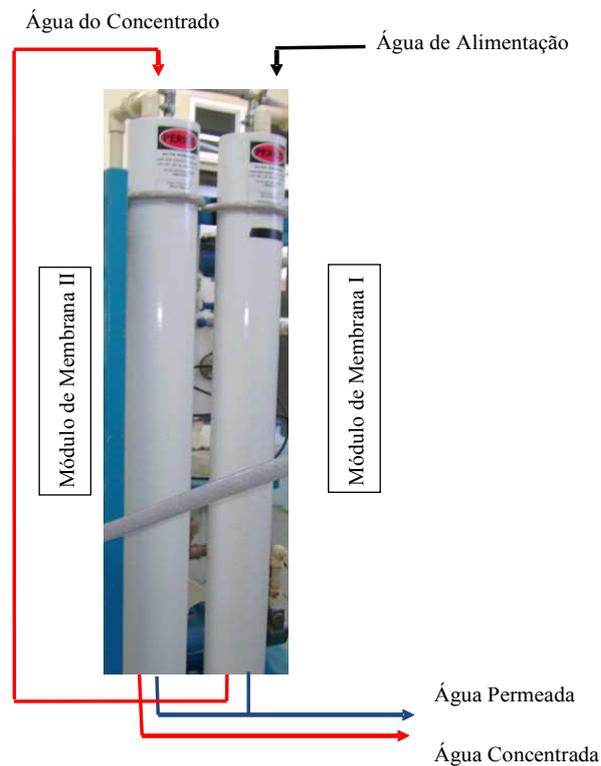


Figura 3.4: Sistema das Membranas

3.3 Sistema de Conversão de Energia Elétrica

A energia elétrica utilizada para o funcionamento da motor-bomba é proveniente do sistema de conversão de energia, o qual é constituído de painéis fotovoltaicos (Figura 3.5), do sistema de controle (circuito eletrônico) (Figura 3.6) e do sistema de medição (Data Acquisition / Switch (Agilent 34979A)) (Figura 3.7).

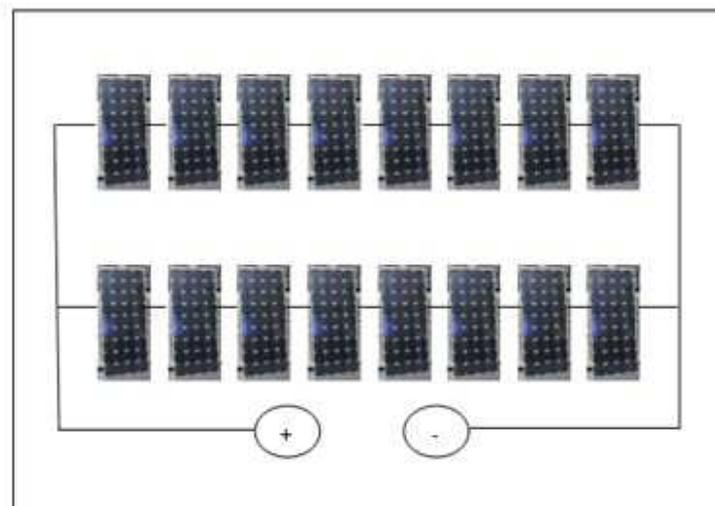


Figura 3.5: Painéis Fotovoltaicos

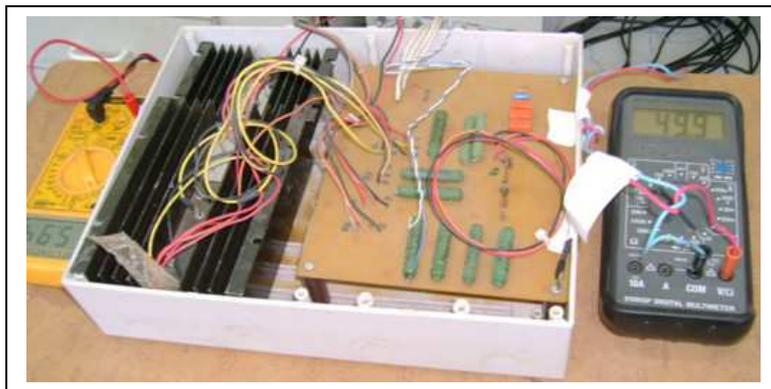


Figura 3.6: Circuito Eletrônico

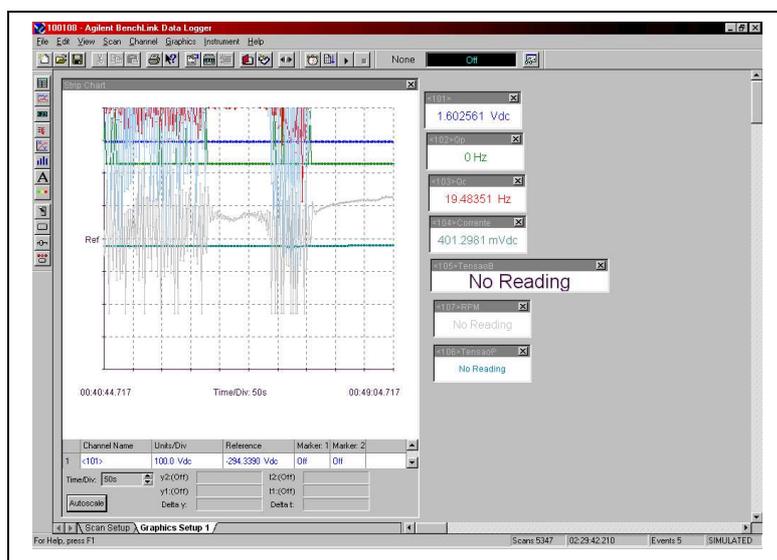


Figura 3.7: Janela do software Agilent BenchLink (Data Acquisition)

3.3.1 Módulos Fotovoltaicos

Para o funcionamento do sistema de dessalinização utilizando a energia proveniente dos painéis fotovoltaicos (modelo KC110-1 da *Kyocera Corporation* – Tabela 3.2), foram necessários 16 painéis fotovoltaicos na seguinte configuração: 2 conjuntos de 8 painéis ligados em série são conectados em paralelo (Figura 3.8).

Tabela 3.2: Especificações do painel fotovoltaico (Apêndice II)

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

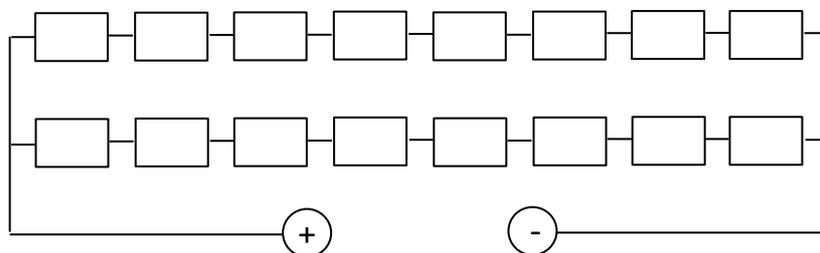


Figura 3.8: Arranjo dos painéis fotovoltaicos

O arranjo misto, ou seja, uma parte é constituída de módulos em série e outra em paralelo.

A corrente resultante na carga, será a soma das correntes de cada um dos conjuntos de células em série e a tensão resultante será igual à soma das tensões de cada uma das células contidas em um dos agrupamentos em série.

3.3.2 Sistema de medição

Os primeiros métodos de registro de medidas resumem-se a simplesmente observar o processo que está sendo ensaiado, ler as medidas apresentadas pelos instrumentos de medição e anotar os valores numéricos em papel. Este é um método que implica especial atenção do experimentador na leitura e registro das medidas, além de ser impreciso os dados e cansativo no caso de experimentos longos e com várias grandezas sob análise.

Seguindo a tendência determinada pelo desenvolvimento dos computadores, foram sendo projetados sistemas de aquisição capazes de se adequar ao padrão destes equipamentos. Assim, sistemas completos de aquisição e armazenamento de dados computadorizados passaram a fazer parte dos recursos dos laboratórios, auxiliando nas atividades de pesquisa.

Em decorrência do grande desenvolvimento verificado no campo da microeletrônica, os recursos de aquisição e de processamento dos dados foram sendo agregados em equipamentos dedicados. Placas de aquisição integradas apresentam sistemas de condicionamento de sinais, amostragem, conversão e armazenamento, e até unidades de processamento digital de sinais.

Nos equipamentos que se deseja monitorar, ou controlar, são instalados sensores que transformam um fenômeno físico em sinais elétricos. Os sinais elétricos produzidos variam de acordo com os parâmetros físicos que estão sendo monitorados, e devem ser condicionados para fornecer sinais apropriados à placa de aquisição de dados. Os acessórios de condicionamento de sinais amplificam, isolam, filtram e excitam sinais para que estes sejam apropriados às placas de aquisição. Uma vez condicionados e trabalhados na forma desejada, os sinais podem ser lidos em computadores, com placas específicas instaladas, e armazenados em diferentes formas, como arquivos de texto.

Foi utilizado o Data Acquisition / Switch (Agilent 34979A) para aquisição dos dados experimentais em tempo real através de sensores digitais, o qual os dados são armazenados no computador. Os dados obtidos fazem parte do sistema de energia e do sistema de dessalinização. Os dados de entrada no “Data Acquisition” são obtidos por: um manômetro digital (envia sinal para obter a pressão de saída do concentrado) é importante relatar que a diferença entre a pressão de alimentação e a pressão de saída do sistema de membranas foi de 1,0 kgf/cm² sendo assim, o monitoramento da variação de pressão foi tomado na saída do concentrado, dois sensores de vazão (envia sinal para obter a vazão do permeado e do concentrado), sensores para obter a voltagem (antes e após o motor-bomba) e a corrente elétrica de entrada do motor-bomba. Os instrumentos digitais foram conectados ao “Data Acquisition” e o mesmo conectado ao computador a fim de armazenar os resultados para análise posterior (Figura 3.9).

A taxa de aquisição utilizada pelo equipamento é programável pelo usuário e varia de alguns milissegundos a segundos, minutos ou até horas. Com este equipamento, há possibilidade de adquirir até 20 sinais. Utilizou-se 6 canais para a leitura da pressão,

da vazão do permeado, da vazão do concentrado, da corrente elétrica, da tensão de entrada do motor-bomba e da tensão de saída dos painéis para análise posterior e representação gráfica posteriormente, analisados graficamente.

3.3.3 Sistema de controle - Circuito eletrônico

O circuito eletrônico desenvolvido tem como objetivo garantir o funcionamento do sistema de dessalinização alimentado via células fotovoltaicas sem a utilização de baterias e com isso diminuir consideravelmente o custo do sistema.

Para seu desenvolvimento foram estudados aspectos funcionais de células fotovoltaicas. Havendo uma incidência solar sobre uma célula fotovoltaica, esta produz uma potência. A descrição do desempenho de uma célula fotovoltaica é caracterizada por uma curva tensão versus corrente, obtida para uma dada condição de irradiação, temperatura e área.

O circuito eletrônico é composto por quatro estágios que trabalham em cascata a fim de permitir o pleno funcionamento do sistema.

O primeiro estágio trata-se de circuito responsável pela partida lenta do motor, com isso evitamos um pico de corrente na partida do mesmo, para este circuito usou-se a topologia de circuitos RC serie. As características básicas alcançadas que se conseguiu para este circuito foi a de um crescimento em rampa da tensão de alimentação do motor com um tempo de 8s até atingir o valor máximo de alimentação. Com os testes realizados com o sistema obteve-se um ótimo desempenho do mesmo.

O segundo estágio é responsável pelo controle de nível de tensão no motor. Nesta parte do projeto foram utilizados diodos zener como limitadores de tensão. Eles foram escolhidos com base nas especificações de placa do motor que limita a tensão de alimentação do mesmo em 90V. Como no comércio não foi encontrado um zener que atendesse essa especificação de tensão, foi feito um arranjo com diodos a fim de conseguir este valor.

O terceiro estágio do projeto consta do circuito de potência, responsável por garantir a corrente de funcionamento do motor tendo como referência a tensão de controle do segundo estágio. Para esta etapa utilizaram transistores de potência NPN ligados em coletor comum com resistores de baixo valor no emissor a fim de se evitar

efeito cascata nos mesmos. Para a especificação dos transistores, novamente usou-se dados de placa do motor, além de dados técnicos das placas fotovoltaicas do sistema.

O quarto e ultimo estágio do circuito eletrônico trata da proteção do sistema. Para isso projetou-se um circuito de corte eletrônico baseado no corte e saturação de transistores de junção bipolar que limita a corrente máxima de operação em 5% a mais do valor nominal da corrente de alimentação do motor, protegendo assim um dano elétrico no motor e um dano mecânico na bomba.

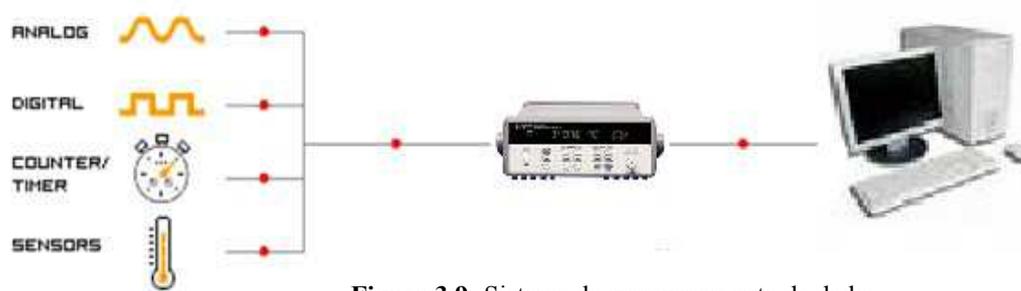


Figura 3.9: Sistema de armazenamento de dados

3.4 Procedimento Experimental

O sistema dessalinização via osmose inversa fazendo uso dos painéis fotovoltaicos sem acumuladores foi avaliado o comportamento do sistema com solução de cloreto de sódio (P.A., Marca VETEC).

Os ensaios foram realizados com concentrações de 1000 mg/L, 1200 mg/L, 1500 mg/L e 2000 mg/L. Durante o processo foram tomadas amostras na entrada da corrente de alimentação. Para as amostras da corrente da alimentação, além da condutividade elétrica foi determinado seu potencial hidrogeniônico com o auxílio de um pHmetro digital da marca Hanna. Em função do volume tratado, os experimentos levaram aproximadamente de 1 a 6 horas.

A capacidade de produção do permeado e concentrado foram obtidos por meio de dois rotômetros e armazenado no computador. Estes valores de fluxo permitem determinar a recuperação do sistema de acordo com a Equação 2.11. As pressões das

correntes de alimentação e de saída (concentrado e permeado) foram lidas com o auxílio de manômetros analógicos e sensores digitais de pressão e armazenados no computador.

Os valores obtidos para as pressões foram provenientes de sinais elétricos. Esses sinais foram convertidos para kgf/cm^2 através de um fator de conversão, o qual foi obtido a partir dos valores das pressões do manômetro analógico do concentrado. Os valores obtidos para as vazões provenientes de sensores elétricos foram convertidos para m^3/h através de um fator de conversão, o qual foi obtido a partir dos valores mostrados nos rotômetros instalados no dessalinizador. Da mesma forma, o Data Acquisition apresentou medidas da corrente elétrica durante o processo os valores foram obtidos através de sensores elétricos.

Para determinar a viabilidade do uso da energia fotovoltaica para o sistema de dessalinização no intervalo de 50 segundos foram tomadas variáveis de medidas relativos à corrente elétrica, tensão, pressão aplicada ao sistema, vazão do permeado e vazão do concentrado através da leitura dos sinais elétricos. Com esses dados, podemos calcular a potência elétrica (watt), o consumo de energia por metro cúbico produzido de água potável (kWh/m^3) e a recuperação do sistema (%) a partir das Equações 2.15, 2.14 e 2.11, respectivamente.

O desempenho do sistema foi avaliado para água sintética com concentração de 1.000, 1.200, 1.500 e 2.000 mg/L. O sistema operou com pressões variáveis de acordo com a oferta de radiação diária.

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

4.0 – RESULTADOS

Os resultados obtidos nesta etapa serão avaliados e discutidos, onde tais resultados são oportunos ao processo de dessalinização via osmose inversa alimentado por energia solar. Os gráficos que representam o comportamento da tensão, corrente, potência elétrica, pressão, vazões do permeado e concentrado, recuperação do sistema e consumo de energia com o tempo, para uma solução de cloreto de sódio (NaCl) com concentração de 1500 mg/L, a pressão inicialmente aplicada ao sistema foi de 5 kgf/cm²; sendo que durante o experimento a vazão de alimentação não se manteve constante, devido a pressão ser variável. Essa vazão de alimentação varia de acordo com a radiação solar, fazendo com que a tensão de entrada do motor-bomba também seja variável.

4.1 – Comportamento da Corrente, Tensão da Bomba, Potência e Pressão com o Tempo

Nas Figuras 4.1 a 4.3 estão representados os comportamentos da corrente elétrica, tensão elétrica e potência elétrica em função do tempo. Já na figura 4.4 está representado o comportamento da pressão de operação do sistema em função do tempo.

A Figura 4.1 mostra que durante o experimento houveram variações da corrente elétrica, em virtude da presença de nuvens, o que ocasionou uma redução da irradiação solar nos painéis fotovoltaicos. A Figura 4.2 observou-se que a tensão elétrica oscila com o tempo. A tensão elétrica permanece na faixa de 60 à 70 Volts, exceto em situações onde provavelmente temos uma incidência de nuvem, o que ocasiona uma redução no nível de tensão fornecido ao sistema pelos painéis fotovoltaicos. A Figura 4.3 apresenta o comportamento da potência elétrica em função do tempo, esta possui um comportamento semelhante às Figuras 4.1 e 4.2, tendo em vista que potência elétrica é diretamente proporcional a corrente elétrica e a tensão do motor. Observa-se nas figuras que no intervalo de 120 a 160 minutos têm-se uma queda nos níveis de tensão e corrente, e conseqüentemente de potência elétrica do motor, isto se deve a baixa incidência solar.

Analisando o comportamento da variação da corrente, tensão e potência elétrica do motor para todos os experimentos, observaram-se comportamentos semelhantes em todos os gráficos.

Na Figura 4.4 está representado o comportamento da pressão em função do tempo para a solução de cloreto de sódio. Observa-se que a pressão varia com o tempo. Isto se deve ao fato de que a incidência solar durante o experimento não é constante, que as condições meteorológicas e a concentração da água de alimentação influenciam diretamente na pressão de operação, entretanto utiliza-se uma válvula de alívio que limita a pressão do dessalinizador, evitando a sua elevação, além de um ponto ideal admissível, uma pressão pré-determinada é ajustada para a operação do dessalinizador.

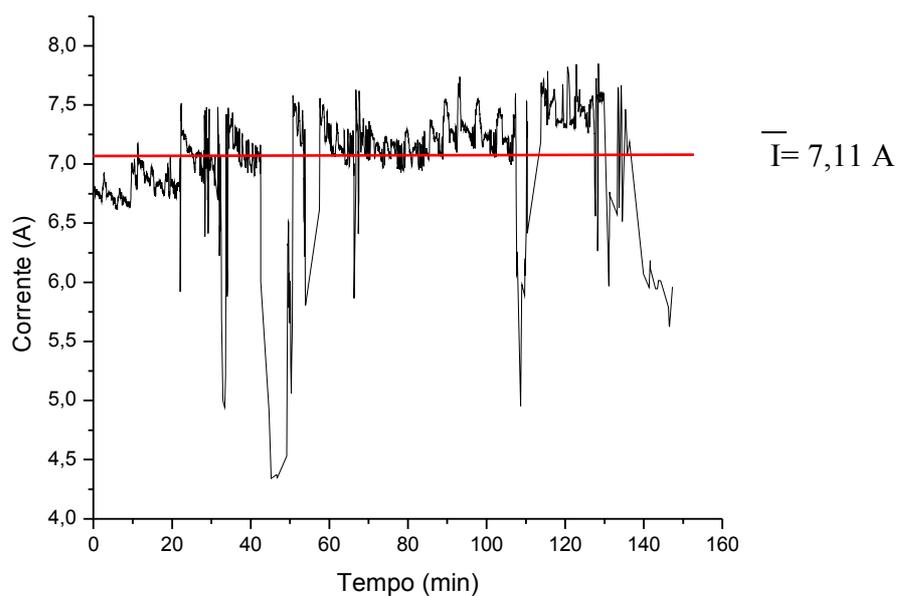


Figura 4.1: Comportamento da corrente com o tempo.

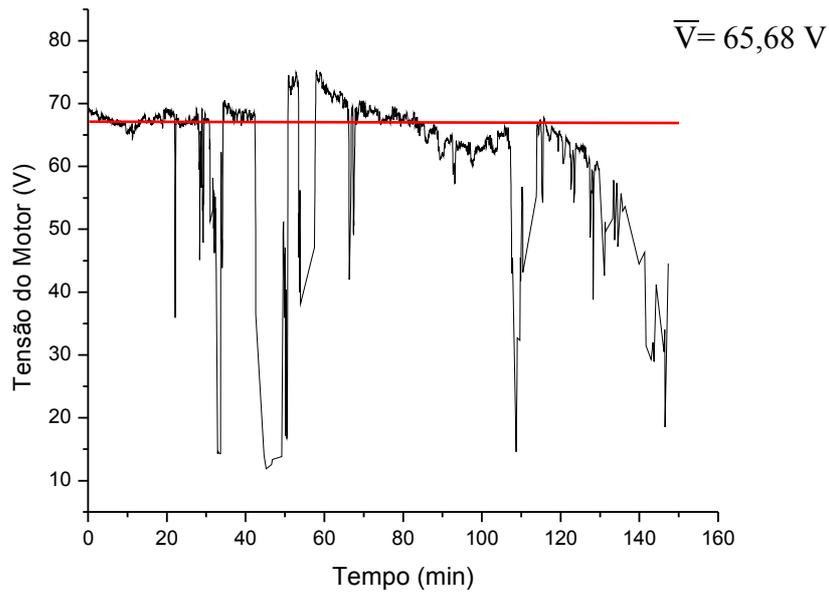


Figura 4.2: Comportamento da tensão com o tempo.

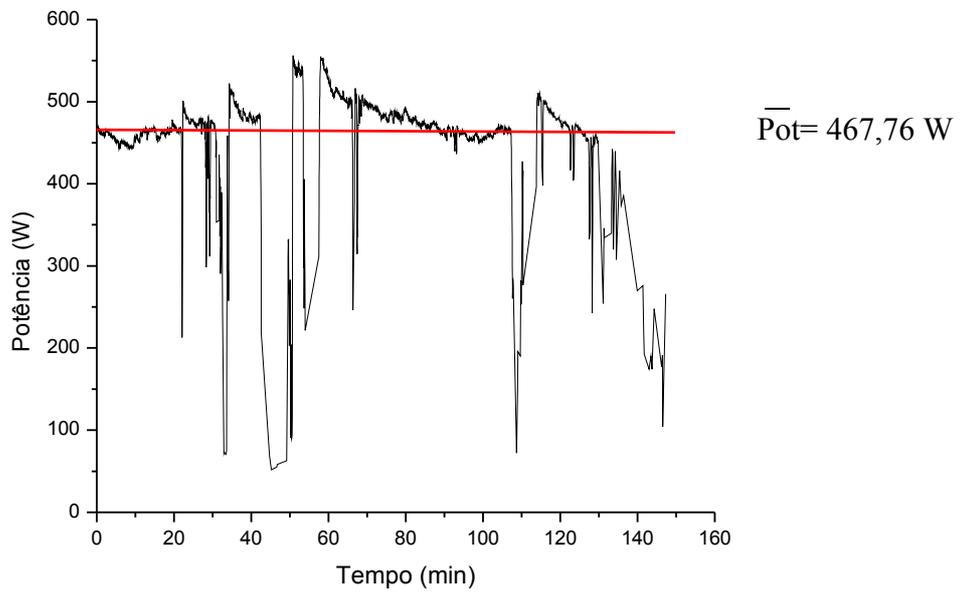


Figura 4.3: Comportamento da potência com o tempo.

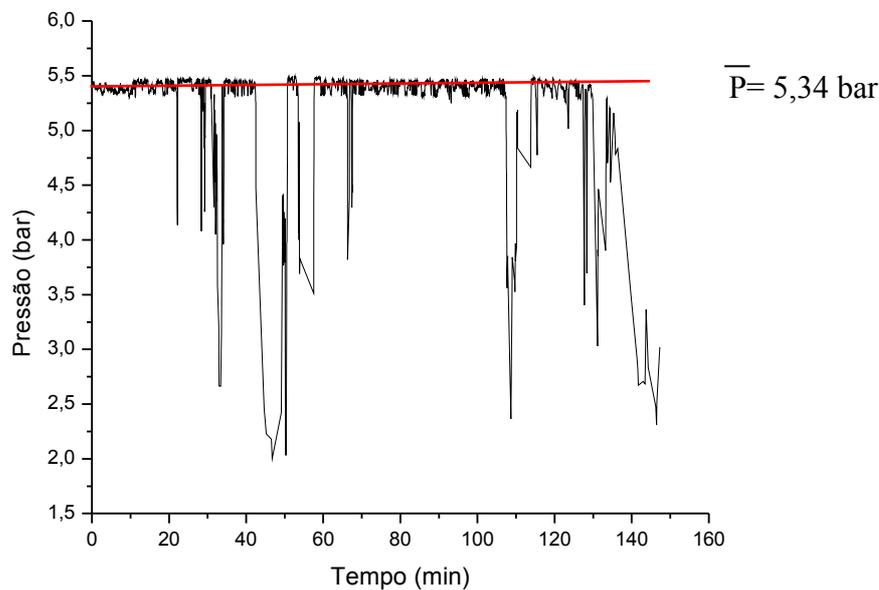


Figura 4.4: Comportamento da pressão com o tempo.

4.2 – Comportamento das Vazões do Permeado e Concentrado com o Tempo.

As Figuras 4.5 a 4.7 apresentam o comportamento das vazões do permeado, do concentrado e da alimentação em função do tempo.

Observa-se que na Figura 4.5 a vazão do permeado apresenta-se praticamente constante durante o experimento, e que o comportamento do mesmo não se encontra dentro do esperado levando-se em conta que cada membrana utilizada no experimento possui uma capacidade média de produção de 0,36 m³/h, o sistema tem condições de uma produção nominal de 0,72 m³/h a pressão de operação de 8,0 kgf/cm² (OLIVEIRA, 2007).

A Figura 4.6 a vazão do concentrado e a Figura 4.7 a vazão de alimentação apresentam comportamento semelhante entre si, possuindo um comportamento diferente do previsto. O comportamento desse sistema é diferente dos sistemas de dessalinização convencionais, no qual a tensão de alimentação e a vazão de alimentação são constantes, portanto a pressão aplicada ao sistema se mantém constante durante todo o tempo em que o sistema está operando e neste experimento a pressão não se mantém constante.

A Figura 4.7 é possível perceber que na faixa de 0 a 20 minutos a vazão de alimentação e a vazão do concentrado apresentou uma variação nas vazões e que na vazão do permeado quase não houve alteração, isto se deve ao fato de que as vazões do concentrado e da alimentação são maiores do que a vazão do permeado e desta forma os sensores eletrônicos não conseguem fazer leitura numa vazão tão pequena. Não se deve ultrapassar o limite de pressão máxima porque pode provocar problemas de compactação e precipitação de sais na membrana, aumentando-se, assim, a concentração de polarização e conseqüentemente a diminuição da vida útil da membrana.

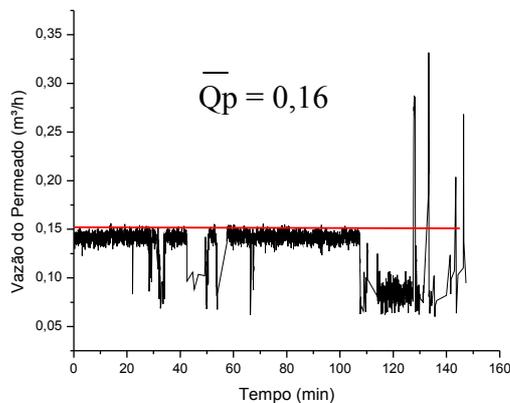


Figura 4.5: Comportamento da vazão do permeado com o tempo.

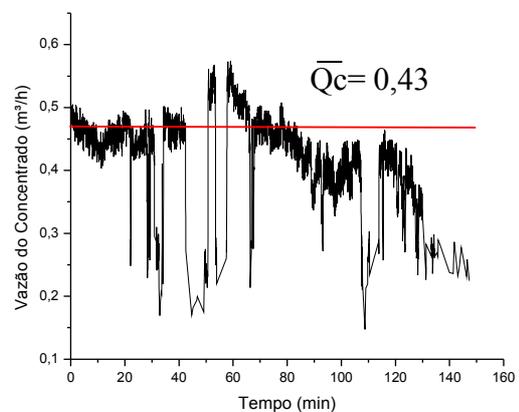


Figura 4.6: Comportamento da vazão do concentrado com o tempo.

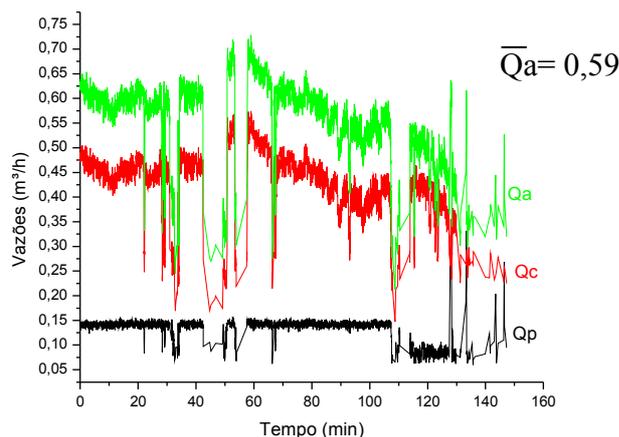


Figura 4.7: Comportamento das vazões com o tempo.

4.3 – Comportamento da Recuperação com o Tempo.

Na Figura 4.8 é apresentado o perfil da recuperação do sistema em função do tempo. Observa-se que na faixa de 130 a 160 minutos tem-se uma elevação no nível de recuperação, o que pode-se considerar um “falso” resultado, tendo em vista que nos gráficos anteriores temos um decaimento dos parâmetros avaliados para este mesmo intervalo de tempo. Este “falso” resultado deve ser proveniente da presença de ar nas tubulações do sistema o que provoca uma “falsa” leitura dos níveis de recuperação, dessa forma, faz-se necessário aperfeiçoar o equipamento a fim evitar tais erros sistemáticos.

Portanto, confirma-se que, com o aumento do nível de recuperação, mais água salina é convertida em água potável, reduzindo assim o volume de água a ser rejeitada, aumentando o valor da concentração de sais dissolvidos na corrente do concentrado.

Em alguns casos a recuperação depende do tipo do pré-tratamento aplicado à água bruta. Podemos citar águas de baixa condutividade térmica, mas ricas em carbonatos, bicarbonatos ou de alta dureza que podem incrustar nas membranas em curto espaço de tempo.

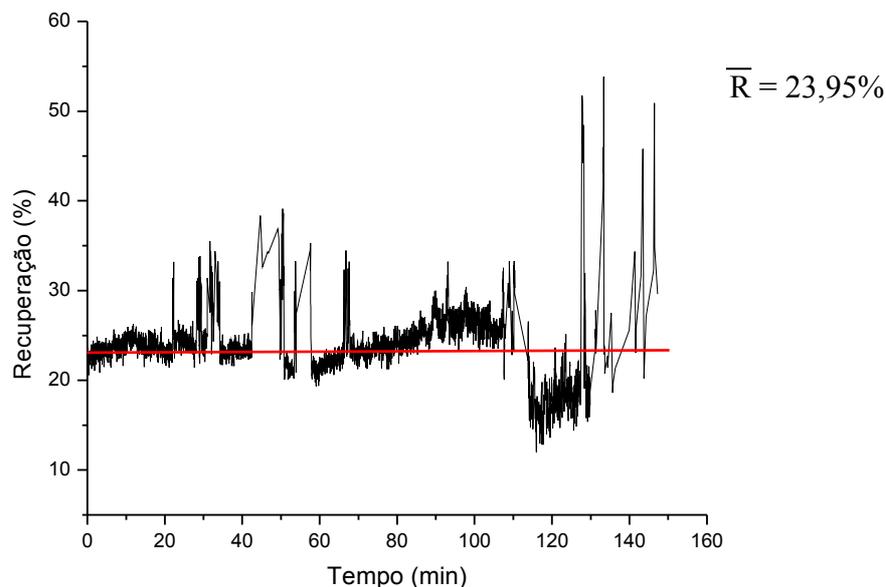


Figura 4.8: Comportamento a recuperação com o tempo.

4.4 – Comportamento do Consumo de Energia com o Tempo.

A Figura 4.9 apresenta o comportamento do consumo de energia por metro cúbico de água permeada do sistema em função do tempo. Observa-se que na faixa de 60 a 110 minutos a energia tem um comportamento praticamente constante, isto deve-se a uma provável redução da densidade de nuvens na atmosfera durante este intervalo de tempo e desta forma tem-se uma maior incidência solar nos painéis.

O consumo de energia encontra-se diretamente relacionado com a potência elétrica requerida para um dado tipo de água.

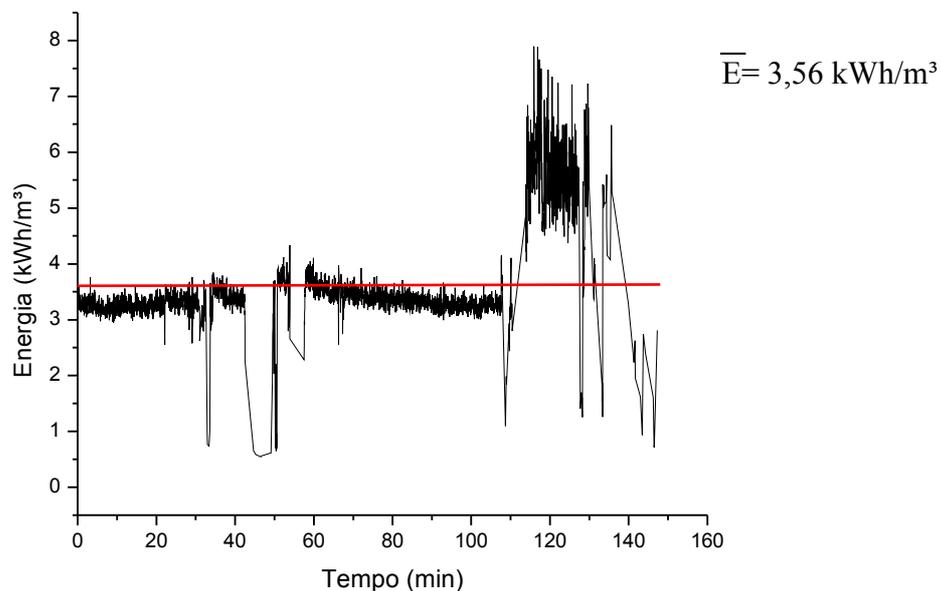


Figura 4.9: Comportamento da energia com o tempo.

4.5 – Experimentos

Foram escolhidos quatro experimentos para demonstrar as médias dos resultados com uma água de alimentação de concentrações entre 1000 mg/L a 2000 mg/l.

Tabela 4.1: Média das variáveis de medidas em função da concentração da solução de NaCl

Concentração (mg/L)	1000	1200	1500	2000
Tempo (min)	60	220	150	200
pH	8,3	7,69	7,63	7,68
Corrente (A)	5,47	7,30	7,11	5,12
Tensão do Motor (V)	72,86	68,18	65,68	73,36
Pressão (bar)	5,67	5,57	5,34	5,57
Recuperação (%)	19,36	26,25	23,95	12,8
Potência (W)	400,76	497,67	467,76	377,06
Energia (kWh/m ³)	2,00	3,11	3,56	2,69
Qp (m ³ /h)	0,20	0,16	0,16	0,14
Qc (m ³ /h)	0,87	0,45	0,43	0,95
Qa (m ³ /h)	1,07	0,61	0,59	1,09
Qpr * (m ³ /t _{operação})	0,14	0,54	0,33	0,34
Vpr (m ³ /h)	0,14	0,15	0,13	0,10

(*) Leitura do hidrômetro do volume de água dessalinizada.

Através dos valores obtidos podemos observar que a vazão de alimentação não permanece constante devido às variações na pressão, desta forma não temos comportamento linear durante o experimento.

Os experimentos não podem ser comparados entre si, tendo em vista que a irradiação solar é única no dia do experimento, ou seja, que em dias diferentes a irradiação solar é diferente. Só seria possível comparar os experimentos se tivéssemos quatro dessalinizadores idênticos e realizássemos o mesmo experimento com concentrações diferentes no mesmo dia.

O valor da potência obtida está relacionado com o número de painéis e diretamente com a “grandeza da incidência solar” naquele momento, ou seja, se a densidade de nuvens aumentar a potência diminui, mesmo para um dia com bastante de insolação.

Se tomarmos o valor da pressão média de operação de 5,5 bar a produção de permeado foi maior para concentração de 1.000 ppm e tende diminuir com o aumento da concentração de alimentação. E essa afirmação pode ser comprovada com o volume (praticamente o mesmo) que entrou no sistema para as concentrações de 1.000 e 2.000 ppm.

O V_{pr} não é igual ao Q_p obtido durante o experimento, devido aos erros sistemáticos e também ao intervalo das leituras dos sensores elétricos, pois num intervalo de 50 segundos é possível o surgimento de nuvens que afetariam a incidência solar e fariam com que não houvesse leitura do hidrômetro para o permeado, e desta forma os sensores não registrariam esta ausência de permeado, o que justifica tal diferenças.

Quanto as médias apresentadas na Tabela 4.1 são verificadas diferenças, em alguns resultados, quando comparadas com os valores obtidos através das equações citadas anteriormente para o cálculo destas variáveis em razão dos sucessivos arredondamentos realizados para estes valores e dos problemas ocasionados pela “falsa” leitura já exposta.

4.6 – Balanço de Custo de um Sistema de Dessalinização Usando Energia Solar Fotovoltaica

O sistema de dessalinização via painel fotovoltaico depende de alguns fatores, tais como infra-estrutura do sistema, tamanho da planta, vazão da água de alimentação, salinidade da água de alimentação, tipo do processo utilizado, custo de energia, operação e manutenção.

O balanço de custo foi baseado ao de AHMAD e SCHMID (2002). O período de 20 anos foi definido por ser a expectativa de vida útil dos painéis fotovoltaicos.

Considerando os custos levantados foram para uma comunidade que já possua a construção do abrigo e a perfuração do poço teremos:

Quadro 4.1 – Valores dos componentes do dessalinizador com os painéis

QUANTIDADE	COMPONENTES	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL
02	Permeador <i>(Vega Dessalinizadores Ltda)</i>	R\$ 400,00	R\$ 800,00
01	Motor-Bomba – DC (1Hp) <i>(Pacific Scientific)</i>	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00
02	Membrana <i>(BW30LE-4040 Filmtec Membranes)</i>	R\$ 1.200,00	R\$ 2.400,00
02	Hidrômetro <i>(Cagepa-CG)</i>	R\$ 100,00	R\$ 200,00
02	Manômetro <i>(Wika do Brasil Ind. e Com. Ltda)</i>	R\$ 60,00	R\$ 120,00
01	Circuito Eletrônico (Custo do Serviço)	R\$ 500,00	R\$ 500,00
16	Painel 110Wp <i>(Kyocera Corporation)</i>	R\$ 1.600,00	R\$ 25.600,00

Sub-Total I: R\$ 32.120,00

Quadro 4.2 – Valores de instalação e manutenção

Instalação 10 % do valor do sistema	R\$ 3.212,00
Operação e manutenção 2% do valor do sistema	R\$ 642,40
Três trocas de elementos de membranas (20 anos)	R\$ 7.200,00

Sub-Total II: R\$ 11.054,40

Total: R\$ 43.174,40

4.7 – Perfil do Custo da Água Dessalinizada em Função do Consumo e Produção Diária

A produção do permeado do sistema de dessalinização com soluções de NaCl pode ser a mesma para água salobras dentro da mesma faixa de concentração e pressão de operação estudadas. De acordo com a taxa de rejeição da membrana de 98% a qualidade do permeado pode variar em função da concentração iônica da água *in natura*, ou seja, a presença de outros íons além do NaCl, estes estarão presentes no permeado e concentrado e, conseqüentemente, a condutividade elétrica e STD serão superior aqueles oriundos de uma solução de alimentação contendo, somente os íons de sódio e cloreto. No Apêndice I encontra-se anexo o boletim técnico do elemento de membrana da Filmtec que mostra suas características e a taxa de rejeição de sais.

O simulador de dessalinização via osmose inversa ROSA (Reverse Osmosis System Analysis) mostra no Apêndice III duas simulações, uma para solução de NaCl e outra para água *in natura* de mesma concentração da solução de NaCl, visando que o mostrar que potencial da taxa de rejeição (RS%) da membrana de 98% para ambos os casos são de valores aproximados para a mesma recuperação de 24%.

Considerando os comentários acima o sistema em estudo pode ser tomado como referência para sistemas de dessalinização no campo para que venha atender a produção de água potável para beneficiar pequenas comunidades difusas.

Para as situações estudadas neste trabalho foi tomada como referência a vazão do permeado ($Q_p = 0,17 \text{ m}^3/\text{h}$) a mais representativa em função das concentrações das soluções estudadas. Também foi tomado de acordo com o boletim técnico da membrana em estudo vazão nominal de um elemento de membrana de $0,36 \text{ m}^3/\text{h}$. Como o dessalinizador é composto de dois elementos de membranas a vazão nominal de referência será de $0,72 \text{ m}^3/\text{h}$.

A Tabela 4.2 apresenta os valores do custo do permeado em função dos dados de referencias mencionados acima e levando em consideração somente o custo do dessalinizador. Nesse trabalho é assumido que outros pontos como poço, abrigo do dessalinizador, etc., não seja parte do orçamento deste trabalho. Essa hipótese leva crer que a parte de Engenharia Civil e outras sejam partes de outro projeto.

Tabela 4.2 Perfil do custo da água dessalinizada em função do consumo e produção diária

Variáveis	Valor Obtido	Valor Nominal	Relação Percentual (%)
Qp (m ³ /h)	0,17	0,72 *	24
t _{operação} (h/d)	6	6	-
Qp (m ³ /d)	1,02	4,32	24
Média de pessoas beneficiadas (5L/pessoa)	204	864	24
Média de famílias (5 pessoas/família)	41	173	24
Custo médio do permeado (R\$/m ³)	6,78	2,31	293

(*) Para dois elementos de membranas

Esta análise dos custos não foi minuciosa visto que não foram levados em conta os juros sobre o capital, as inflações do mercado. Também não se contabilizou um possível aproveitamento da energia solar para a produção do sal, através da evaporação da salmoura, colocada num reservatório exposto à radiação solar para evaporação, deixando sal como produto.

A produção de água permeada no dessalinizador depende de vários parâmetros assim como segue: concentração de sais dissolvidos na água de alimentação, a distância da fonte hídrica para o dessalinizador, área de membrana disponível, número de painéis e número de horas de incidência solar durante o dia. Os parâmetros que podem interferir na produção do permeado são: a densidade de nuvens presentes na atmosfera durante o dia, a qual diminui consideravelmente o desempenho dos painéis fotovoltaicos. O caso em estudo o sistema não apresenta um banco de baterias que possa, através de circuitos elétricos, disponibilizar energia suficiente para manter o dessalinizador funcionando de forma contínua.

Quando as interferências da corrente elétrica aparecem durante o processo de dessalinização, conforme se encontra mostrada na (Figura 4.1) corrente elétrica versus tempo, a produção do dessalinizador diminui. Esse fato se dar por falta de incidência solar nos painéis. Conseqüentemente a quantidade de água que entra no dessalinizador diminui consideravelmente tão quanto a recuperação no sistema.

Este problema pode ser contornado com a implementação de baterias, o qual se torna caro pelo fato da manutenção e o tempo útil médio de dois anos serem muito pequeno.

A outra alternativa para minimizar o problema para buscar aumentar a produtividade é fazer um estudo das cargas de cada componente do sistema, visando determinar o gradiente de potência necessário para operar com maior segurança. Esse estudo levará a uma monitorização de várias variáveis do processo de dessalinização e também o potencial de irradiação solar do dia.

Com esse estudo do “balanço de potência” se poderá estudar as ocorrências em função do número de frequência que a corrente elétrica diminui por falta de incidência solar. Para esses casos pode se implantar sensores que possam dirigir a quantidade de água que entra para um menor número de elementos de membranas.

A produção seria maior do que o uso do número total de membrana para um gradiente de pressão menor do que aquele do projeto.

5.0 – CONCLUSÕES

O resultado do trabalho desenvolvido nos permite concluir que:

1. Para o sistema de dessalinização com os painéis fotovoltaicos foi observado que a produtividade depende diretamente da taxa de irradiação solar. O fato de esta variar faz com que ocorra uma série de oscilações em frequências diferentes produzindo assim gradientes de pressões abaixo e/ou acima da pressão osmótica da solução problema, conforme mostram as figuras do comportamento das vazões do permeado.
2. Para faixa de concentração de (1200 a 1500)mg/L, qual é bastante representativa em águas salobras, obteve-se uma capacidade média de produção de permeado de 0,17 m³/h que correspondeu a 0,13 m³ de permeado produzido durante 1 hora. Isso pode significar uma produção de 1020L de permeado para 6 horas de operação.
3. A instalação no sistema das válvulas de passagem e alívio na entrada e saída dos elementos de membrana, aparentemente regula a pressão interna do dessalinizador e mantém a água nos elementos de membrana quando a ausência de energia a partir dos painéis. Todavia a necessidade de se explorar mais a eficiência desses dois componentes no sistema.
4. Os dados obtidos através dos custos dos componentes do sistema de dessalinização incluindo instalação e manutenção pode subsidiar água permeada para 41 famílias a um custo de 6,78 reais/m³.

6.0 – PERSPECTIVAS

Esta dissertação não teve a pretensão de esgotar as pesquisas sobre osmose inversa com energia fotovoltaica sem acumuladores. Para tanto, fica como sugestões para trabalhos futuros:

- Desenvolver um balanço de energia de todos os componentes do sistema de dessalinização (Um balanço de potência para diversos pontos da tensão versus corrente);

- Desenvolver uma modelagem da incidência do sol para atender a demanda de energia do sistema;

- Em função da análise do balanço de energia e de oferta de energia solar estudar o sistema visando identificar as faixas viáveis e críticas de operação;

- Testar o sistema numa comunidade onde há maior ocorrência de incidência solar visando estudar o desempenho do sistema;

- Aperfeiçoar o circuito eletrônico de forma que o mesmo possa interromper o experimento caso não haja produção de água permeada e automaticamente retorne quando a tensão aumentar;

- Estudar o desempenho do sistema em função do número de painéis fotovoltaicos versus diferentes arranjos, bem como acompanhando o percurso do sol durante o ano;

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLAH S.; ABU-HILAL, M.; MOHSEN M. S., **Performance of a photovoltaic powered reverse osmosis system under local climatic conditions**. Desalination, v. 183, 2005, p. 95-104.

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

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

AMJAD, Z., **Reverse Osmosis, Membrane Tecnology, Water Chemistry, and Industrial Applications**. Ed. Van Nostrand Reinhold, 1993.

AMORIM, M. C. C.; SILVA JÚNIOR, L. G. A.; PORTO, E. R. **Efeito de sais no solo provenientes de rejeitos da dessalinização por osmose inversa no semi-árido Pernambucano**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola; 26, 1997, Campina Grande. Anais, Campina Grande: SBEA, 1997. CD Rom.

AQUANET. **Dessalinização usando Osmose Reversa**. Disponível em: <<http://www.sattamini.com.br/tech/osmosefront.htm>>. Acesso em: 16 de maio de 2006.

BCCRESEARCH. **Membranas de Osmose Inversa**. Disponível em: <<http://bccresearch.com/reports.htm>>. Acesso em: 24 de outubro de 2006.

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

BYRNE, W., **Reverse Osmosis – A practical guide for industrial users**. 2 edição. Editora Tall Oaks Publishing 2002.

BOUGUECH, S., HAMROUNI, B.; DHAHBI, M., **Operating analysis of a direct energy coupled desalination family prototype.** *Desalination*, v. 168, 2004, p. 95 – 100.

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.

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

CAVALCANTE, F.P.; **Técnicas de Diagnóstico de Falhas para Dessalinizadores de Pequeno Porte Instalados no Interior do Ceará e Propostas de Melhorias.** Fortaleza. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, 2003.

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.

CHISTOFIDIS, D.; **Água: Gênese, Gênero e Sustentabilidade Alimentar no Brasil,** Brasília, DF 2006

DELYANNIS, E.E., **Status of solar assisted desalination: A review,** *Desalination*, 67 (1987) 3-19.

DOW Liquid Separations; 2004. **FILMTEC Reverse Osmosis Membranes Technical Manual.** Disponível em: <http://www.dow.com/liquidseps/lit/down_lit.htm>. Acesso em: 14 out. 2004.

FILTEAU, G. & MOSS, P., **Ultra-low pressure RO membranes: an analysis of performance and cost.** *Desalination* 113: 147-152, 1997.

FRANÇA, K.B., LABORDE, H.M. e NEFF, H., **Desing and performance of small sacole solar powered water desalination systems, utilizing reverse osmosis**, Journal of Solar Energy Engineering, 122, (2000) 170.

GOETZBERGER, A.; KNOBLOCH, J.; VOSS, B.; 1998. **Crystalline Silicon Solar Cells**. 1. ed. Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd.

GOETZBERGER, A., LUTHER, J e WILLEKE, G., **Solar cells: past, present, future**, Solar Energy Materials & Solar Cells, 74 (2002) 1-11.

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

HOFERT, R., **Variable speed turbo couplings used as pump drive in desalination plants**. Desalination 125: 181-189, 1999.

HYDRANAUTICS. RO. **System Design Software**, 2002

JOYCE, A., LOUREIRO, D., RODRIGUES, C. e CASTRO, S., **Small reverse osmosis units using PV systemsfor water purification in rural places**, Desalination, 137 (2001) 39.

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

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.

LIRA, R. H. P., **Avaliação do Pré-Tratamento de um Sistema de Dessalinização Piloto Via Osmose Inversa**, Seminário em Engenharia Química, UFCG – PB, 2004.

LOXSOM, F e DURONGKAVEROJ, P., **Estimating the performance of a photovoltaic pumping system**, Solar Energy, Vol. 52, No. 2 pp. 215-219, 1994.

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

MAYCOCK, P.; **PV market update**. Renewable ENERGY World, James & James Ltd, v. 7, n. 4., p. 2004

MATHIOULAKIS, E.; BELESSIOTIS, V.; DELYANNIS, E. **Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art**. Desalination 203 (2007) 346–365

MESA, A.A., GÓMEZ, C.M. e AZPITARTE, R.U., **Energy saving and desalination of water**, Desalination, 108 (1996) 43-50.

MICKLEY, M. C. **Membrane concentrate disposal: practices and regulation**. Denver: U.S. Department of the Interior. (Desalination and Water Purification Research and Development Program Report No.69). <http://www.usbr.gov/pmts/water/media/pdfs/report069.pdf>. 10 de jul. 2004a.

MICKLEY, M. C. **Desalination concentrate management and issues in the United States**. <http://www.twdb.state.tx.us/Desalination/Desal/proceedings/Mickley.pdf>. 10 Jul. 2004b.

MME – Ministério de Minas e Energia; 2003. **Projeto Cadastro da Infra-estrutura Hídrica do Nordeste – Relatório Preliminar**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/rehi/projeto.pdf>>. Acesso em: 11 maio 2004.

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

MONTENEGRO, F.F.D.; **Projeto e Avaliação Econômica de Instalação Pioneira no Brasil de Planta de acionada por Painéis Fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL; 2004. **Review of the Desalination and Water Purification Technology Roadmap**. Washington, D.C.: The National Academies Press. Disponível em: <http://www.nap.edu/books/0309091578/html/>

NETTO, J.L.C de A., **Energia Elétrica da Energia Solar**, SENAI, PB, 2006.

NETTO, O. de M.C., **Água: Um Problema de Segurança Alimentar**, II Congresso Latino-Americano de Higienistas de Alimentos, Búzios,RJ, 2005

NOTÍCIAS CNPQ. **Tecnologia transforma água salobra em água doce**. Disponível em: <<http://www.cnpq.br/noticias/2005/020805htm>. Acesso em: 21 dezembro 2005.

OLIVEIRA, A.R., **Desempenho de um sistema via osmose inversa, em escala piloto, alimentados por painéis fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado em engenharia química), UFCG, Campina Grande-PB, 2002.

OLIVEIRA, A.R., **Desempenho de um sistema de dessalinização via osmose inversa usando energia não-convencional, sem a utilização de acumuladores**. Tese (Doutorado em engenharia de processos), UFCG, Campina Grande-PB, 2007.

OLIVEIRA, D. R. de., **Pré-tratamento do processo de osmose inversa utilizando a microfiltração e investigação de técnicas de limpeza e recuperação de membranas**. Dissertação (Mestrado em engenharia química), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ, 2007.

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

PESSOA, L. C. C. **Análise de desempenho e do impacto ambiental dos dessalinizadores por osmose reversa.** Fortaleza: UFC, 2000. 94p. Dissertação Mestrado.

PINHEIRO, J. C. V.; CALLADO, S. M. G. **Avaliação de desempenho dos dessalinizadores do Ceará.** <http://www.bnb.gov.br/progEventos-BN/projForumEconomia2003/DOCS/MESA%2009%20-%2034.PDF>. 10 Jul. 2004.

PORTARIA 518 DO MINISTÉRIO DA SAÚDE DE 2004.

PORTO, E. R.; AMORIM, M. C. C. de; ARAÚJO, O. J.; SILVA JÚNIOR, L. G. A. **Aproveitamento dos rejeitos da dessalinização. In: Simpósio sobre captação de água de chuva no semi árido brasileiro**, 1., 1997, Petrolina.

PORTO, E. R.; AMORIM, M. C. C. de; ARAÚJO, O. J.; SILVA JÚNIOR, L. G. A. **Uso do rejeito da dessalinização de água salobra para irrigação da erva-sal (*Atriplex nummularia*).** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.5, n.1, p.111-114, 2001.

RALUY, G.; SERRA, L.; UCHE, J. **Life cycle assessment of MSF, MED and RO desalination Technologies.** Energy 31 (2006) 2361–2372.

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

RIFFEL, D.B.; **Unidade de Osmose Reversa acionada por Energia Solar Fotovoltaica sem Baterias: Simulação, Projeto e Validação Experimental.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005, p.125.

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

SCHNEIDER, R.P.; TSUTIYA, M.T.; **Membranas Filtrantes para o Tratamento de Água, Esgoto e Água de Reuso.** 1 ed. São Paulo: ABES, 2001

SILVA S. K., LIRA, R. H. P., CARTAXO, J. M., PEREIRA, M. L. F. e FRANÇA, K. B., **Estudo e Avaliação de um Sistema de Dessalinização Piloto (SDP) sob o Efeito de Diferentes Tipos de Pré-Tratamentos**, VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2005.

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

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

THOMSON, M. e INFELD, D., **A photovoltaic – powered seawater reverse – osmosis system without batteries**, Desalination, 153 (2002) 1-8.

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

UNESCO; 2003. **Water for people - water for life - the United Nations world water development report**, UNESCO Publishing / Berghahn Books.

WATSON, I. C.; MORIN Jr., O. J.; HENTHORNE, L. **Desalting handbook for planners.** Denver: United States Department of the Interior. 3.ed. 2003. 310p. Desalination and Water Purification Research and Development Program Report N. 72

Energia Solar; Disponível em: < www.fabioenergia.hpg.com.br >., Acesso: 4 de Maio de 2004.

ANEXOS

APÊNDICE I
Boletim Técnico da Membrana

FILMTEC Membranes

FILMTEC Fiberglassed Elements for Light Industrial Systems

Features

FILMTEC™ brackish water reverse osmosis membrane elements provide consistent, outstanding system performance in light industrial applications.

- FILMTEC BW30LE-4040 delivers highest performance at lowest pressure resulting in less energy usage and lower costs.
- FILMTEC BW30-4040 is the industry standard for reliable operation and production of the highest quality water.
- FILMTEC BW30-2540 elements are designed for systems smaller than 1 gpm (0.2 m³/h) offering a hard shell exterior for extra strength.

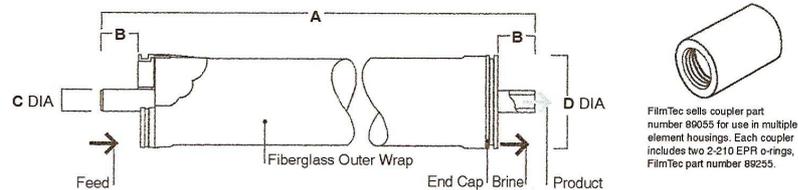
Elements with a hard shell exterior are recommended for systems with multiple-element housings containing three or more membranes, as they are designed to withstand higher pressure drops.

Product Specifications

Product	Part Number	Active Area ft² (m²)	Applied Pressure psig (bar)	Permeate Flow Rate gpd (m³/d)	Stabilized Salt Rejection (%)
BW30LE-4040	80604	82 (7.6)	150 (10.3)	2,300 (8.7)	99.0
BW30-4040	80783	82 (7.6)	225 (15.5)	2,400 (9.1)	99.5
BW30-2540	80766	28 (2.6)	225 (15.5)	850 (3.2)	99.5

1. Permeate flow and salt rejection based on the following test conditions: 2,000 ppm NaCl, pressure specified above, 77°F (25°C) and 15% recovery.
2. Permeate flows for individual elements may vary +/-20%.
3. For the purpose of improvement, specifications may be updated periodically.
4. BW30LE-4040 was previously named BW30HP-4040.

Figure 1



Dimensions – Inches (mm)

Product	A	B	C	D
BW30LE-4040	40.0 (1,016)	1.05 (26.7)	0.75 (19)	3.9 (99)
BW30-4040	40.0 (1,016)	1.05 (26.7)	0.75 (19)	3.9 (99)
BW30-2540	40.0 (1,016)	1.19 (30.2)	0.75 (19)	2.4 (61)

1. Refer to Film Tec Design Guidelines for multiple-element systems.
 2. BW30-2540 elements fit nominal 2.5-inch I.D. pressure vessel. BW30LE-4040 and BW30-4040 elements fit nominal 4-inch I.D. pressure vessel.
- 1 inch = 25.4 mm

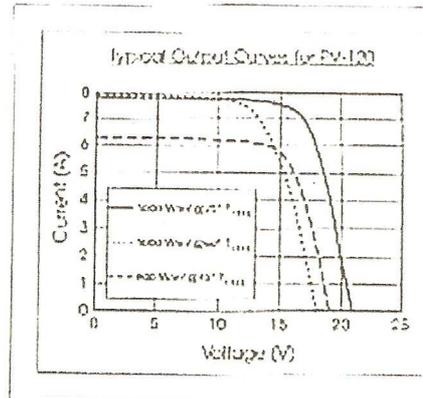
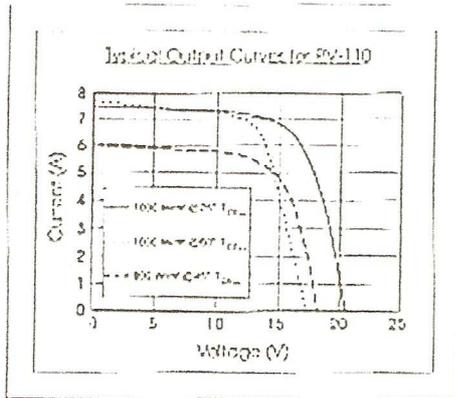
APÊNDICE II

Especificações do Pannel Fotovoltaico

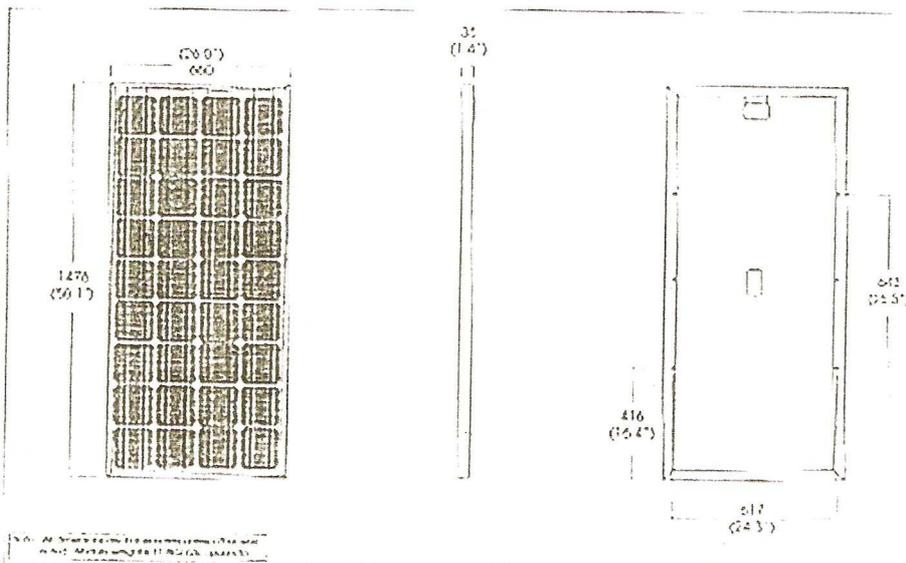
Power-Value 110&120

Technical Specifications

Electrical Characteristics



Physical Characteristics



PHOTOCOMM, INC.
THE WIRELESS POWER COMPANY

Printed on Recycled Paper • Printed in USA

GOLDEN GENESIS COMPANY

7812 East Acorn Dr.
Scottsdale, AZ 85260
Phone (USD) 644-6466 (002) 951-6320
E-Mail: info@golden genesis.com

Power-Value 110&120 PHOTOCOMM, INC. THE WORLD'S POWER COMPANY

Solar Electric Modules

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

Features

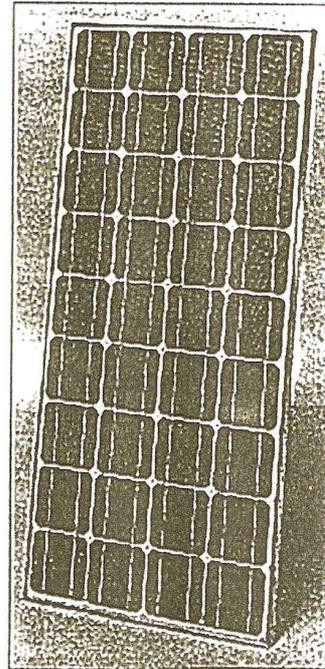
- High power modular building block configuration
- Over 6.5 Amps of charging in full sunlight
- Spacious junction box for ease of wiring
- Industry standard mounting hole patterns
- 10-year warranty
- UL listed

Construction

- 36 series connected single crystal Cz silicon cells
- Rugged, corrosion resistant, anodized aluminum frame
- Weather resistant, conduit-ready junction box
- Integral bypass diodes

Applications

- Microwave/Radio repeater stations
- Cathodic protection systems
- Electrification of remote villages
- Rural or remote village water supplies
- Pumping systems for irrigation and livestock watering
- Water quality and environmental data monitoring systems
- Desalination systems
- Medical facilities and schools in rural areas
- Remote or rural home lighting systems
- General battery charging



PV-110/PV-120

Typical Electrical Specifications*

	PV-110	PV-120
• Peak power (Pp)	110 Watts	120 Watts
• Open circuit voltage (Voc)	20.7 Volts	21.0 Volts
• Max. power voltage (Vmp)	16.7 Volts	16.9 Volts
• Short circuit current (Isc)	7.5 Amps	7.7 Amps
• Max. power current (Imp)	6.6 Amps	7.1 Amps

Typical Physical Specifications

- Weight 26.1 lbs. (11.9 kg)
- Dimensions 58.1 x 26.0 x 1.4 in.
(1476 x 660 x 35 mm)

*NOTE: Electrical specifications are under standard test conditions, irradiance of 1000W/m², spectrum of 1.5, air mass and cell temperature of 25°C.

APÊNDICE III
Simulação do ROSA (Reverse Osmosis System Analysis)

Project Information: Simulação para um sistema de dessalinização com solução de NaCl de 2000 mg/L

System Details

Feed Flow to Stage 1	0.74	m ³ /h	Pass 1 Permeate Flow	0.20	m ³ /h	Osmotic Pressure:		
Raw Water Flow to System	0.74	m ³ /h	Pass 1 Recovery	27.00	%	Feed	1.64	bar
Feed Pressure	4.94	bar	Feed Temperature	28.8	C	Concentrate	2.20	bar
Fouling Factor	0.85		Feed TDS	2002.90	mg/l	Average	1.92	bar
Chem. Dose	None		Number of Elements	2		Average NDP	2.56	bar
Total Active Area	14.49	M ²	Average Pass 1 Flux	13.79	lmh	Power	0.13	kW
Water Classification: Well Water SDI < 3						Specific Energy	0.63	kWh/m ³

Stage	Element	PV	Ele	Feed Flow (m ³ /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m ³ /h)	Conc Flow (m ³ /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m ³ /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30L E-4040	1	1	0.74	4.59	0.00	0.63	4.56	0.11	15.62	0.00	0.00	81.37
2	BW30L E-4040	1	1	0.63	4.21	0.00	0.54	4.18	0.09	11.96	0.00	0.00	121.57

Pass Streams (mg/l as Ion)							
Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate		Permeate		
			Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total
NH4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	787.89	787.89	924.35	1064.93	32.01	47.82	38.86
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	1215.01	1215.01	1425.45	1642.23	49.36	73.74	59.93
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TDS	2002.90	2002.90	2349.81	2707.16	81.37	121.57	98.80
pH	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Project Information: Simulação para um sistema de dessalinização com água in natura

System Details

Feed Flow to Stage 1	0.74	m ³ /h	Pass 1 Permeate Flow	0.20	m ³ /h	Osmotic Pressure:		
Raw Water Flow to System	0.74	m ³ /h	Pass 1 Recovery	27.00	%	Feed	2.05	bar
Feed Pressure	5.55	bar	Feed Temperature	28.8	C	Concentrate	2.76	bar
Fouling Factor	0.85		Feed TDS	2836.81	mg/l	Average	2.40	bar
Chem. Dose	None		Number of Elements	2		Average NDP	2.68	bar
Total Active Area	14.49	M ²	Average Pass 1 Flux	13.79	lmh	Power	0.14	kW
Water Classification: Well Water SDI < 3						Specific Energy	0.71	kWh/m ³

Stage	Element	PV	Ele	Feed Flow (m ³ /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m ³ /h)	Conc Flow (m ³ /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m ³ /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30L E-4040	1	1	0.74	5.20	0.00	0.63	5.17	0.11	15.77	0.00	0.00	87.14
2	BW30L E-4040	1	1	0.63	4.82	0.00	0.54	4.80	0.09	11.81	0.00	0.00	132.37

Pass Streams (mg/l as Ion)							
Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate		Permeate		
			Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total
NH4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	22.40	22.40	26.33	30.29	0.88	1.33	1.07
Na	800.00	800.00	941.13	1083.63	27.07	41.25	33.14
Mg	110.00	110.00	129.70	149.74	2.10	3.17	2.56
Ca	62.00	62.00	73.11	84.41	1.15	1.75	1.41
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	4.98	4.98	6.47	7.94	0.00	0.01	0.01
HCO3	277.21	277.21	324.74	372.79	10.47	15.63	12.67
NO3	0.62	0.62	0.70	0.77	0.19	0.25	0.21
Cl	625.00	1458.88	1717.26	1978.60	43.85	66.89	53.71
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO4	78.90	78.90	93.13	107.65	0.96	1.45	1.17
SiO2	21.80	21.80	25.69	29.66	0.47	0.65	0.55
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	2.26	2.17	2.70	3.04	2.13	2.53	2.30
TDS	2002.93	2836.81	3338.29	3845.51	87.14	132.37	106.51
pH	8.10	8.10	8.06	8.06	6.84	6.93	6.89