



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Ciências e Tecnologia
Unidade Acadêmica de Engenharia Química
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química



**SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE INVERSA ALIMENTADO
POR PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: MODELAGEM E DIMENSIONAMENTO
SEM BATERIAS**

RÚBIA RAFAELA FERREIRA RIBEIRO

CAMPINA GRANDE, PB
MARÇO, 2009

Rúbia Rafaela Ferreira Ribeiro

**SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE INVERSA ALIMENTADO
POR PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: MODELAGEM E DIMENSIONAMENTO
SEM BATERIAS**

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 a obtenção do Grau de Mestre.

Orientadores: Prof. Kepler Borges França (Ph.D)
Prof. Dr. Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa

Campina Grande, PB
Março, 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

R484s

2009 Ribeiro, Rúbia Rafaela Ferreira.

Sistema de dessalinização via osmose inversa alimentado por painéis fotovoltaicos: modelagem e dimensionamento sem baterias / Rúbia Rafaela Ferreira Ribeiro. — Campina Grande, 2009.

74 f. : il.

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

Referências.

Orientadores: Prof. Dr. Kepler Borges França, Prof. Dr. Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa.

1. Energia Fotovoltaica. 2. Osmose Inversa. 3. Potência Elétrica. I.
Título.

CDU – 621.383.51(043)



**SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE INVERSA ALIMENTADO
POR PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: MODELAGEM E DIMENSIONAMENTO
SEM BATERIAS**

Rúbia Rafaela Ferreira Ribeiro

Aprovada em 31 de Março de 2009

Banca Examinadora



Prof. Dr. Kepler Borges França
Orientador



Prof. Dr. Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa
Orientador



Prof. Dr. Antonio Marcus Nogueira Lima
Examinador



Prof. Dr. Gilmar Trindade de Araújo
Examinador

Campina Grande, PB
Março, 2009

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Jailton e Josinete, pela dedicação e amor a mim conferido e pelo incondicional apoio na realização dos meus projetos.

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, expressão maior de sabedoria, que me concedeu o dom da vida e me permitiu chegar até aqui.

A **Minha Mãe** e ao **Meu Pai**, maiores incentivadores da minha busca pelo conhecimento, a quem devo tudo o que sou e conquistei.

Aos meus **Irmãos**, meus eternos companheiros.

A todos meus **Familiares** e **Amigos** que contribuíram de forma direta ou indireta para a conclusão desta etapa de minha vida.

Aos meus **Orientadores**, Prof. Kepler Borges França e Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa, pela paciência e dedicação durante a elaboração deste trabalho.

Aos companheiros do **LABDES** e **LEIAM** pelo companheirismo e amizade. Em especial, a Jorge pela indispensável ajuda na parte experimental.

A Coordenação do **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química** pela atenção.

A **CAPES** pelo suporte financeiro.

RESUMO

Este trabalho trata do estudo da oferta de energia solar visando à definição de um arranjo fotovoltaico adequado para o acionamento de um sistema de dessalinização via osmose inversa. Para um dimensionamento adequado do arranjo fotovoltaico, o sistema de dessalinização foi avaliado operando com disponibilidade de potência variável, sendo verificado seu perfil de funcionamento a partir do comportamento dos parâmetros: vazão do permeado, recuperação do sistema e condutividade elétrica do permeado. A avaliação do sistema permite caracterizar o efeito da disponibilidade de potência elétrica e da pressão de operação do sistema na quantidade e qualidade da água potável produzida. Para os estudos do potencial de energia solar foram utilizados dados de irradiação solar do período de Janeiro/2007 à Dezembro/2008. Já para a avaliação do sistema de dessalinização foi utilizada como água de alimentação uma solução de cloreto de sódio de 2.000 mg/L para operação em níveis variáveis de potência (300 – 700 W) e de pressão (5 – 15 kgf/cm²).

PALAVRAS-CHAVE: energia fotovoltaica, osmose inversa, potência elétrica.

ABSTRACT

This work refers the study of the supply of solar energy to the definition of a photovoltaic array to the appropriate drive of a system of desalination by reverse osmosis. For a proper sizing of the photovoltaic array, the system of operating desalination was evaluated with varying availability of power, and found your profile operating from the behavior of parameters: the permeate flow, recovery of the system and electrical conductivity of the permeate. The evaluation of the system allows to characterize the effect of the availability of electric power and pressure of operation of the system in the quantity and quality of drinking water produced. To study the potential of solar energy was used solar radiation data from the period of January/2007 the December/2008. For the evaluation of desalination system was used as the feed water solution of sodium chloride of 2.000 mg/L for operation in varying levels of power (300 – 700 W) and pressure (5 – 15 kgf/cm²).

KEYWORDS: photovoltaic energy, reverse osmosis, electric power.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Área da Membrana (m ²)
ΔC	Gradiente Concentração (mol/L)
C_i	Concentração Molar do Solute (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)
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
d	Dia
E_p	Consumo de Energia Prático
E_{emp}	Energia Empírica Consumida
FV	Fotovoltaico
h	Hora
I	Corrente Elétrica
J_i	Fluxo Mássico do Solute (g/cm ² min)
J_p	Fluxo do Permeado (L/m ² h)
J_w	Fluxo de Solvente (L/ cm ² min);
K_i	Coeficiente de Transferência de Massa do Solute
K_w	Coeficiente 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	Parte por Milhão (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_c	Vazão do Concentrado Total (m^3/h)
RS	Rejeição de Sais (%)
r	Recuperação do Sistema (%)
R	Constante Universal 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)
P_{ot}	Potência (watt)

SÍMBOLOS GREGOS

u_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 – Representação do processo de osmose natural	7
Figura 2.2 – Representação do processo de osmose inversa	8
Figura 2.3 – Elemento de membrana em espiral do processo de osmose inversa	16
Figura 3.1 – Configuração básica de sistemas fotovoltaicos	25
Figura 3.2 – Diagrama de sistemas fotovoltaicos em função da carga utilizada	25
Figura 3.3 – Modelos de módulos fotovoltaicos	27
Figura 3.4 – Circuito equivalente da célula solar (modelo ideal)	28
Figura 3.5 – Circuito equivalente da célula solar (modelo real)	29
Figura 3.6 – Fatores que influenciam a curva característica dos módulos fotovoltaicos	30
Figura 3.7 – Curva característica $I \times V$, com definição do FF, e a curva de potência do módulo	30
Figura 3.8 – Arranjo série dos módulos	31
Figura 3.9 – Arranjo paralelo dos módulos	31
Figura 4.1 – Fluxograma de execução de atividades	43
Figura 4.2 – Sistema experimental de dessalinização	45
Figura 4.3 – Topologia do sistema de acionamento	45
Figura 5.1 – Perfil de irradiação diária para Janeiro/2007	52
Figura 5.2 – Perfil de irradiação diária para Janeiro/2008	53
Figura 5.3 – Curvas tempo (min) versus irradiação solar diária (W/m^2)	53
Figura 5.4 – Percentual da irradiação solar média para os anos 2007 e 2008	54
Figura 5.5 – Variação da vazão do permeado em função da pressão, para potência de entrada fixas	57
Figura 5.6 – Variação da recuperação do sistema em função da pressão, para potência de entrada fixas	58
Figura 5.7 – Variação da condutividade elétrica em função da pressão	59
Figura 5.8 – Variação da pressão em função da potência de entrada	60

Figura 5.9 – Variação da vazão do permeado em função da potência de entrada	60
Figura 5.10 – Variação da vazão do permeado da potência de entrada	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Especificações do motor <i>CA WEG</i>	46
Tabela 4.2 – Especificações da bomba <i>PROCON</i> (Série 5)	47
Tabela 4.3 – Especificações da membrana de osmose inversa	48
Tabela 5.1 – Percentual de energia solar entre (300 – 800 W/m ²) para os anos de 2007 e 2008	55
Tabela 5.2 – Água na corrente do concentrado sem permeação	56
Tabela 5.3 – Faixas de operação da pressão em função da posição da válvula de controle	59
Tabela 5.4 – Especificações do painel fotovoltaico	62
Tabela 5.5 – Horas de irradiação solar média para o pior e melhor mês de 2008 a partir da irradiação média ofertada	63
Tabela 5.6 – Potência fornecida pelos painéis a partir da irradiação média ofertada	63
Tabela 5.7 – Produção de água permeada	67

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo	3
1.2. Objetivos Específicos	3
2. SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO	4
2.1. A Água	4
2.2. O Processo de Dessalinização	5
2.3. A Osmose Inversa	7
2.4. Equações Básicas do Processo de OI	8
2.4.1. Pressão Osmótica	8
2.4.2. Fluxo do Permeado	9
2.4.3. Fluxo do Concentrado	10
2.4.4. Balanço de Massa	11
2.4.5. Recuperação	11
2.4.6. Consumo de Energia	12
2.5. Componentes Básicos de Sistemas de Dessalinização	14
2.5.1. Membranas Poliméricas	14
2.5.2. Válvulas de Controle	17
2.5.3. Motor Elétrico	17
2.4.3.1. Motor CC	18
2.4.3.2. Motor de Indução	20
2.5.4. Bombas	21
3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	23
3.1. Radiação Solar	23

3.2. Energia Solar	23
3.3. Configurações Básicas de Sistemas Fotovoltaicos	24
3.4. Componentes Básicos de Sistemas Fotovoltaicos	26
3.4.1. Módulo Fotovoltaico	27
3.4.2. Baterias	32
3.4.3. Controladores de Carga	33
3.4.4. Inversores	33
3.5. Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos	35
3.5.1. Avaliação do Recurso Solar	35
3.5.2. Estimativa da Curva de Carga	36
3.5.3. Escolha da Configuração	37
3.5.4. Dimensionamento do Sistema de Armazenamento	37
3.5.5. Dimensionamento da Geração Fotovoltaica	37
3.5.6. Especificação dos Demais Componentes Básicos	38
3.5.7. Projeto Elétrico	38
3.6. Energia Solar para Sistemas de Dessalinização	39
4. METODOLOGIA	42
4.1. Metodologia Proposta	42
4.1.1. Etapa I	43
4.1.2. Etapa II	44
4.1.3. Etapa III	44
4.2. Sistema Experimental	45
4.2.1. Sistema de Dessalinização Via Osmose Inversa	46
4.2.1.1. Filtro	46
4.2.1.2. Motor	47
4.2.1.3. Bomba	48
4.2.1.4. Membranas	49
4.2.2. Sistema de Geração de Energia	49
4.2.3. Sistema de Aquisição de Dados	50
4.3. Procedimento Experimental	50

5. RESULTADOS	53
5.1. Estudo da Oferta de Energia Solar	53
5.2. Caracterização do Sistema de Dessalinização	57
5.2.1 Ensaio I	57
5.2.2 Ensaio II	58
5.2.3 Ensaio III	62
5.2. Projeto do Arranjo Fotovoltaico	65
6. CONCLUSÕES	69
7. PERSPECTIVAS	70
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
ANEXOS	75

1. INTRODUÇÃO

Não se imagina o exercício da plena cidadania sem que a água e a energia estejam presentes. Os recursos hídricos sempre foram indispensáveis à vida humana. Atualmente, em razão do modo de vida da civilização humana, os recursos energéticos se tornaram tão importantes quanto os recursos hídricos (LIMA, 2006).

Estes recursos não apresentam uma distribuição uniforme no globo terrestre o que ocasiona a busca por um uso racional dos recursos hídricos e energéticos a fim de gerar grandes benefícios ambientais e sociais para todos. Diante da forte sinergia existente entre estes recursos o estudo da dessalinização via osmose inversa associada aos sistemas de geração de energia fotovoltaica apresenta-se como uma alternativa bastante promissora no campo da gestão ambiental.

O volume hídrico total na superfície terrestre não está se reduzindo, porque não há perdas no ciclo de evaporação e precipitação, o que caracteriza a escassez é a poluição e a distribuição irregular.

Mais de três quartos da superfície da Terra são cobertos por água salgada. Embora essa água seja importante para alguns meios de transporte e para a pesca, ela é inadequada para manter a vida humana ou para atividades do campo (SOUZA, 2006).

Com o objetivo de tratar a água salgada de forma a torná-la apta para o consumo, o processo de dessalinização via osmose inversa é uma das opções mais econômicas da atualidade na busca de uma solução para a escassez de água potável.

O processo de osmose inversa consiste, basicamente, no bombeamento de água com alta concentração de sais contra membranas seletivas, sendo necessária 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 de sais, assim como vírus e bactérias presentes na água de alimentação (SOARES, 2008).

No interior do Nordeste brasileiro, além do problema do alto teor de sais na água, algumas comunidades encontram-se isoladas, sem acesso a água de boa qualidade e sem energia elétrica (OLIVEIRA, 2007).

Para superar estes obstáculos, as fontes de energia alternativas também denominadas de fontes renováveis, como a solar, podem ser usadas para sistemas de dessalinização (FRANÇA *et al.*, 2000). Estas fontes são consideradas inextinguíveis, limpas, com mínimo impacto ambiental, apresentando na atualidade uma contribuição energética cada vez mais significativa.

A energia captada do Sol é uma das tecnologias mais importantes para o desenvolvimento sustentável. As vantagens da captação de energia através de sistemas fotovoltaicos são a descentralização da geração, ficando acessível a qualquer comunidade em qualquer local, por mais remoto que seja. A facilidade e baixo custo da instalação, transmissão e manutenção, juntamente com a longa duração e estabilidade de um sistema adequadamente projetado, proporcionam grande satisfação e retorno do investimento ao usuário. Em resumo, o sistema passa a gerar energia, de forma confiável, sem necessitar de controle humano ou insumos.

Em virtude das vantagens apresentadas, a tecnologia fotovoltaica torna-se viável para a utilização em sistemas de dessalinização, especialmente em locais sem acesso a rede elétrica. A incidência de radiação solar influencia diretamente na energia entregue ao sistema, e conseqüentemente, na quantidade de água produzida. A operação de sistemas com tais características visa garantir o suprimento de água potável a comunidades com problemas de escassez hídrica.

Esta técnica de produção de água potável, fazendo uso de membranas de osmose inversa e painéis fotovoltaicos para geração de energia, é bastante conveniente para a região do Semi-Árido Nordestino, considerando que os longos períodos de estiagem favorecem uma taxa de insolação considerada como fonte de energia primária e limpa. Dentro deste contexto espera-se estudar com mais detalhamento técnico a produção de água potável através do processo de osmose inversa, visando obter um melhor desempenho com segurança e sustentabilidade.

1.1. Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um arranjo fotovoltaico adequado para o acionamento de um sistema de dessalinização via osmose inversa, bem como estudar o desempenho do sistema operando com disponibilidade de potência variável.

1.2. Objetivos Específicos

- (a) Estudar a oferta de radiação solar visando uma adequação a demanda de energia do sistema;
- (b) Analisar o comportamento de um sistema de dessalinização visando sua caracterização em operação fora da especificação nominal;
- (c) Projetar um arranjo fotovoltaico considerando a demanda de energia do sistema de dessalinização e a oferta de energia solar.

2. SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO

2.1 A Água

A água é o 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, o que compromete significativamente o futuro de muitas espécies, inclusive a humana, visto que a água é fundamental na manutenção da vida e, contrariando o que muitos pensam, é um recurso finito, que sem sua preservação pode tornar-se escassa no mundo, o que já se observa em grandes centros urbanos (FREITAS, 1999).

Na natureza a água nunca é encontrada quimicamente pura e sim com gases dissolvidos e sais minerais de diversos tipos, em maior ou menor concentração. A composição da água depende naturalmente dos seus constituintes e das características do compartimento onde se encontra (superficial ou subterrânea).

Fatores tais como clima, características geológicas, tipos de solos e distância em relação ao mar determinam a salinidade das águas naturais. Em regiões áridas ou semi-áridas é comum a salinização das águas, devido à própria constituição natural das mesmas.

As águas contendo sais dissolvidos com concentração igual ou acima de 1,0 kg/m³ são prejudiciais à saúde e inadequadas para o abastecimento humano. Muitos países no Oriente Médio descobriram que a solução disponível para o problema da escassez de água doce era a dessalinização da água do mar ou salobra (SOUZA, 2006).

2.2 O Processo de Dessalinização

A dessalinização trata-se de um processo físico-químico que consiste na remoção de sais da água com o objetivo de torná-la potável.

Um marco no desenvolvimento da dessalinização ocorreu nos anos 40, durante a Segunda Guerra Mundial, quando vários estabelecimentos militares, em regiões áridas, necessitaram de água para suprir suas tropas. A potencialidade que a dessalinização oferecia ficou evidenciada e trabalhos foram prosseguidos após a guerra em vários países (SOUZA, 2006).

O processo de dessalinização começou a ser utilizado 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 de 80, o emprego de membranas semipermeáveis sintéticas em aplicações industriais passou a se difundir, ampliando o campo de aplicação deste processo. O que ocasiona contínuas reduções de custos, não só pela maior escala de produção, como também pelo crescente conhecimento tecnológico adquirido.

Um dispositivo de dessalinização, essencialmente, realiza a separação da água salina em dois fluxos: um com baixa concentração de sais dissolvidos (o fluxo de água doce, potável ou permeado) e, o outro contendo os remanescentes sais dissolvidos (o fluxo de salmoura, concentrado ou rejeito). O dispositivo requer energia para operar e pode usar variadas tecnologias para efetuar a separação.

As energias usadas nos processos de dessalinização são, essencialmente, a eletricidade e o calor. O que representa, aproximadamente, 25 – 40% do custo total dos sistemas de dessalinização de águas. Os avanços tecnológicos em transferência de calor, tecnologia de membranas, 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 (TSIOURTUS, 2001).

Existem hoje, basicamente, duas tecnologias distintas em processos de dessalinização, a térmica e as membranas. A tecnologia que utiliza processos térmicos, envolve a mudança de estado físico, está perdendo mercado para as membranas seletivas, devido, basicamente, à escala de produção e à evolução da tecnologia (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2004).

Os principais processos térmicos são:

- Destilação por Compressão de Vapor (CV);
- Destilação Múltiplo Efeito (MED);
- Destilação Flash com Múltiplos Estágios (MSF);
- Congelamento.

Nos processos de separação por membranas temos a osmose inversa e a eletrodialise como mecanismos de maior relevância para a dessalinização de águas salinas e salobras. Cada processo utiliza a capacidade das membranas de diferenciar e separar seletivamente sais e água. Entretanto, as membranas são utilizadas diferentemente em cada um destes processos.

No processo de osmose inversa a separação dos componentes da água ocorre em função de um gradiente de pressão sobre uma membrana semipermeável, já na eletrodialise a força motriz aplicada ao processo é um potencial elétrico. Esses processos com membranas não apresentam mudança de fase.

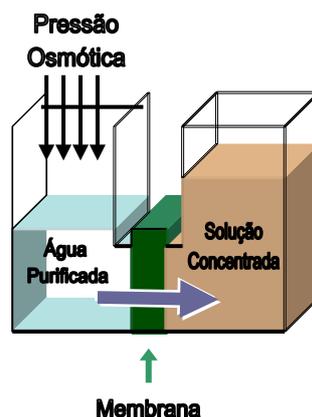
A dessalinização baseada na osmose inversa possui uma carga mais baixa de energia que a dessalinização térmica, este resultado é mais reforçado se o modelo da produção de energia for através de energias renováveis e também se a redução do consumo de energia da osmose inversa for conseguida com sistemas novos de recuperação de energia. Entretanto, as tecnologias térmicas de dessalinização não devem ser desconsideradas porque apresentam uma redução grande no potencial do impacto ambiental quando integradas com outro processo de produção (RALUY *et al.*, 2006).

2.3 A Osmose Inversa

A osmose inversa (OI) é uma operação unitária que através de membranas semipermeáveis e com o auxílio de um gradiente de pressão, pode rejeitar sais inorgânicos de baixo peso molecular, como também pequenas partículas orgânica (OZAKI, 2002).

No processo de dessalinização via osmose inversa, as moléculas de água passam livremente através da superfície da membrana, criando uma corrente de água purificada, denominada de permeado. Enquanto que a parcela restante da água de alimentação que não atravessa a membrana, na qual temos uma concentração elevada de sais, temos o que chamamos de concentrado.

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



2.1 – Representação do Processo de Osmose Natural

Fonte: (SOARES, 2008)

Na osmose inversa, a água escoar no sentido inverso ao da osmose natural, conforme mostra a (Figura 2.2), devido à aplicação de pressão à solução mais concentrada. Portanto, a água passa pela membrana no sentido da solução mais diluída, produzindo água doce (permeado), deixando para trás um resíduo

fortemente concentrado e sob pressão, obviamente superior à pressão osmótica e cujo valor depende da diferença entre as concentrações.

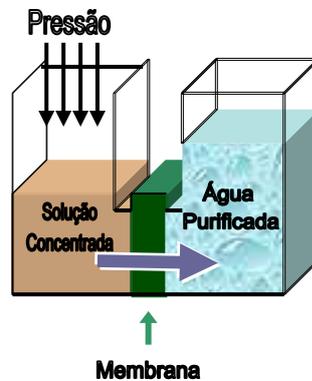


Figura 2.2 – Representação do Processo de Osmose Inversa

Fonte: (SOARES, 2008)

Em processos de grande escala isso ocorre com o auxílio de uma bomba de alta pressão, sob um fluxo contínuo, passando por um permeador, onde fica situada a membrana. A pressão a ser aplicada equivale a uma pressão superior a pressão osmótica característica da solução (OLIVEIRA, 2007).

Dentre os processos que utilizam a separação por membranas, a osmose natural evoluiu tanto, que hoje domina o setor de dessalinização, não só para potabilizar a água em locais de escassez, como para os 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 ultra-pura, unida as características como a modularidade e a baixa demanda energética, formam as principais razões da rápida difusão do processo de osmose inversa (SOARES, 2008).

2.4 Equações Básicas do Processo de OI

2.4.1 Pressão Osmótica

A pressão osmótica depende da concentração do soluto, 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 2.1 (Equação de Van't Hoff):

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

Onde:

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

u_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).

2.4.2 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:

$$J_w = k_w \cdot (\Delta P - \Delta \pi) = \frac{Q_p}{A} \quad (2.2)$$

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.

2.4.3 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:

$$J_i = k_i \Delta C = \frac{Q_p C_p}{A} \quad (2.3)$$

Onde, neste caso:

J_i - fluxo mássico do soluto (g/cm².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);

A - área de permeação da membrana (cm²).

2.4.4 Balanço de Massa

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

$$Q_a C_a = Q_p C_p + Q_c C_c \quad (2.4)$$

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 permeado (m^3/h);

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

Q_c – vazão do concentrado (m^3/h);

C_c – concentração de sais dissolvidos na corrente de concentrado (mg/L);

2.4.5 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):

$$r(\%) = \left(\frac{Q_p}{Q_a} \right) \cdot 100 \quad (2.5)$$

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:

$$r(\%) = \left[\left(\frac{Q_p}{Q_p + Q_c} \right) \right] \cdot 100 \quad (2.6)$$

Onde:

Q_c - 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).

A produção de água potável é diretamente proporcional ao gradiente pressão aplicado ao meio. Quanto maior a pressão de operação maior a recuperação e conseqüentemente maior tendência de formação de incrustações na superfície da membrana, o que resulta em um aumento no gradiente de pressão no interior da membrana e redução de permeabilidade e qualidade de água dessalinizada.

2.4.6 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).

Alguns avanços contribuíram para a diminuição dos custos de dessalinização de águas marinhas. Entres os quais podemos citar:

- Redução dos custos de produção e melhoria da qualidade das membranas pela automação do processo de produção;
- Mais área de membrana por modulo;
- 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.

A energia necessária para plantas de osmose inversa de baixa pressão pode ser calculada através da equação (2.7):

$$E_{emp} = \frac{(0,0287).P_a}{r.\eta_b.\eta_m} \quad (2.7)$$

Onde:

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

P_a – pressão de alimentação (kgf/cm²);

r – recuperação do sistema (%);

η_b – eficiência da bomba (%);

η_m – eficiência do motor (%);

(0,0287) – fator de conversão de energia de plantas de osmose inversa para kWh/m³ (LUCENA FILHO, 2000).

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:

$$E_p = \frac{P_{ot}}{Q_p} \quad (2.8)$$

Onde, neste caso:

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

P_{ot} – potência ativa consumida pelo sistema (W);

Q_p – vazão do permeado (m^3/h).

A potência ativa consumida pelo sistema é dada por:

$$P_{ot} = V \cdot I \quad (2.9)$$

Na qual:

V – tensão elétrica (V);

I – corrente elétrica (A).

2.5 Componentes Básicos de Sistemas de Dessalinização

2.5.1 Membranas Poliméricas

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 (RIFFEL, 2005).

As membranas semipermeáveis são frágeis e variam em sua capacidade de passar água doce e rejeitar a passagem de sais. Nenhuma membrana é perfeita na sua capacidade de rejeição de sais, de forma que uma pequena quantidade de sais passa através da membrana e aparece na água produto.

A tecnologia utilizada na síntese de filmes de porosidade controlada é dominada pelos polímeros orgânicos, podendo-se destacar três gerações distintas de membranas:

- Membranas simétricas com poros regulares,
- Membranas assimétricas ou anisotrópicas, e
- Membranas compostas.

Quanto aos modelos usuais de configurações geométricas de membranas de osmose inversa temos o plano em quadro, o elemento enrolado em espiral, o tubular e em fibras ocas.

Na dessalinização de águas salobras e do mar as membranas mais utilizadas são as de fibra oca e espiral (SCOTT, 1997 e KAHDIM *et al.*, 2003). Estas configurações possuem a melhor relação de área superficial do filme da membrana por unidade de volume ocupada pelo módulo, além de apresentarem custos de fabricação mais baixos e taxas de fluxo de permeado mais elevadas.

O modelo de fibras ocas é constituído por fibras com diâmetro externo de 25 a 250 μm e uma espessura de parede de 5 a 50 μm . A água afluenta, sob alta pressão, corre sobre a superfície externa das fibras. A água permeada escoá para fora, através da base destas fibras, e é coletada como o produto (LUCENA FILHO, 2000).

O modelo em espiral é constituído por um envoltório de membrana em torno de um espaçador (Figura 2.3). Este conjunto é ligado a um tubo perfurado, localizado numa das extremidades do envoltório da membrana. Toda a estrutura do envoltório da membrana é enrolada em torno do tubo, ao modo de rocambole, e o conjunto é inserido em um vaso de pressão cilíndrico. O fluido escoá sobre a membrana, enquanto que o permeador flui para um sistema coletor por intermédio de um tubo interno (SCHWINGE *et al.*, 2004).

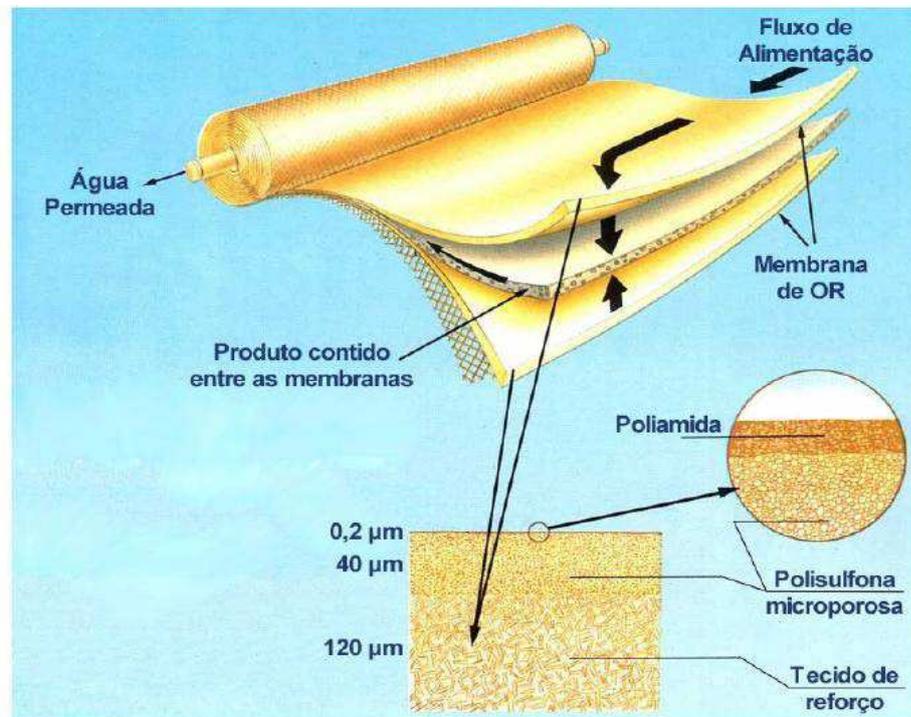


Figura 2.3 – Elemento de Membrana em Espiral do Processo de Osmose Inversa

Fonte: Adaptado de DOW, 2004

Cada unidade de membrana possui uma pressão de filtração (P_f), uma perda de carga (ΔP) e um rendimento (η) característicos. A média aritmética da soma das pressões de alimentação (P_a) e do concentrado (P_c) menos a pressão de permeado (P_p) define a pressão de filtração (P_f), ou seja:

$$P_f = \frac{(P_a + P_c)}{2} - P_p \quad (2.10)$$

A perda de carga no elemento de membranas (ΔP) é a diferença de pressão entre a alimentação e o concentrado do módulo.

$$\Delta P = P_a - P_c \quad (2.11)$$

Uma planta de osmose inversa pode possuir diversos vasos (recipientes que acondicionam as membranas) e esses podem conter diversas membranas. O quociente do fluxo de permeado (Q_p) pelo fluxo de alimentação (Q_a) de cada membrana define a taxa de recuperação, enquanto a mesma relação, quando se analisa a instalação como um todo, determina o rendimento da instalação (η).

$$r = \left(\frac{Q_p}{Q_a} \right) \cdot 100\% \quad (2.12)$$

2.5.2 Válvulas de Controle

As válvulas de controle empregadas em sistemas de transmissão hidráulicas podem ser divididas em três categorias:

- Controles de pressão;
- Controles de vazão;
- Controles direcionais.

A função das válvulas de controle de pressão é controlar as pressões no sistema de potência fluida. Os controles de pressão podem ser utilizados para reduzir, aliviar ou ajustar pressões.

Para os sistemas de dessalinização via osmose inversa são utilizadas válvulas de controle de pressão, as quais regulam a pressão de alimentação, controlando a vazão do concentrado. A pressão de alimentação, por assim dizer, determina a "qualidade" da água produzida.

2.5.3 Motor Elétrico

O motor elétrico é uma máquina destinada à conversão de energia elétrica em energia mecânica. Seu funcionamento está baseado nos princípios do eletromagnetismo, mediante os quais, condutores situados num campo magnético e atravessados por corrente elétrica, sofrem a ação de uma força mecânica, força essa chamada de torque.

Alguns motores operam em corrente contínua (CC) e podem ser alimentados quer por pilhas/baterias quer por fontes de alimentação adequadas, como os módulos fotovoltaicos, outros necessitam de corrente alternada (CA) e podem ser alimentados diretamente pela rede elétrica domiciliar.

A classificação das máquinas elétricas é feita de acordo com o princípio de funcionamento das mesmas, as quais são divididas em:

- Máquinas de corrente contínua;
- Máquinas assíncronas;
- Máquinas síncronas.

Nas máquinas elétricas podem-se distinguir dois elementos principais: o rotor (parte móvel, girante) e o estator (parte fixa).

O rotor precisa de um torque para iniciar o seu giro. Este torque (momento) normalmente é produzido por forças magnéticas desenvolvidas entre os pólos magnéticos do rotor e aqueles do estator. Forças de atração ou de repulsão, desenvolvidas entre estator e rotor, “puxam” ou “empurram” os pólos móveis do rotor, produzindo torques, que fazem o rotor girar mais e mais rapidamente, até que os atritos ou cargas ligadas ao eixo reduzam o torque resultante ao valor “zero”. Após esse ponto, o rotor passa a girar com velocidade angular constante. Tanto o rotor como o estator devem ser magnéticos, pois são essas forças entre pólos que produzem o torque necessário para fazer o rotor girar.

2.4.3.1 Motor CC

O princípio de funcionamento do motor de corrente contínua (motor CC) baseia-se no conceito de comutação. Define-se comutação como processo de conversão de tensões e correntes alternadas no rotor de uma máquina CC para tensão e corrente unidirecional nos terminais da máquina CC ou vice-versa. A conversão ocorre por meio da armadura (rotor) e do comutador, girando em um campo magnético fixo. Os terminais da bobina do rotor são conectados aos segmentos condutores (lâminas do comutador) que por sua vez são acessados

externamente por meio de contatos feito por escovas que são fixas e se situam na estrutura do estator.

No motor CC o enrolamento de armadura está localizado no rotor e os enrolamentos de campo estão localizados no estator. A armadura gira num campo magnético produzido pelos os pólos do estator, a tensão é induzida no enrolamento da armadura.

O enrolamento de excitação ou campo (situado no estator) da máquina é alimentado com corrente contínua criando o campo principal. O rotor é excitado com corrente contínua e a interação entre esses dois campos defasados, normalmente de 90 graus elétricos, resulta na criação do conjugado (torque) eletromagnético.

O rotor de um motor CC gira com velocidade angular que é proporcional à tensão aplicada em suas bobinas. Tais bobinas têm pequena resistência elétrica e conseqüentemente seriam percorridas por intensas correntes elétricas se o rotor permanecesse em repouso. Todavia, uma vez em movimento, as alterações do fluxo magnético sobre tais bobinas, geram uma força contra-eletromotriz (f.c.e.m.), extraem energia daquela corrente e baixa as tensões elétricas sobre tais bobinas. O torque resultante se anulará quando essa f.c.e.m. se igualar a tensão elétrica aplicada; a velocidade angular passa a ser constante. Em geral, 'carregando-se' o motor (ligando seu eixo a algo que deve ser movimentado) sua rotação não varia acentuadamente, mas, uma maior potência será solicitada da fonte de alimentação (aumenta a intensidade de corrente de alimentação). Para alterar a velocidade angular devemos alterar a tensão aplicada ao motor. O sentido de rotação do rotor depende das assimetrias do motor e também do sentido da corrente elétrica.

Tipicamente, os motores CC precisam de comutação de escovas para permitir que os campos do motor mudem rapidamente no tempo. Motores com escovas são projetados para operar por longos períodos, entretanto, as escovas utilizadas devem ser substituídas periodicamente.

Os motores CC são compatíveis com a fonte de energia fotovoltaica, no entanto, seu custo inicial é elevado e necessitam de manutenção periódica em virtude das escovas.

2.4.3.2 Motor de Indução

O motor de indução é o tipo de motor elétrico mais utilizado e difundido, tanto para motorização de sistemas, quanto para processos industriais. Sua principal vantagem é a eliminação do atrito de todos os contatos elétricos deslizantes e uma construção bastante simples, o que possibilitou sua construção a um custo ainda mais baixo, sendo que estas máquinas são fabricadas para grande variedade de aplicações, desde alguns watts até muitos megawatts. Além de ser robusto em termos de operação, proporcionando vantagens econômicas consideráveis tanto na aquisição, quanto na manutenção (CAD, 2000).

Alguns motores de corrente alternada têm rotores que não são quer imãs permanentes quer eletroímãs convencionais. Estes rotores são feitos de metais não-magnéticos, como o alumínio, e não têm nenhuma conexão elétrica. Todavia, o isolamento elétrico deles não os impede de ficarem magnetizados ou imantados. Quando um rotor feito de alumínio é exposto a campos magnéticos alternados, correntes elétricas começam a fluir por ele e estas correntes induzidas tornam o rotor magnético. Esse é um fenômeno básico do eletromagnetismo denominado indução eletromagnética. Tais motores, que usam desse fenômeno para tornarem seus rotores magnetizados, são chamados de motores CA de indução.

Os motores de indução são provavelmente o tipo mais comum de motor de corrente alternada, estes trabalham movendo um campo magnético em torno do rotor, o qual é denominado campo magnético girante.

O estator que cerca o rotor contém um eletroímã sofisticado, não se movimenta, mas sim o campo magnético que ele produz. Com um uso inteligente de vários recursos eletromagnéticos (espiras de curto circuito, capacitores etc.), o estator pode criar pólos magnéticos de que se deslocam em um círculo e se movimenta em torno do rotor.

Os motores CA adicionam complexidade aos sistemas fotovoltaicos, pois exigem a inclusão de um inversor para transformar a corrente contínua, proveniente dos painéis fotovoltaicos, em corrente alternada. Entretanto, possuem a vantagem de apresentam custos mais baixos, quando comparados aos motores CC, e serem mais facilmente disponíveis no mercado.

A escolha do tipo de motor mais adequado ao sistema em estudo depende do volume de água necessário, da potência requerida para atingir a pressão desejada ao processo de osmose inversa, eficiência, custo, confiabilidade, disponibilidade e facilidade para realização de manutenção.

2.5.4 Bombas

As bombas são dispositivos hidráulicos capazes de fornecer fluido hidráulico sob pressão a um sistema, utilizando para isso uma energia primária, que normalmente é elétrica (motor elétrico), sendo a quantidade de fluido distribuída proporcional ao deslocamento de fluido por rotação da bomba e pela rotação na qual a bomba é operada.

O propósito das bombas é converter a energia de uma fonte motriz principal (o motor elétrico), em velocidade ou energia cinética, e então, em energia de pressão do fluido que está sendo bombeado.

As bombas, normalmente, são classificadas pela forma com que a energia é entregue ao fluido. Neste sentido são classificadas em bombas volumétricas ou rotativas, a qual colhe continuamente o líquido da câmara, e bombas centrífugas, a qual provê velocidade à corrente fluida. As volumétricas são bombas de deslocamento positivo com movimento circular, já as centrífugas são bombas de deslocamento não-positivo.

Bombas volumétricas ou de deslocamento positivo é um termo genérico para caracterizar bombas onde o fluido na entrada do sistema tem aproximadamente a mesma direção que no ponto de saída do mesmo. A movimentação do fluido é causada diretamente pela ação do órgão de impulsão da bomba que obriga o fluido a executar o mesmo movimento a que está sujeito este impulsor (êmbolo, engrenagens, lóbulos, palhetas). Dá-se o nome de volumétrica porque o fluido, de forma sucessiva, ocupa e desocupa espaços no interior da bomba, com volumes conhecidos, sendo que o movimento geral deste fluido dá-se na mesma direção das forças a ele transmitidas. As bombas de deslocamento positivo podem ser de vários

tipos: helicoidal, diafragma, e pistão. Em aplicações de bombeamento fotovoltaico as mais utilizadas são a helicoidal e de diafragma.

As bombas centrífugas possuem um dispositivo rotatório dotado de pás, chamado rotor, o qual transfere movimento de rotação para a massa de água contida na carcaça; desta forma a água é forçada para fora da carcaça através das aberturas de saída, devido a força centrífuga. O vácuo criado, em consequência, possibilita a pressão atmosférica a forçar mais água para dentro da carcaça através da abertura de entrada. Esse processo continua enquanto perdurar o movimento do rotor, e enquanto for possível a alimentação de água. Essas bombas podem conter diferentes números de estágios, os quais são empilhados seqüencialmente para obter aumento de pressão, ou seja, quanto maior o numero de estágios maior será a altura manométrica de operação dessas bombas (BRITO, 2006).

No sistema de dessalinização em estudo onde se exigem pressões elevadas, a fim de se vencer a pressão osmótica característica da solução, necessárias aos processos de osmose inversa, as bombas mais adequadas são as de deslocamento positivo, mais comumente chamadas de bombas de alta pressão. A bomba de alta pressão fornece a pressão necessária para permitir à água passar pela membrana e ter os sais rejeitados. Esta pressão varia de 17 a 27 kgf/cm² para a água salobra e de 54 a 80 kgf/cm² para a água salgada (MOHSEN *et al.*, 2001).

No sistema de dessalinização em estudo, o conjunto motor-bomba é o dispositivo responsável por transformar a energia elétrica gerada pelos geradores fotovoltaicos em energia mecânica que realiza o trabalho necessário para executar a dessalinização da água. Portanto, deve-se escolher uma bomba ou um grupo motor-bomba para operar próximo ao ponto de máxima eficiência, sob as condições de pressão e vazão necessárias.

3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

3.1 Radiação Solar

A radiação solar é radiação eletromagnética que se propaga a uma velocidade de 300.000 km/s, podendo-se observar aspectos ondulatórios e corpusculares. Além das condições atmosféricas (nebulosidade, umidade relativa do ar etc.), a disponibilidade de radiação solar, também denominada energia total incidente sobre a superfície terrestre, depende da latitude local e da posição no tempo (hora do dia e dia do ano).

Os níveis de radiação solar em um plano horizontal na superfície da Terra, conseqüentemente potencial de energia disponível, podem ser determinados apenas de forma aproximada, devido, principalmente, à inclinação de seu eixo de rotação em relação ao plano da órbita em torno do Sol.

De toda a radiação solar que chega às camadas superiores da atmosfera, apenas uma fração atinge a superfície terrestre, devido à reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera. Esta fração que atinge o solo é constituída por um componente direta (ou de feixe) e por uma componente difusa (CRESESB, 2005).

A medição da radiação solar, tanto a componente direta como a componente difusa na superfície terrestre, é importante para os estudos das influências das condições climáticas e atmosféricas. Com um histórico dessas medidas, pode-se viabilizar a instalações de sistemas térmicos e fotovoltaicos em uma determinada região garantindo o máximo aproveitamento ao longo do ano onde, as variações da intensidade da radiação solar sofrem significativas alterações.

3.2 Energia Solar

Quase todas as fontes de energia – hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e energia dos oceanos – são formas indiretas de energia solar. Além disso, a radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para

aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica ou elétrica. Pode ainda ser convertida diretamente em energia elétrica, através de efeitos sobre determinados materiais, entre os quais se destacam o termoelétrico e o fotovoltaico (ANEEL, 2002).

A conversão direta de energia solar em energia elétrica ocorre através de efeitos da radiação sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores. Uma forma de conversão bastante difundida é a que utiliza o efeito fotoelétrico, na qual os fótons contidos na luz solar são convertidos em energia elétrica, através do uso de células solares.

A geração de energia elétrica através da luz solar dar-se através do uso de captadores denominados células solares ou fotovoltaicas. As células fotovoltaicas são fabricadas, na sua grande maioria, usando o silício (Si) e podendo ser constituída de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo. Pela baixa tensão e corrente de saída em uma célula fotovoltaica, agrupam-se várias células formando um módulo ou painel (CRESESB, 2005).

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.

3.3 Configurações Básicas de Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos são classificados em três categorias principais: isolados, híbridos ou conectados a rede elétrica, os quais são utilizados de acordo com a aplicação e/ou disponibilidade de recursos energéticos.

Sistemas autônomos, não conectados à rede elétrica, podem ou não apresentar fontes de energia complementares à geração fotovoltaica. Quando a configuração não se restringe à geração fotovoltaica, temos os sistemas híbridos. Se o sistema é puramente fotovoltaico, então ele é chamado de sistema isolado (CRESESB, 1999).

A (Figura 3.1) mostra o esquema de um sistema fotovoltaico básico.

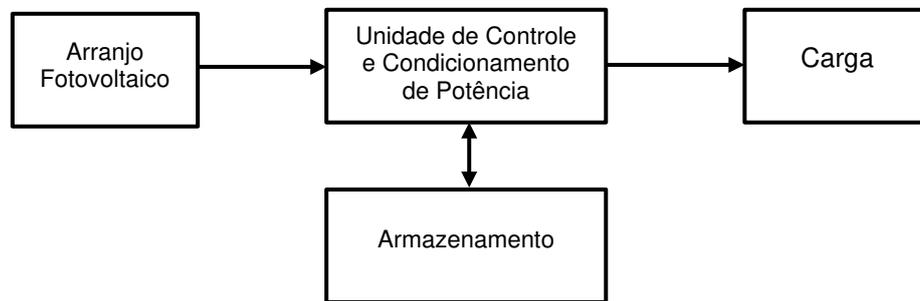


Figura 3.1 – Configuração Básica de Sistemas Fotovoltaicos

Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, o que é o caso do sistema de dessalinização em estudo, onde toda a água bombeada é diretamente enviada às membranas de osmose inversa.

Os sistemas isolados apresentam quatro configurações possíveis para o acoplamento com a carga, sendo estas mostradas na (Figura 3.2) e descritas a seguir.

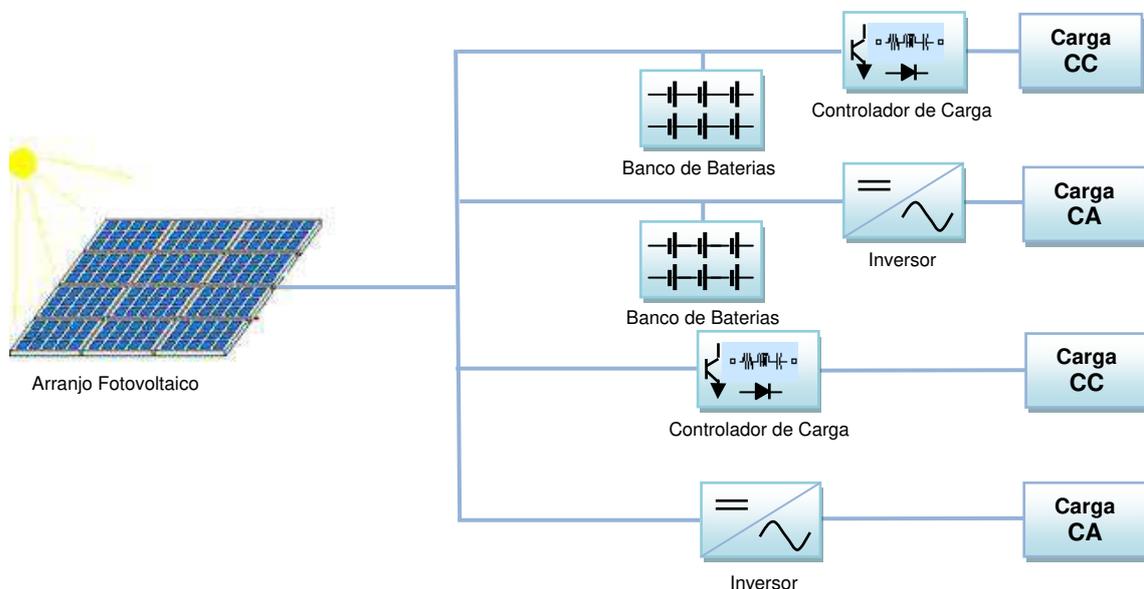


Figura 3.2 – Diagrama de Sistemas Fotovoltaicos em Função da Carga Utilizada

- **Carga CC com Armazenamento:** a energia elétrica é utilizada independente de haver ou não geração fotovoltaica simultânea fornecendo energia a equipamentos elétricos que operam em corrente contínua. É

comum o uso de controlador de carga de modo a proteger as baterias de danos por sobrecarga ou descarga profunda.

- Carga CC sem Armazenamento: a energia elétrica é utilizada no momento da geração por equipamentos que operam em corrente contínua. Para este caso utiliza-se um circuito de controle a fim de evitar eventuais sobrecargas ao sistema.
- Carga CA com Armazenamento: a energia elétrica é utilizada independente de haver geração fotovoltaica simultânea, sendo aplicada a equipamentos que operam em corrente alternada. Para isto, é necessária a utilização de um inversor entre os painéis e a carga, além de um seguidor de máxima potência que pode estar embutido no próprio inversor.
- Carga CA sem Armazenamento: a energia elétrica é utilizada no momento da geração por equipamentos que operam em corrente alternada sem o uso de baterias, necessitando, para tanto, a introdução de um inversor entre o arranjo fotovoltaico e o equipamento a ser utilizado a fim de converter a corrente contínua proveniente dos painéis em corrente alternada necessária a carga.

3.4 Componentes Básicos de Sistemas Fotovoltaicos

Os componentes básicos dos sistemas fotovoltaicos compreendem o agrupamento de módulos fotovoltaicos e os demais equipamentos relativamente convencionais destinados a transformação ou armazenamento da energia elétrica para que esta possa ser utilizada pela carga.

De acordo com a Figura 3.1 os sistemas fotovoltaicos são compostos por três elementos básicos: o arranjo de módulos fotovoltaicos, o subsistema de condicionamento de potência, o qual converte a saída do arranjo em potência útil, e as baterias, que armazenam a energia elétrica.

A célula solar que está localizada no módulo é o dispositivo mais importante de todo o sistema, sendo responsável pela conversão de energia solar em energia elétrica. Já o subsistema de condicionamento de potência compreende: controlador de carga, inversor, conversor e seguidor de máxima potência (CRESESB, 1999).

3.4.1 Módulo Fotovoltaico

O módulo fotovoltaico corresponde a unidade básica de todo o sistema, sendo composto por células conectadas em arranjos produzindo tensão e corrente suficientes para a utilização da energia.

Montado a partir de conjunto de células "wafer" de silício, texturizadas, laminadas e tratadas com materiais específicos que aumentam sua absorção e vida útil. Geram tensões e correntes que são condicionadas às ligações em paralelo ou em série, das células. A parte frontal dos módulos é revestida com resina ou vidro temperado de alta transparência com resistência a tempestade, neve, granizo, salinidade, umidade e poeira. Os painéis costumemente são fornecidos emoldurados em perfil de alumínio e contém terminais de conexão. A energia proveniente do painel é em corrente contínua e pode alimentar diretamente equipamentos que utilizam esta propriedade e carregar baterias.

Pelas características típicas das células: corrente máxima em torno de 3 Ampères e tensão em torno de 0,7 Volts, ou seja, baixa tensão e corrente de saída em uma célula fotovoltaica, agrupam-se várias células formando um módulo. O arranjo das células nos módulos pode ser feito conectando-as em série, em paralelo ou misto (CRESESB, 2005).

O módulo fotovoltaico é a menor unidade do ponto de vista comercial. Cada módulo mede cerca de 50 cm de largura e 1 metro de comprimento, como mostra a (Figura 3.3), produzindo de 12 a 15 Volts de tensão e potência de até 50 Watts, dependendo da insolação.

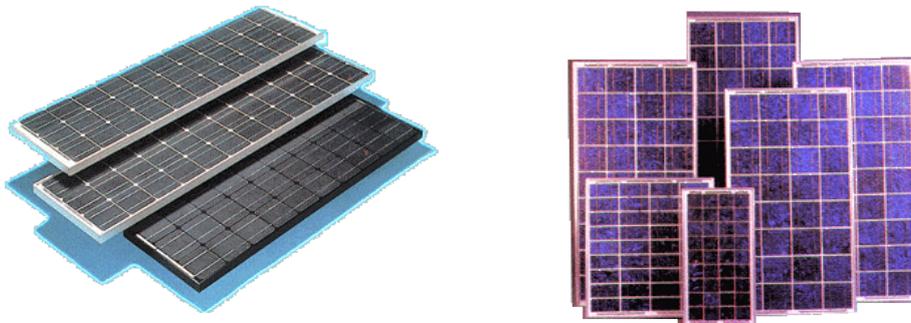


Figura 3.3 – Modelos de Módulos Fotovoltaicos

a) Célula Fotovoltaica

A conversão de energia solar em energia elétrica é obtida utilizando-se um material semicondutor como elemento transformador, conhecido como célula fotovoltaica ou célula solar.

As células fotovoltaicas são fabricadas, na sua grande maioria, usando o silício (Si) e podendo ser constituída de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo.

O comportamento elétrico da célula fotovoltaica pode ser descrito através de um circuito elétrico equivalente, composto de uma fonte de corrente (fotocorrente) e um diodo em paralelo conforme mostra a (Figura 3.4). Entretanto, em um modelo real a célula apresenta perdas. Algumas dessas perdas são representadas através de resistências inseridas no modelo elétrico da célula ideal (RIFFEL, 2005).

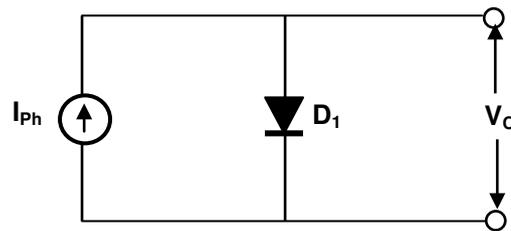


Figura 3.4 – Circuito Equivalente da Célula Solar (Modelo Ideal)

A (Figura 3.5) ilustra o modelo elétrico real da célula fotovoltaica, onde a resistência em série, R_S , descreve a queda de tensão devido as perdas ôhmicas do material semicondutor; e a resistência em paralelo, R_P , descreve as perdas que surgem principalmente devido a perturbações elétricas entre as partes da frente e de trás da célula, assim como devido a perturbações pontuais na zona de transição PN. Adicionalmente, um diodo D_2 pode ser ligado em paralelo para considerar as perdas de recombinação na camada de carga espacial.

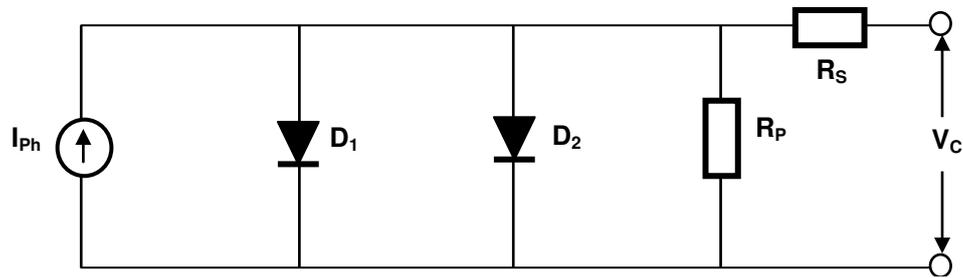


Figura 3.5 – Circuito Equivalente da Célula Solar (Modelo Real)

b) Características Elétricas dos Módulos

Os módulos fotovoltaicos normalmente operam em condições diferentes da condição padrão, tendo suas principais grandezas elétricas alteradas com variações da radiação e da temperatura. Sendo estas variações decorrentes de mudanças climáticas do ambiente.

A radiação solar incidente em uma célula fotovoltaica provoca o aparecimento de uma fotocorrente, I_{ph} , que é diretamente proporcional a essa radiação, conforme mostra a (Figura 3.6.a). Do mesmo modo se comporta a corrente de curto-circuito da célula, I_{CC} , se os efeitos da resistência R_S forem desprezados (RIFFEL, 2005).

A temperatura também provoca uma diminuição da banda de energia do material semiconductor, resultando em um acréscimo da fotocorrente gerada, I_{ph} , de aproximadamente 0,1%. Entretanto, a tensão de circuito aberto, V_{oc} , decresce a uma taxa de 0,3% por °C, resultando que a potência gerada diminui em 1% a cada 2,7K de elevação da temperatura (GOETZBERGER *et al.*, 1998), conforme ilustra a (Figura 3.6.b).

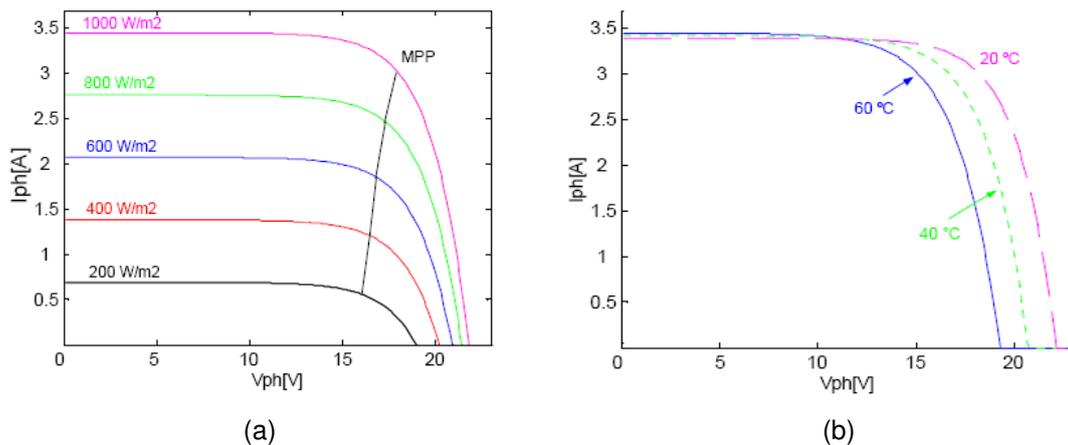


Figura 3.6 – Fatores que Influenciam a Curva Característica dos Módulos Fotovoltaicos

Fonte: (RIFFEL, 2005)

Os principais parâmetros de especificação de uma célula solar são:

- A corrente de curto-circuito, I_{CC} ;
- A tensão de circuito aberto, V_{OC} ;
- A tensão e corrente de máxima potência, respectivamente, V_{MP} e I_{MP} ;
- O fator de forma (FF);
- A eficiência (η).

O fator de forma é uma grandeza que expressa quanto a curva característica se aproxima de um retângulo no diagrama $I \times V$. Estando alguns desses parâmetros mostrados na (Figura 3.7).

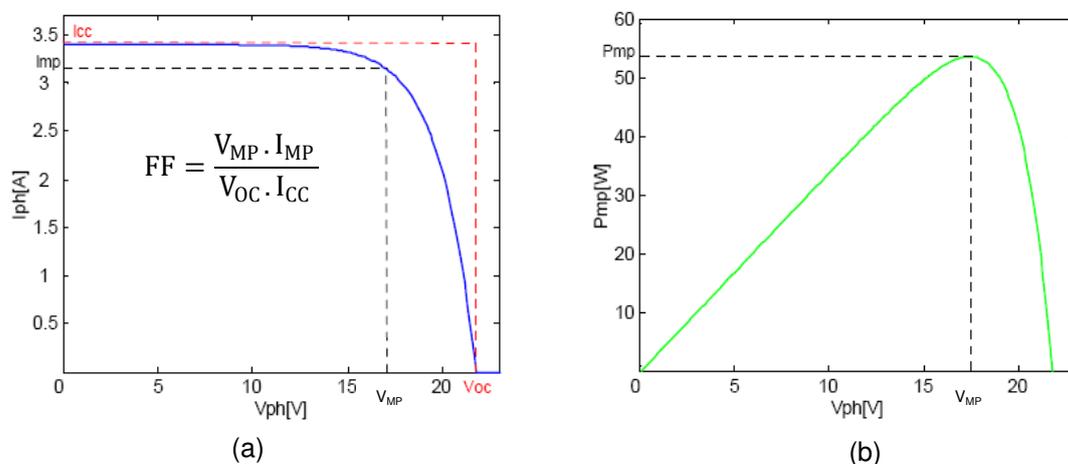


Figura 3.7 – Curva Característica $I \times V$, com Definição do FF, e a Curva de Potência do Módulo

Fonte: (RIFFEL, 2005)

c) Arranjo dos Módulos

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

A conexão em série dos dispositivos fotovoltaicos é feita mediante a ligação de um terminal positivo de um módulo ao terminal negativo de outro, e assim por diante. Conforme mostra a (Figura 3.8).

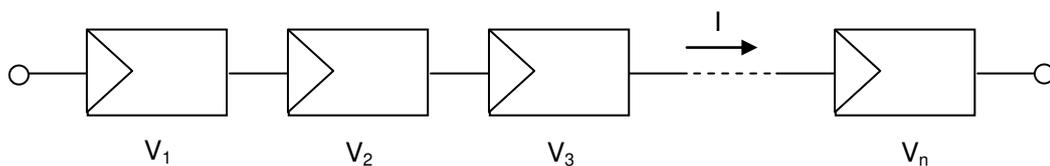


Figura 3.8 – Arranjo Série dos Módulos

No arranjo série (isto é idêntico para células, módulos e painéis) as tensões são adicionadas e a corrente é a mesma em todos módulos, ou seja:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n$$

$$I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n$$

Já a conexão em paralelo de dispositivos fotovoltaicos é feita mediante a ligação de terminais positivos unidos e terminais negativos também unidos. Conforme mostra a (Figura 3.9).

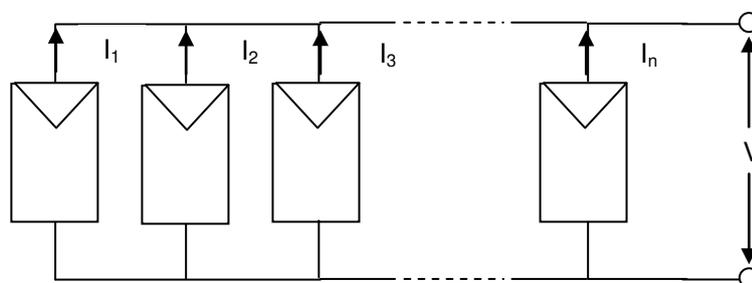


Figura 3.9 – Arranjo Paralelo dos Módulos

O arranjo em paralelo permite obter-se uma corrente resultante correspondente à soma de todos os valores de corrente de cada uma células individuais, sendo a tensão na carga a mesma de qualquer uma das células, ou seja:

$$V = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_n$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$$

Ao assumir-se as correntes e tensões individuais iguais para os arranjos série e paralelo, significa considerar-se módulos idênticos sob as mesmas condições de radiação e temperatura.

3.4.2 Baterias

As baterias, também denominadas de acumuladores de carga, são conhecidas por ser uma conveniente forma de armazenamento de energia.

A mais simples unidade de operação de uma bateria é a chamada célula eletroquímica. Dependendo do tipo de célula utilizada as baterias podem ser classificadas em recarregáveis e não-recarregáveis.

As células primárias compõem as baterias que podem ser utilizadas uma única vez (não-recarregáveis), as quais são geralmente empregadas como fontes de energia de baixa potência. Já as células secundárias compõem as baterias recarregáveis, ou seja, aquelas que podem ser carregadas com o auxílio de uma fonte de tensão ou de corrente e reutilizadas várias vezes, utilizadas na maioria das aplicações por longos períodos.

Nas instalações fotovoltaicas pode-se utilizar a energia captada pelos painéis diretamente, que é a forma de melhor aproveitamento desta energia, como é o caso do sistema em estudo. No entanto, é interessante observar que a potência fornecida à carga é variável de acordo com a hora do dia (potencial de insolação), nebulosidade, clima, etc.

A maioria dos sistemas fotovoltaicos tende a operar por vários dias ou semanas sem adequado recarregamento das baterias, em virtude da falta de energia solar, o que ocasiona a redução de sua vida útil.

Os fatores determinantes para a não utilização de baterias em sistemas de dessalinização são o elevado custo e a reduzida vida útil das baterias, além da necessidade de manutenção periódica, operação em ambientes de temperatura controlada, controle de sobrecargas e sobredescargas.

3.4.3 Controladores de Carga

A função principal dos controladores de carga é facilitar a máxima transferência de energia do arranjo fotovoltaico para a bateria e protegê-la contra cargas e descargas excessivas, aumentando, conseqüentemente, a sua vida útil.

Um controlador ideal para a aplicação fotovoltaica deve, além de satisfazer os seus objetivos básicos, gerenciar a carga de acordo com a disponibilidade de energia solar, necessitando para tal, possuir uma informação confiável do estado de carga da bateria em um dado instante. Espera-se, ainda, dos controladores boa estabilidade térmica e baixo consumo.

3.4.4 Inversores

Os inversores, também chamados de conversores, são elementos cuja finalidade é adaptar as características da corrente gerada à demanda total ou parcial do sistema.

Os inversores usam um mecanismo de chaveamento para alternar o fluxo de corrente entre as direções positiva e negativa. Transistores de potência, retificadores controlados de silício (SCRs) e, mais recentemente, os IGBTs (*Insulated Gats Bipolar Transistor*) são tipicamente usados como chaves semicondutoras.

Em determinadas aplicações que operam em corrente contínua, não é possível fazer coincidir as tensões proporcionadas pelo acumulador com a solicitada

por todos os elementos de consumo. Neste caso a melhor solução é a utilização de um conversor de tensão CC-CC.

Em outras aplicações, as quais incluem elementos que trabalham em corrente alternada, é necessário a presença de um inversor que transforme a corrente contínua, proveniente dos painéis, em corrente alternada.

Um inversor caracteriza-se, principalmente, pela tensão de entrada, que deve se adaptar a do gerador, a potência máxima que pode proporcionar e a eficiência. Esta última se define como a relação entre a potência elétrica entregue a carga (potência de saída) e a potência elétrica extraída do gerador (potência de entrada).

Para especificar um inversor, é necessário considerar tanto a tensão de entrada quanto a tensão de saída. Além disso, todas as exigências que a carga fará ao inversor devem ser observadas, não somente em relação à potência, mas também variações de tensão, frequência e forma de onda (CRESESB, 1999).

A eficiência do inversor varia em função da potência consumida pela carga. É necessário conhecer essa variação, sobretudo se a carga em corrente alternada é variável, a fim de que o ponto de operação do equipamento se ajuste o melhor possível a um valor médio especificado. Pode-se considerar a eficiência de 70% da carga como um parâmetro aceitável de eficiência do inversor. Porém, deve-se projetar um inversor visando alcançar eficiência superior a 90%.

É necessária uma eficiência elevada, pois, caso contrário, se terá que aumentar desnecessariamente o número de painéis para alimentar a carga.

Outros aspectos importantes que devem possuir os inversores são a adequada proteção contra curtos-circuitos e sobrecargas.

A escolha do inversor a ser utilizado deve ser feita considerando, obviamente, as características da carga de trabalho, a qual definirá a necessidade de equipamentos mais ou menos complexos.

3.5 Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos

O projeto de um sistema fotovoltaico é o “casamento” entre a energia fornecida pelo Sol ao sistema e a demanda de energia da carga. O critério para o dimensionamento pode ser: custo da energia gerada, confiabilidade, eficiência ou uma combinação destes fatores.

O dimensionamento de um sistema fotovoltaico deve considerar a robustez e facilidade de instalação e manutenção, tendo em vista que, na maioria dos casos, eles serão utilizados em locais remotos e inóspitos. Também devem ser consideradas as perdas relativas aos componentes (condutores, diodos de bloqueio, proteções, etc.).

Para o projeto de sistemas fotovoltaicos alguns fatores são de grande importância para a garantia de um dimensionamento eficiente, os quais destacam-se os dados meteorológicos e a estimativa da curva de carga, além dos componentes necessários à operação segura e confiável do sistema.

As principais etapas do projeto de um sistema fotovoltaico são:

- Avaliação do recurso solar;
- Estimativa da curva de carga;
- Escolha da configuração;
- Dimensionamento do sistema de armazenamento;
- Dimensionamento da geração fotovoltaica;
- Especificação dos demais componentes (controladores de carga e dispositivos de condicionamento de potência);
- Projeto elétrico.

3.5.1 Avaliação do Recurso Solar

Nesta fase do projeto busca-se quantificar a radiação global incidente sobre o painel fotovoltaico de forma a podermos calcular a energia gerada.

Os dados de radiação solar podem estar especificados em termos de fluxo de potência (valores instantâneos) ou energia (com diversos períodos de integração)

por unidade de área. A forma mais comum de apresentação dos dados de radiação é através de valores médios mensais para a energia acumulada ao longo de um dia.

Uma forma bastante conveniente de se expressar o valor acumulado de energia solar ao longo do dia é através do número de horas de sol pleno. Esta grandeza reflete o número de horas em que a radiação solar deve permanecer constante e igual a 1 kW/m^2 (1.000 W/m^2) de forma que a energia resultante seja equivalente à demanda acumulada para o dia e local em questão (CRESESB, 1999).

Os métodos de tratamento de dados utilizam modelos que tentam, com o máximo de fidelidade, estimar as grandezas cuja medição é mais complexa ou dispendiosa, ou aproveitar uma grande base dados disponíveis.

3.5.2 Estimativa da Curva de Carga

Para o dimensionamento do sistema de geração precisamos analisar a demanda de energia pela carga. O objetivo desta análise é construir, com a maior fidelidade possível, uma curva de carga, identificando as possíveis sazonalidades. O levantamento preciso da curva de carga pode implicar uma redução significativa do custo do sistema e prevenir contra efeitos de possíveis variações localizadas no comportamento da carga.

A forma mais comum de se especificar uma carga é através do seu consumo diário de energia. É comum utilizar-se o valor de consumo correspondente a dias em que a relação “consumo/disponibilidade de energia solar” é máxima. O consumo é expresso em Ampères-Hora (Ah), ou em casos de sistemas que dispõe de seguidores de máxima potência, é mais conveniente utilizar o Watts-Hora (Wh). (CRESESB, 2005).

Outro fator importante na avaliação da carga é a determinação dos valores extremos de consumo (mínimo e máximo), para que os componentes possam ser dimensionados segundo as condições críticas de operação. Tensão nominal e características adicionais sobre os equipamentos (CA ou CC, eficiências, etc.) completam a especificação da carga.

3.5.3 Escolha da Configuração

Esta etapa compreende a definição da configuração do sistema de geração fotovoltaica, os quais baseiam-se nas características da carga e na disponibilidade de recursos energéticos; sendo definidas como: sistemas autônomos ou interconectados à rede elétrica, CA ou CC, com ou sem armazenamento, etc.

3.5.4 Dimensionamento do Sistema de Armazenamento

Baterias são, na atualidade, o meio mais difundido de armazenamento de energia elétrica. O processo de dimensionamento de um banco de baterias é iterativo. O projetista oscila entre a escolha do modelo (tecnologia, capacidade, etc.) e o cálculo do número de unidades necessárias para um dado sistema, considerando aspectos como vida útil, confiabilidade e custo.

Os parâmetros mais importantes para o dimensionamento do banco de baterias são a eficiência, a máxima profundidade de descarga (para ciclos diários e ciclos esporádicos) e a autonomia do sistema.

3.5.5 Dimensionamento da Geração Fotovoltaica

De posse dos dados meteorológicos de relevância e da expectativa de demanda de energia para o sistema, pode-se estabelecer o dimensionamento dos painéis fotovoltaicos. Assim como para as baterias, nesta etapa temos um processo iterativo, onde o projetista oscila entre a escolha do modelo e o cálculo do número de unidades necessárias para o sistema (CRESESB, 2005).

A escolha do tipo e do número de módulos fotovoltaicos a serem utilizados depende de uma série de fatores, dentre eles:

- Tensão nominal do sistema;
- Curva característica $I \times V$ do módulo;
- Custo da área disponível para instalação;

- Degradação da performance em função da temperatura ambiente e tempo de vida módulos;
- Custo e expectativa de vida para o módulo.

Os parâmetros mais importantes para o dimensionamento são:

- Consumo calculado para a carga;
- Radiação solar global no plano do módulo;
- Eficiência do banco de baterias;
- Perdas causadas por componentes adicionais;
- Valores típicos de corrente que corresponde ao ponto de máxima potência;
- Tensão de operação.

3.5.6 Especificação dos Demais Componentes Básicos

Esta etapa compreende a especificação de controladores de carga e dispositivos de condicionamento de potência (inversores ou conversores). Estes componentes, que integram-se ao sistema em função da aplicação e/ou configuração, precisam de uma correta especificação para uma boa operação.

Componentes especificados corretamente e apenas com as funções realmente necessárias reduzem a complexidade e o custo e aumentam a confiabilidade do sistema.

Controladores de Carga: o valor máximo de corrente e a tensão de operação são os parâmetros mínimos para a especificação.

Inversores e Conversores: os parâmetros básicos são a tensão de entrada, a potência nominal e as características de saída.

3.5.7 Projeto Elétrico

Para o projeto elétrico os fatores mais importantes são:

- Interconexão dos diversos componentes do sistema de forma eficiente, evitando perdas de energia;
- Obtenção de um projeto seguro, sob o ponto de vista elétrico, considerando a segurança do sistema e do usuário;
- Verificação da obediência aos códigos locais para instalações elétricas.

Estes aspectos incluem desde a escolha dos condutores até o dimensionamento/especificação de dispositivos de proteção.

3.6 Energia Solar para Sistemas de Dessalinização

Embora a osmose inversa e as células fotovoltaicas sejam cada vez mais usadas em todo o mundo, sua combinação é recente (CARVALHO, 2000).

A energia solar para a 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 *et al.*, 2002).

Para ser econômico, um sistema de dessalinização usando energia solar fotovoltaica requer um projeto do sistema perfeitamente eficiente em termos de consumo de energia, tendo em vista os custos relativamente altos dos painéis fotovoltaicos (SOARES, 2008).

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). No entanto, estes simuladores consideram o fornecimento de energia através de fontes convencionais.

O primeiro sistema, desenvolvido pelo 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 4,6 mg/L a 10.000 mg/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.

Foram 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 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 1.000mg/L a 4.000mg/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, apresentando um consumo de energia de 1,5 kWh/m³.

Oliveira, 2007 desenvolveu um sistema de maior capacidade, fazendo uso de um gerador fotovoltaico com a utilização de um circuito eletrônico de controle e sem 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.

Soares, 2008 deu continuidade ao trabalho iniciado por (OLIVEIRA, 2007) com algumas modificações, como: aumento no 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, visando um estudo do consumo energético e custos. O sistema mostrou-se capaz de subsidiar água permeada para 41 famílias a um custo de 6,78 reais/m³.

Sistemas alimentados por uma fonte de energia convencional têm seus componentes dimensionados considerando o ponto de operação que corresponde ao regime permanente, ou seja, sem variação de potência. Quando o sistema passa a ser alimentado por energia fotovoltaica, que se trata de uma fonte não-convencional, este passa a operar em pontos diferentes do previsto em seu dimensionamento. Em virtude disto, se faz necessário rever a metodologia de projeto levando em conta a variação da energia disponível.

A fim de aperfeiçoar a pesquisa na área de dessalinização e energia fotovoltaica propomos desenvolver a modelagem dos sistemas de dessalinização visando estudar dois componentes críticos desses sistemas: as bombas de alta pressão, combinadas com o motor elétrico; e a disponibilidade de energia solar fotovoltaica gerada pelos painéis, os quais oferecem ao sistema uma variação nesta disponibilidade de energia (potência variável).

Para tanto, é proposta uma metodologia de estudo a partir da qual pretendemos realizar o estudo de um sistema de dessalinização via osmose inversa, e a partir de sua caracterização propor um arranjo fotovoltaico adequado considerando a demanda de energia do sistema e o potencial solar disponível.

Como resultado espera-se mostrar que é possível a utilização de sistemas de geração fotovoltaica sem baterias para o acionamento de sistemas de dessalinização obtendo produções compatíveis com sistemas idênticos acionados por energia convencional.

4. METODOLOGIA

Este capítulo trata da descrição dos materiais e métodos aplicados ao desenvolvimento da parte experimental desta pesquisa.

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES) em conjunto com o Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM), ambos da Universidade Federal de Campina Grande.

Foi desenvolvida uma metodologia para dimensionamento de um sistema de dessalinização via osmose inversa, acionado por painéis fotovoltaicos com disponibilidade de potência variável. Para tanto o trabalho foi realizado em duas etapas:

- Estudo da oferta de radiação solar visando uma adequação a demanda de energia do sistema;
- Caracterização do sistema:
 - Determinação da perda de carga do sistema;
 - Análise do balanço de energia do sistema submetido a diferentes velocidades e diferentes ajustes da válvula de controle, visando a sua caracterização;
 - Verificação do desempenho do sistema submetido a diferentes níveis de energia.

4.1. Metodologia Proposta

O fluxograma ilustrado na Figura 4.1 mostra as etapas realizadas durante o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

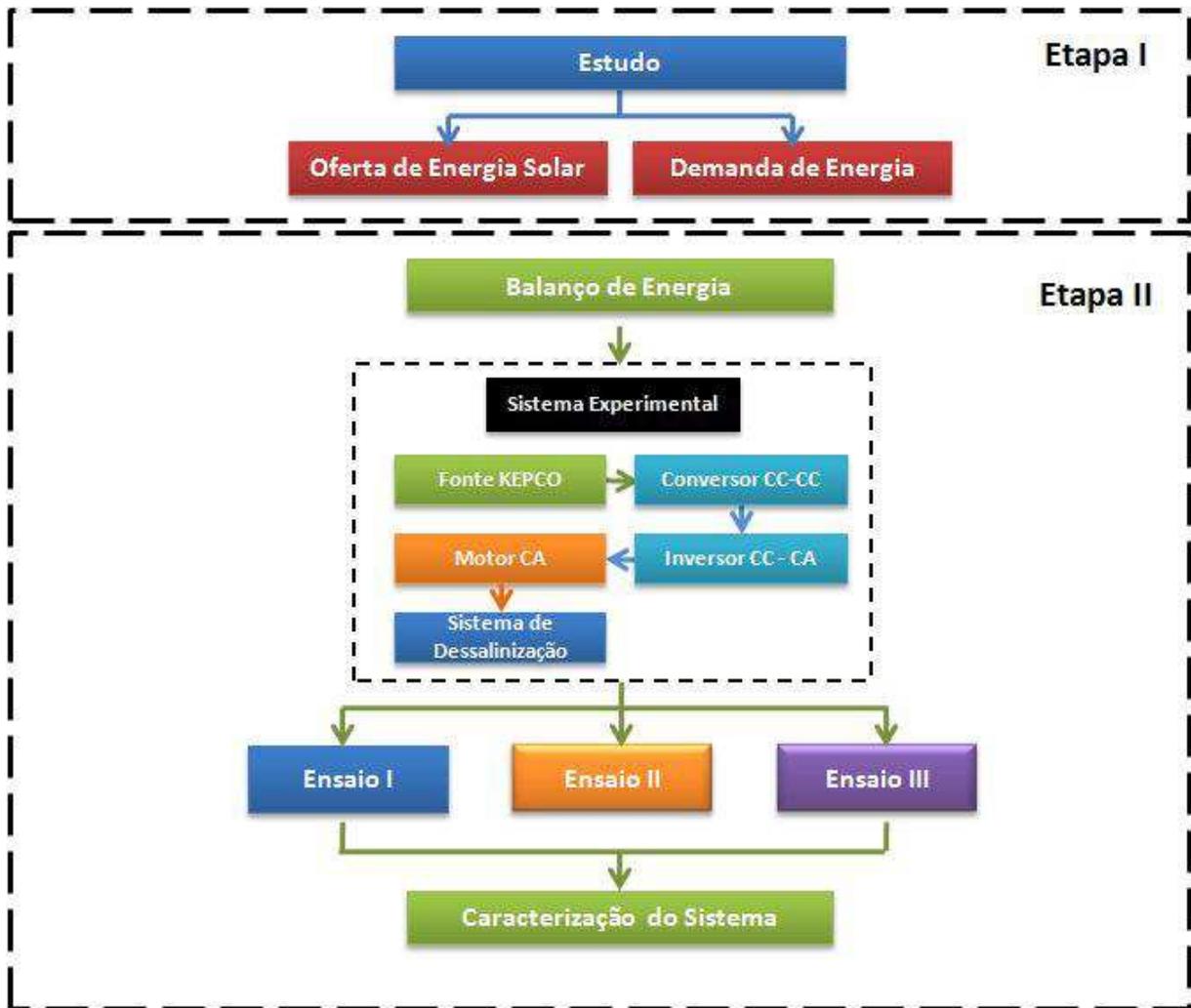


Figura 4.1 – Fluxograma de Execução de Atividades

4.1.1. Etapa I

Os dados referentes ao potencial de energia solar utilizados nesta pesquisa foram disponibilizados pelo Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e definem o perfil de irradiação solar da região de Campina Grande – PB.

Para o acionamento de sistemas de dessalinização sem baterias a incidência de irradiação solar influencia diretamente na energia entregue a carga e, conseqüentemente, na quantidade de água potável (permeado) produzida, por isso a necessidade do estudo dessa oferta de energia.

O número de horas durante as quais o sistema opera depende de dois fatores:

- Características do sistema: potência mínima para o acionamento do sistema motor-bomba e número de módulos fotovoltaicos presentes no arranjo.
- Radiação incidente: característica local que varia com o tempo.

O estudo da oferta de energia solar foi realizado mediante análise estatística dos níveis de radiação, o qual permitiu identificar as faixas de radiação solar que apresentam períodos contínuos máximos e, dessa forma, projetar o arranjo fotovoltaico considerando não só a demanda de energia do sistema, mas a disponibilidade da energia solar.

Os dados de irradiação solar utilizados nesta pesquisa são do período de Janeiro/2007 à Dezembro/2008 para a região de Campina Grande – PB. Os resultados foram apresentados graficamente através de curvas do perfil de irradiação solar diário e mensal, além de tabelas e gráficos do percentual de radiação solar mensal.

A demanda de energia do sistema foi considerada inicialmente de acordo com as especificações do sistema motor-bomba, dados estes especificados pelo fabricante e considerando a operação em regime permanente.

Na etapa posterior (etapa II) foi possível uma caracterização mais precisa do sistema de dessalinização considerando a operação com disponibilidade de potência variável, o qual caracteriza o funcionamento de sistemas acionados por energia fotovoltaica sem baterias.

4.1.2. Etapa II

Esta etapa permitiu a caracterização do sistema de dessalinização, mediante análise do funcionamento em três situações distintas:

- Ensaio I: Operação do sistema sem carga, ou seja, com a válvula de controle completamente aberta a fim de determinar a perda de carga do sistema.
- Ensaio II: Operação do sistema em diferentes velocidades e diferentes ajustes da válvula de saída (pressão do concentrado) do sistema. Ou seja, o sistema foi submetido a diferentes pressões de operação e diferentes valores de potência de alimentação, visando a determinação das curvas características $P \times Q_P$ (Pressão x Vazão do Permeado) e $P_{ot} \times Q_P$ (Potência x Vazão do Permeado) do sistema.
- Ensaio III: Operação do sistema com válvula de saída em uma posição fixa, variando-se apenas a potência de entrada do sistema, a fim de verificar o comportamento do sistema mediante variações da oferta de energia.

4.2. Sistema Experimental

A Figura 4.2 ilustra o modelo básico do sistema de dessalinização via osmose inversa utilizado nesta pesquisa, o qual é constituído basicamente de um reservatório de água de alimentação, um filtro, um conjunto motor-bomba, duas membranas de osmose inversa, além de válvulas e manômetros para controle e monitoramento do sistema.

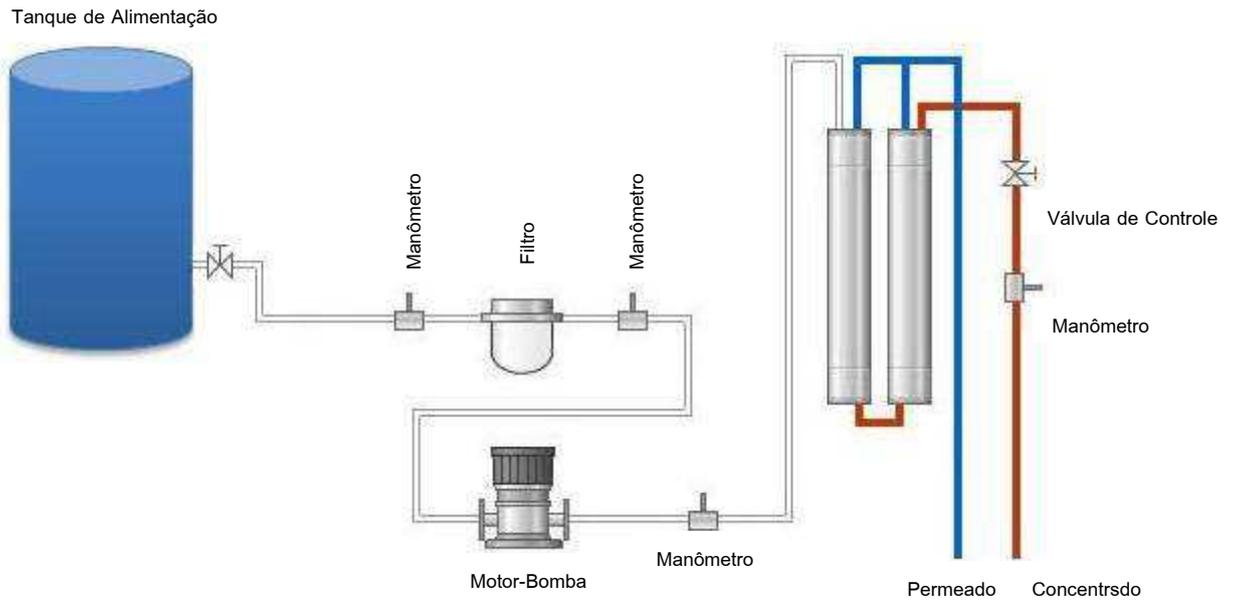


Figura 4.2 – Sistema Experimental de Dessalinização

A topologia utilizada para o bombeamento da água no sistema de dessalinização é apresentada na Figura 4.3, a qual é responsável pelo acionamento do sistema motor-bomba.

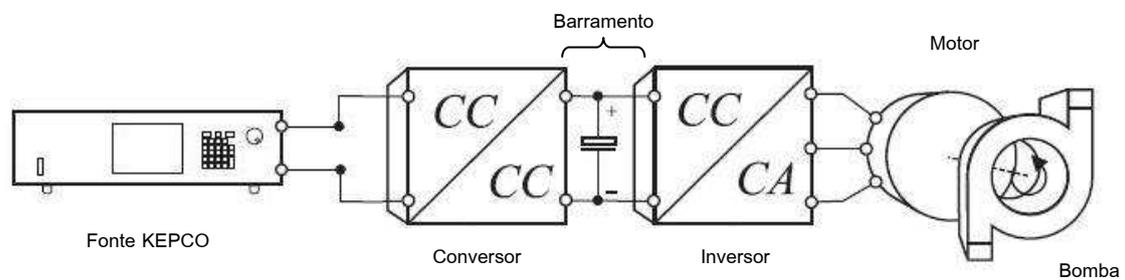


Figura 4.3 – Topologia do Sistema de Acionamento

Fonte: (VITORINO, 2008)

4.2.1. Sistema de Dessalinização Via Osmose Inversa

4.2.1.1. Filtro

Este componente é localizado entre o tanque de alimentação e a bomba de alta pressão, sua função é reter partículas acima de uma certa granulometria, caso

contrário, estas partículas indesejadas poderiam comprometer o funcionamento tanto da bomba de alta pressão quanto das membranas dessalinizadoras.

No caso de saturação do filtro, a diferença de pressão medida pelos manômetros dispostos na entrada e saída do mesmo sinaliza a necessidade de limpeza do elemento filtrante.

4.2.1.2. Motor

Para o acionamento da bomba foi utilizado um motor *WEG*, modelo W21, trifásico de indução, de 1 HP, cujas características são descritas na (Tabela 4.1). Este motor é acoplado a uma bomba de alta pressão, os quais alimentam o sistema de osmose inversa.

Tabela 4.1 – Especificações do Motor CA *WEG*

Motor <i>WEG</i> W21	
Potência	1,0 HP
Tensão	220/380 V
Corrente	3,02/1,75 A
RPM	1.720
Conjugado (Torque)	4,17 Nm
Pólos	4
Frequência	60 Hz

A utilização do motor CA, no sistema necessita da adição de um inversor CC-CA entre o sistema de geração de energia fotovoltaica (fonte KEPCO) e o sistema de dessalinização, a fim de converter a corrente contínua proveniente da fonte em corrente alternada necessária a carga.

4.2.1.3. Bomba

Para a alimentação do sistema foi utilizada uma bomba de alta-pressão da marca *PROCON* Série 5, cujas características estão descritas na (Tabela 4.2). Esta bomba permite a alimentação da água salinizada sob pressão ao sistema de osmose inversa.

A bomba de alta pressão operará na faixa de pressão (de 10 à 15 kgf/cm²), a qual é suficiente para estudar soluções de cloreto de sódio de concentrações de (1.000 a 3.000) mg/L.

O conjunto motor-bomba tem o papel de produzir pressão superior à pressão osmótica do meio para que ocorra a osmose inversa nos elementos de membranas.

Tabela 4.2 – Especificações da Bomba *PROCON* (Série 5)

PROCON de Alta Pressão – Série 5	
Material	Aço Inoxidável
Capacidade	115 a 330 ghp
Velocidade Nominal	1.725 rpm
Pressão Máxima	250 psi
Rotação	Sentido Horário (Deslocamento Positivo)
Peso Seco	4.1 lbs
Auto-Aspirante	6,0 ft (Máxima Elevação)

O subsistema hidráulico é constituído por um conjunto motor-bomba de 1 HP conectado a 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 21 kgf/cm² e 1 a 4 kgf/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.

4.2.1.4. Membranas

O sistema de dessalinização via osmose inversa em estudo é constituído por dois elementos de membranas de osmose inversa do tipo BW30LE-4040 (composto de poliamida), da *FILMTEC Membranes*, cujas características específicas são descritas na (Tabela 4.3). Estas membranas são inseridas em vasos de alta pressão ou permeador (pressão máxima de operação de 42 kgf/cm²) e estão associadas em série visando recuperar uma maior quantidade de água.

Tabela 4.3 – Especificações da Membrana de Osmose Inversa

Membrana FILMTEC BW30LE-4040	
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
Tempo de Vida	5 anos

As membranas são elementos resistentes a altas pressões e oferecem condições durante o processo de extrair os sais dissolvidos na água de alimentação, atuando como uma barreira à estes sais. As membranas se caracterizam como o elemento principal no processo de OI.

4.2.2. Sistema de Geração de Energia

A energia elétrica utilizada para o funcionamento do sistema de dessalinização é proveniente de uma fonte de tensão de 1kW, a qual emula o

comportamento do gerador fotovoltaico. A fonte utilizada é uma KEPCO BOP 50-20MG. O controle desta fonte é feito através da porta de comunicação serial RS232 usando um protocolo SCPI (*Standard Commands for Programmable Instruments*).

Além do sistema de geração de energia, será utilizado um conversor CC-CC para realizar a elevação da tensão e assegurar que os painéis operem no ponto de máxima potência, e um inversor CC-CA, o qual é responsável pela conversão da corrente contínua, proveniente da fonte, em corrente alternada necessária ao motor CA.

4.2.3. Sistema de Aquisição de Dados

Para a aquisição dos dados experimentais do sistema de geração de energia e do sistema de dessalinização será utilizado o Data Acquisition/Switch (Agilent 34979A), o qual coleta os dados através de sensores digitais.

Os sensores utilizados neste sistema de aquisição de dados são:

- Manômetro Digital: responsável pelo monitoramento da pressão de saída do permeado;
- Sensores de Vazão: responsáveis pelo monitoramento das vazões do permeado e do concentrado;
- Sensores de Voltagem: responsáveis pelo monitoramento dos sinais elétricos do sistema (tensão e corrente do motor).

Após coletados, estes dados são enviados a um computador embargado, o qual os armazena em diferentes formatos permitindo, desta forma, a análise dos resultados obtidos.

4.3. Procedimento Experimental

O sistema de dessalinização foi avaliado utilizando como água de alimentação uma solução de cloreto de sódio P.A..

O processo de dessalinização foi efetuado de forma contínua para um dado volume de água sintética. Os ensaios foram realizados com solução de cloreto de sódio de concentração 2.000 mg/L. Durante o processo foram tomadas amostras na saída das correntes do concentrado e do permeado, a fim de se determinar a condutividade elétrica e o potencial hidrogeniônico (pH).

A capacidade de produção do permeado e do concentrado foi obtida por meio de dois rotômetros analógicos dispostos no sistema, além da leitura obtida através dos sensores de vazão presentes no sistema de aquisição de dados.

O sistema de aquisição de dados forneceu, ainda, valores de pressão na alimentação e na saída do sistema e níveis de tensão e corrente no motor através dos sensores de pressão e de voltagem, respectivamente.

A amostragem de dados no sistema de aquisição é realizada na faixa de 25 a 50 segundos, sendo estes dados armazenados em um computador e posteriormente utilizados na determinação dos fatores necessários à avaliação do sistema, tais como:

- Recuperação;
- Vazão do Concentrado;
- Vazão do Permeado;
- Potência Consumida;
- Pressão de Trabalho.

Para o Ensaio I a operação do sistema foi realizada com a válvula de controle completamente aberta, a fim de se determinar sua perda de carga. Este ensaio permite quantificar a energia gasta pelo sistema apenas para fazer circular uma corrente de alimentação sem, de fato, produção de permeado, ou seja, quantifica a potência não útil do sistema. Sendo possível definir as perdas inerentes ao sistema, provenientes da resistência a passagem do fluxo de alimentação, resistência devido as conexões hidráulicas, ao filtro, as perdas em geral.

Para o Ensaio II o sistema foi operado fixando a potência de entrada e variando-se a pressão de operação do sistema; sendo este procedimento repetido para as potências de 300, 400, 500, 600 e 700 W e pressões variando de 5 à 14

kgf/cm² em cada uma das potências pré-estabelecidas. Neste ensaio foram avaliados o fluxo de permeado e de concentrado, a recuperação do sistema, bem como a qualidade do permeado produzido.

Para o Ensaio III temos uma operação do sistema fixando a posição da válvula de controle e variando-se a potência de alimentação do sistema. Neste ensaio foi verificado o efeito da potência entregue ao sistema na pressão de operação, na produção de permeado e concentrado, na recuperação e na qualidade da água produzida.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos neste trabalho de pesquisa, os quais foram distribuídos em duas etapas distintas:

- Estudo da oferta de irradiação solar;
- Caracterização do sistema de dessalinização.

5.1 Estudo da Oferta de Irradiação Solar

Nas Figuras 5.1 e 5.2 estão ilustrados o perfil de irradiação solar do mês de Janeiro/2007 e Janeiro/2008, respectivamente.

Observa-se que a distribuição de irradiação solar concentra-se entre os minutos 320 (5h20min.) e 1.070 (17h50min), o que corresponde a praticamente 12 horas diárias de irradiação. Através desses gráficos também é possível observar que os maiores níveis de radiação, para meses quentes como é o caso de Janeiro, ocorrem em torno do minuto 720 (12h) e atingem níveis de radiação próximos a 1.300 W/m^2 .

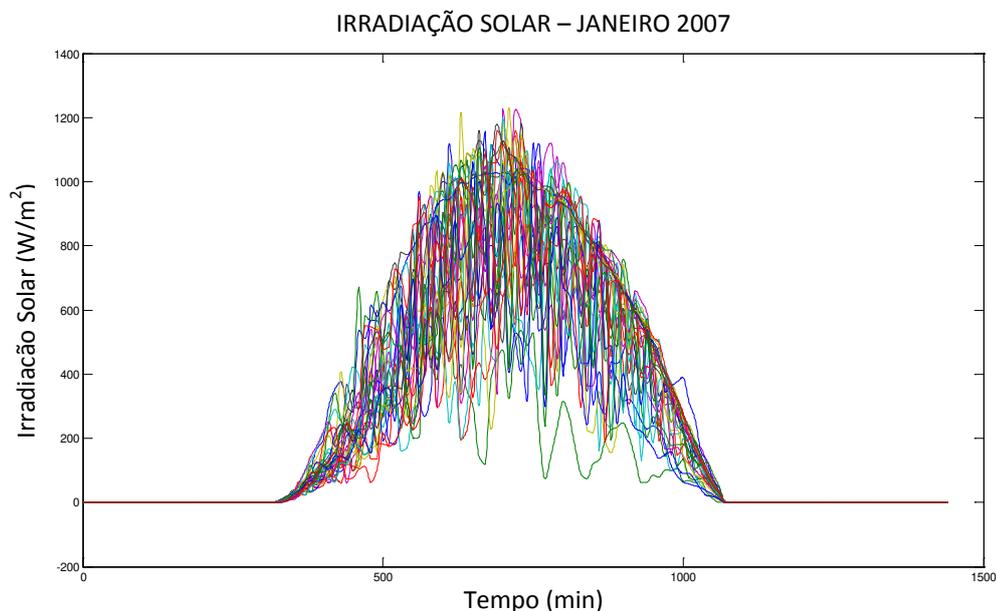


Figura 5.1: Perfil de irradiação diária para Janeiro/2007

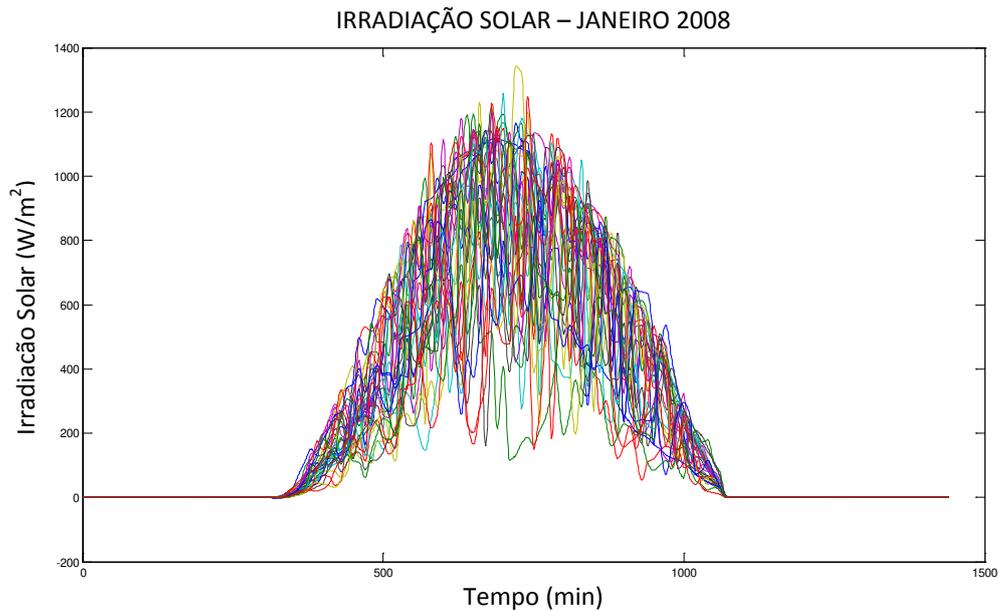
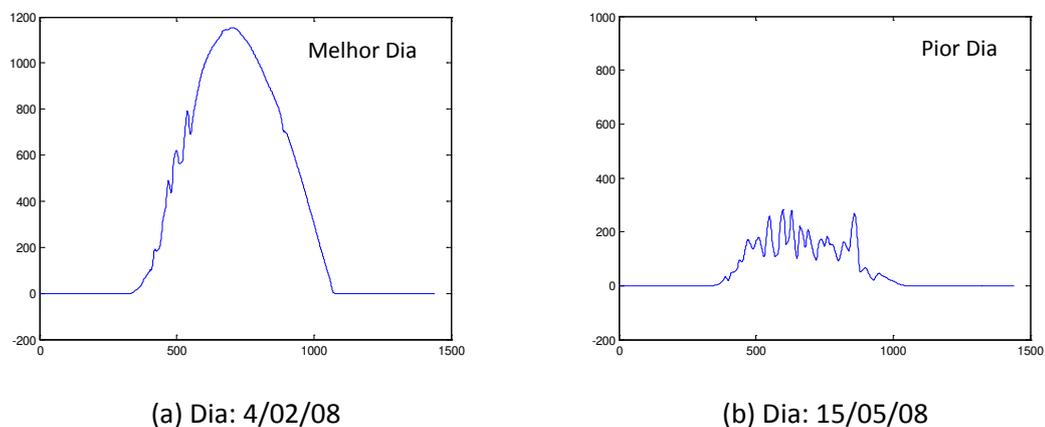


Figura 5.2: Perfil de irradiação diária para Janeiro/2008

Nas Figuras 5.3(a) e 5.3(b) tem-se as curvas tempo (min.) versus irradiação solar (W/m^2) para o melhor e o pior dia do conjunto de dados analisados. O melhor dia ocorreu em Fevereiro/2008 e o pior em Maio/2008.



(a) Dia: 4/02/08

(b) Dia: 15/05/08

Figura 5.3: Curvas tempo (min) versus irradiação solar diária (W/m^2)

A Figura 5.3(a) mostra um perfil de insolação bastante regular, o qual permite uma distribuição de energia solar desejável e ocasiona uma operação bastante eficiente de sistemas, especialmente aqueles que não se utilizam de acumuladores de cargas (baterias), como é o caso do sistema de dessalinização utilizado nesta pesquisa.

Já a Figura 5.3(b) apresenta um perfil de irradiação bastante irregular e de baixa disponibilidade de energia solar, o qual atinge um máximo de 250 W/m^2 em intervalos bastante curtos. Para estas situações é possível garantir que o sistema de dessalinização em questão não funcionaria, tendo em vista que a oferta de energia estaria bem abaixo das especificações do sistema.

É necessário observar que em dias que apresentam baixos níveis de irradiação solar, como é o caso do dia representado pela Figura 5.3(b), não é aconselhável a operação do sistema considerando que o mesmo não produziria qualquer quantidade de produto desejável e estaria consumindo energia sem, no entanto, gerar produto.

Estes dados são bastante relevantes para o projeto do arranjo fotovoltaico, onde são realizados cálculos considerando tais situações.

Para um estudo mais detalhado desta disponibilidade de energia foram utilizados níveis médios de irradiação solar que variam de 100 a 1.300 W/m^2 em intervalos regulares de 100 W/m^2 e então definido o percentual de horas diárias em que a irradiação solar esteve dentro destes intervalos. A partir da figura 5.6 é possível observar a distribuição percentual da radiação solar para os anos de 2007 e 2008.

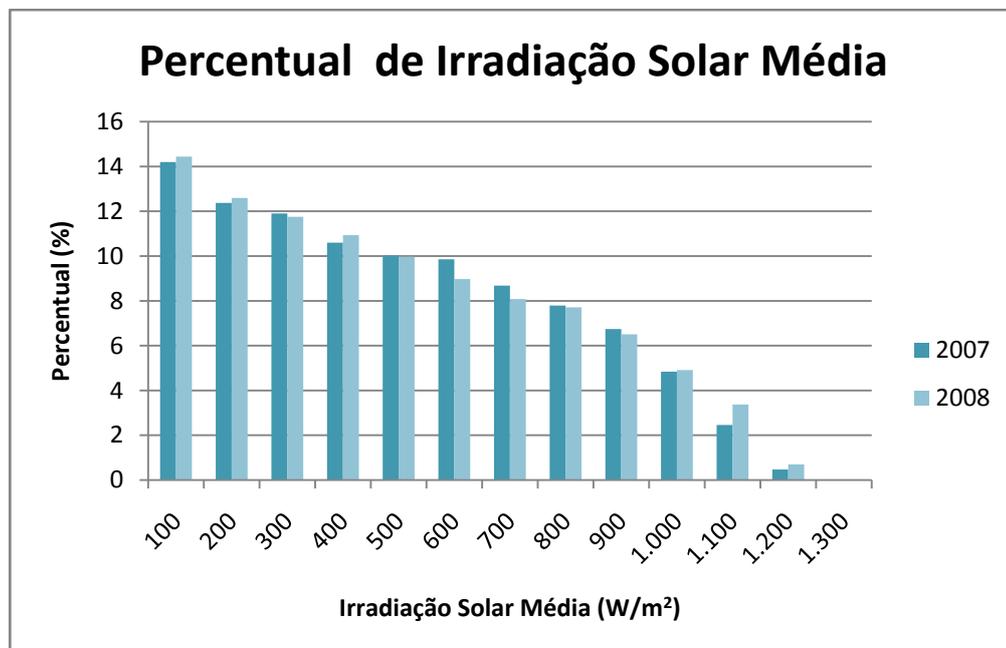


Figura 5.4: Percentual da irradiação solar média para os anos 2007 e 2008

A Figura 5.4 mostra que o percentual de irradiação solar diminui com o aumento dos níveis médios de irradiação, ou seja, os níveis mais baixos de irradiação ocorrem por períodos mais longos o que evidencia um comportamento linear decrescente da curva de distribuição de energia média diária. No entanto, fazendo-se a soma cumulativa destes percentuais é possível verificar que a distribuição de energia para as faixas de irradiação solar entre 300 e 800 W/m² representam mais de 50% da irradiação total diária. Este é um dado bastante relevante para a utilização no sistema de dessalinização em estudo tendo em vista que esta quantidade de energia é suficiente para acionar um sistema de dessalinização de capacidade de produção de 500 m³/h. Essa afirmação em termos de oferta de energia pode ser observada com mais detalhes, na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Percentual de energia solar entre (300 – 800 W/m²) para os anos de 2007 e 2008.

Mês	Percentual de Energia Solar Entre [300 – 800] W/m ² (%)	
	Ano 2007	Ano 2008
Janeiro	56,17	53,25
Fevereiro	55,54	52,71
Março	58,04	52,91
Abril	57,39	61,60
Maio	61,74	62,40
Junho	57,21	60,60
Julho	65,72	60,46
Agosto	61,66	58,51
Setembro	61,85	60,48
Outubro	58,86	57,15
Novembro	54,10	54,41
Dezembro	58,33	55,63
Total	58,85	57,41

A Tabela 5.1 mostra que a soma dos percentuais de oferta de energia solar entre 300 e 800 W/m² para todos os meses dos anos 2007 e 2008 foram maiores que 50%, tendo o mínimo de disponibilidade em Fevereiro/2008 (52,71%) e o

máximo em Julho/2007 (65,72%). Estes valores evidenciam o comportamento gráfico mostrado na Figura 5.4, mostrando ainda que a disponibilidade de energia solar total para os anos avaliados também apresentam percentuais acima de 50%.

Para sistemas que operam na faixa de 0,4 a 1,0 HP, como é o caso do sistema de dessalinização estudo, essa disponibilidade de energia solar é bastante relevante para o acionamento a partir de energia fotovoltaica.

5.2 Caracterização do Sistema de Dessalinização

5.2.1 Ensaio I

Este ensaio permitiu determinar quanto de energia o sistema utiliza apenas para fazer circular água de alimentação, sem que haja produção de permeado. Estes resultados indicam a “perda” de potência do sistema, devido ao filtro, ao coeficiente de atrito do sistema hidráulico, à resistência da membrana de osmose inversa e ao próprio rendimento do sistema motor-bomba, conversor e o inversor.

A Tabela 5.2 apresenta a quantidade de potência consumida pelo sistema para a circulação do fluxo de alimentação que é inteiramente convertido em corrente de concentrado.

Tabela 5.2: Água na corrente do concentrado sem permeação.

Potência (W)	Qc (L/h)
150	780
160	840
170	900
180	960
190	1020
200	1080
210	1140
220	1200
230	1212
240	1260
250	1284
260	1320

Estes resultados permitem quantificar a potência não útil consumida pelo sistema, tendo em vista que o mesmo opera sem a existência de um gradiente de pressão na superfície da membrana de OI e conseqüentemente sem produzir permeado.

É interessante observar que o termo “potência não útil” refere-se ao processo de dessalinização em si, haja vista que não há obtenção de água dessalinizada, no entanto, o consumo de potência elétrica ocorre a fim de acionar o sistema e fazer circular a água de alimentação.

Temos um consumo de energia de até 260 W sem qualquer produção de permeado e com um fluxo de alimentação de 1.320 L/h convertido completamente em concentrado. Para estas situações o sistema entra em funcionamento sem gerar o produto do processo de dessalinização, mas é possível estimar a partir desses dados, a quantidade de energia mínima que deve ser fornecida ao sistema para que o mesmo opere sob pressão e garanta a produção de permeado.

Diante dos resultados obtidos neste ensaio é possível verificar que para o fornecimento de potência abaixo de 300 W o sistema de dessalinização em questão opera de forma ineficiente, sem que haja produção de permeado e consumindo energia apenas para garantir a circulação de água de alimentação.

5.2.2 Ensaio II

Para este ensaio foi utilizada como água de alimentação uma solução de cloreto de sódio de 2.000 mg/L e pH 6,7, sendo avaliados os comportamentos da vazão do permeado e da recuperação do sistema, além condutividade elétrica do permeado em função da variação da pressão de operação.

A Figura 5.5 apresenta o comportamento da vazão do permeado em função da pressão, para as seguintes potências de entrada: 300 W, 400 W, 500 W, 600 W e 700 W.

A partir deste gráfico é possível verificar que a vazão do permeado aumenta com o aumento da pressão, no entanto, sofre pouca influência da potência de entrada.

Para uma mesma pressão a vazão do permeado permaneceu praticamente constante, independente da potência de entrada. Este comportamento pode ser

verificado para pressões entre $7,0 \text{ kgf/cm}^2$ e $10,0 \text{ kgf/cm}^2$, onde a vazão do permeado foi a mesma, independente da potência de entrada. No entanto, para potências de entrada mais elevadas o sistema consegue operar a níveis de pressão mais elevados e, portanto, produzir uma maior quantidade de permeado.

A maior produção de permeado foi obtida na pressão de $14,5 \text{ kgf/cm}^2$, com potência de entrada 700 W , sendo esta vazão de 282 L/h .

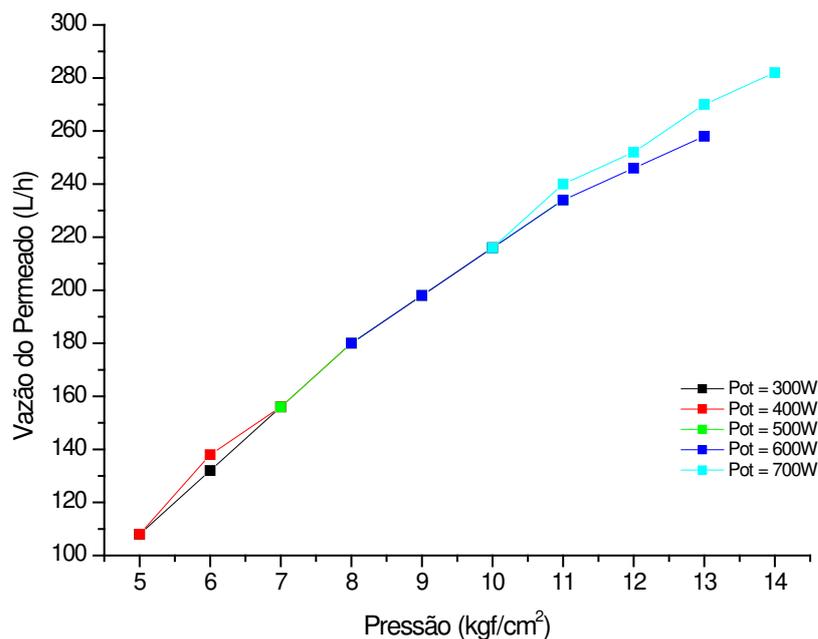


Figura 5.5: Variação da vazão do permeado em função da pressão, para potência de entrada fixas.

Na Figura 5.6 temos o comportamento da recuperação do sistema em função da pressão, para potências de entrada de 300 W , 400 W , 500 W , 600 W e 700 W .

Conforme é mostrado na Figura 5.6 para uma mesma pressão de operação a recuperação apresenta níveis mais elevados quando submetidos a potências mais baixas. Este comportamento é verificado em toda a faixa de pressão que o sistema de dessalinização é operado (de 5 à 14 kgf/cm^2), onde as curvas de menor potência de entrada estão sempre acima das de maior potência.

Neste caso é possível observar que a recuperação aumenta com o aumento da pressão e diminui com o aumento da potência de entrada. Diante disso, é

possível verificar que o aumento da potência de entrada provoca um aumento na vazão do concentrado, mantendo a produção de permeado constante, o que ocasiona uma diminuição na recuperação do sistema. Portanto, o sistema está consumindo uma energia não útil ao processo de dessalinização, haja vista que o consumo de energia aumenta, mas a produção permanece constante.

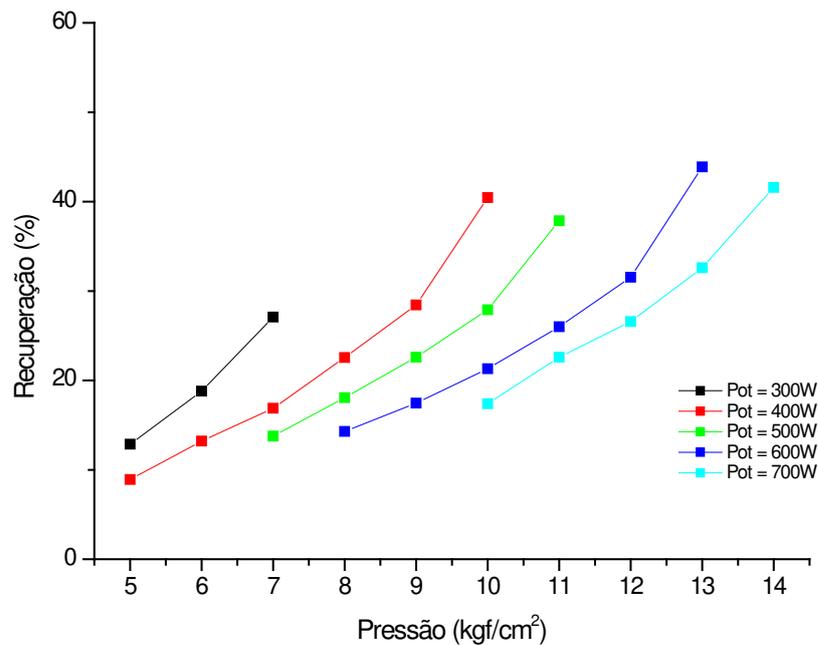


Figura 5.6: Variação da recuperação do sistema em função da pressão, para potência de entrada fixas.

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 5.5 e 5.6 pode-se verificar que estabelecida a pressão de trabalho, através do ajuste da válvula de controle, o aumento da potência de entrada não aumenta a recuperação e conseqüentemente, o rendimento do sistema, os quais sofrem influência apenas da pressão de operação.

Na Figura 5.7 tem-se o efeito da condutividade elétrica do permeado em função da pressão, onde é possível observar que a condutividade diminui linearmente com o aumento da pressão.

Considerando que a condutividade elétrica é empregada para expressar a concentração de sais dissolvidos na água, a determinação deste parâmetro durante o processo de dessalinização permite qualificar o permeado produzido na medida em que exprime o quanto de sais a membrana de OI é capaz de reter e

conseqüentemente o nível de salinidade da água produzida, ou seja, o quão “doce” é o permeado obtido.

Durante o processo de dessalinização pode-se dizer que quanto maior a condutividade elétrica de uma água, maior a quantidade de sais dissolvidos em solução e menor a quantidade de sais retidos na superfície da membrana. Logo, a partir da Figura 5.7 é possível observar que quando submetidos a pressões mais elevadas a capacidade de reter sais das membranas de osmose inversa aumenta, o que ocasiona uma diminuição da condutividade elétrica do permeado produzido.

O comportamento observado na Figura 5.7 mostra que submetido a pressão de operação mais elevada o sistema de dessalinização em estudo produz um permeado de melhor qualidade sendo, portanto, mais eficiente.

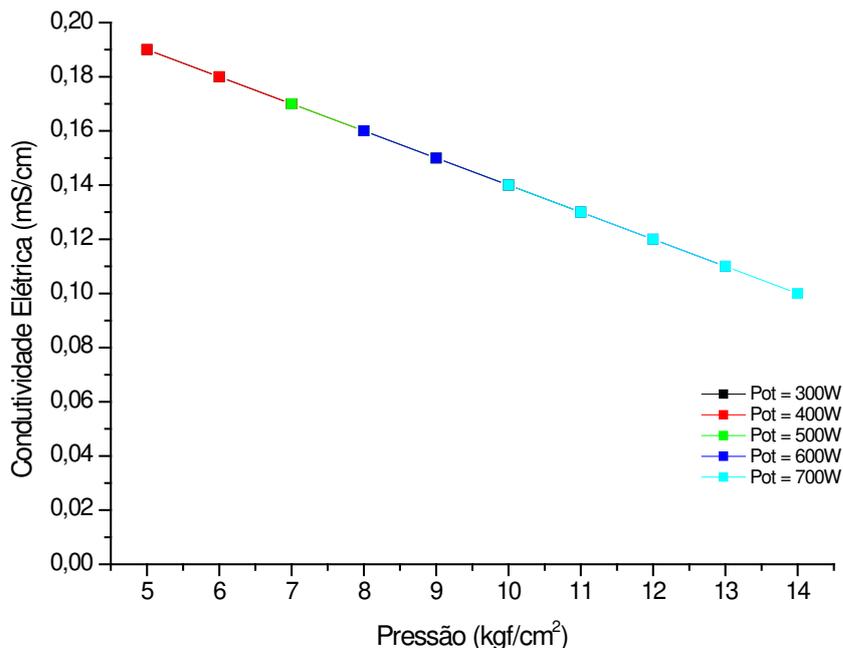


Figura 5.7: Variação da condutividade elétrica em função da pressão.

A obtenção de medidas de condutividade elétrica do permeado também são úteis para caracterizar o processo de dessalinização, considerando que a água de alimentação apresenta uma concentração de 2.000 mg/L o que corresponde a uma condutividade elétrica de aproximadamente 3,88 mS/cm e produz um permeado com concentrações que variam de 36,44 – 73,58 mg/L o que equivale as medidas de condutividade elétrica de 0,10 – 0,19 mS/cm.

Já a medida do pH (potencial hidrogeniônico) realizada durante todo o processo de dessalinização caracteriza a água utilizada no processo quanto ao seu grau de acidez ou basicidade. Este é um parâmetro interessante a ser monitorado durante o processo de dessalinização tendo em vista que variações bruscas desta medida indicam uma provável danificação das membranas dessalinizadoras.

Durante todo o processo de dessalinização avaliado nesta pesquisa o pH manteve-se praticamente constante, em torno de 6,0 – 7,0, o que caracteriza uma operação dentro dos padrões de normalidade.

5.2.3 Ensaio III

A Figura 5.8 mostra o comportamento da pressão em função da potência de entrada, para três posições distintas da válvula de controle do dessalinizador.

As posições da válvula indicam a faixa de operação da pressão do sistema, as quais são mostradas na Tabela 5.3:

Tabela 5.3: Faixas de operação da pressão em função da posição da válvula de controle

Posição	Faixa de Operação da Pressão (kgf/cm ²)
1	5,0 – 12,0
2	7,0 – 15,0
3	10,0 – 15,0

As faixas de pressão atingidas pelas diferentes posições devem-se a abertura imposta a válvula de controle, estando na posição 1 mais aberta e na posição 3 mais fechada.

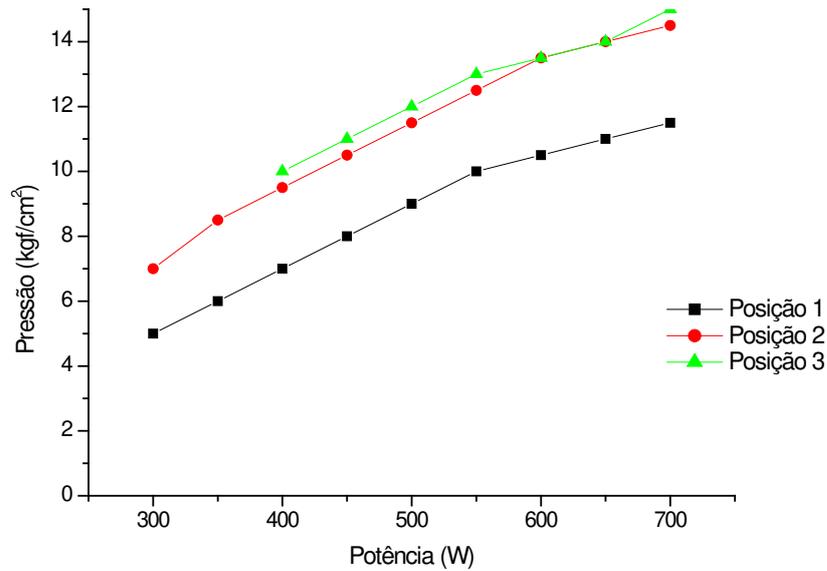


Figura 5.8: Variação da pressão em função da potência de entrada.

A partir da Figura 5.8 nota-se um comportamento semelhante independente da posição da válvula, onde a pressão aumenta com o aumento da potência de entrada. Obviamente, com a válvula mais fechada, é possível atingir níveis de pressão mais elevados já que a resistência imposta ao fluxo de água é maior.

O comportamento das curvas obtidas na figura 5.8 evidencia a faixa de operação do sistema em estudo, que tem como máximo de pressão de operação 15 kgf/cm².

Na Figura 5.9 é apresentado o comportamento da vazão de permeado em função da potência de entrada.

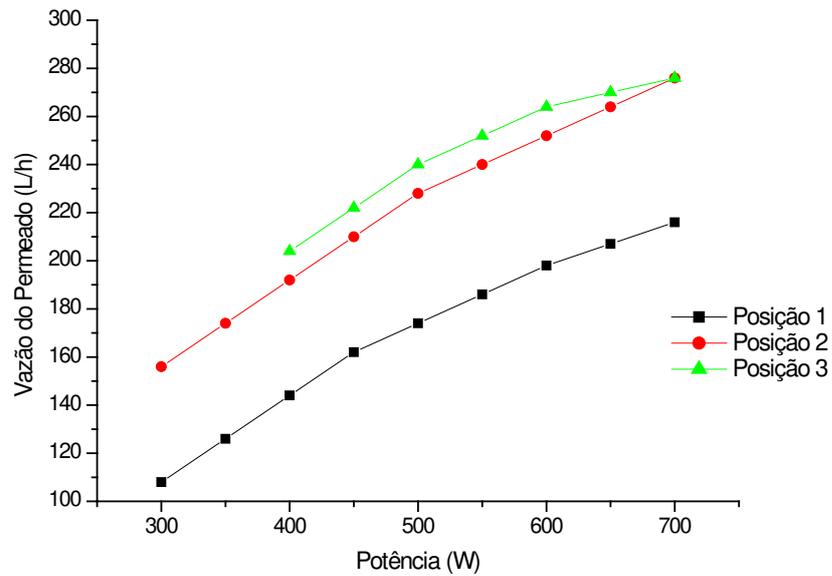


Figura 5.9: Variação da vazão do permeado em função da potência de entrada.

O efeito da vazão do permeado em função da potência de entrada mostrado na figura 5.8 pode ser explicado de acordo com a variação na pressão de operação, apresentada na figura 5.9, já que o fluxo do permeado aumenta com o aumento da pressão

Na Figura 5.10 é apresentado o comportamento da recuperação em função da potência de entrada.

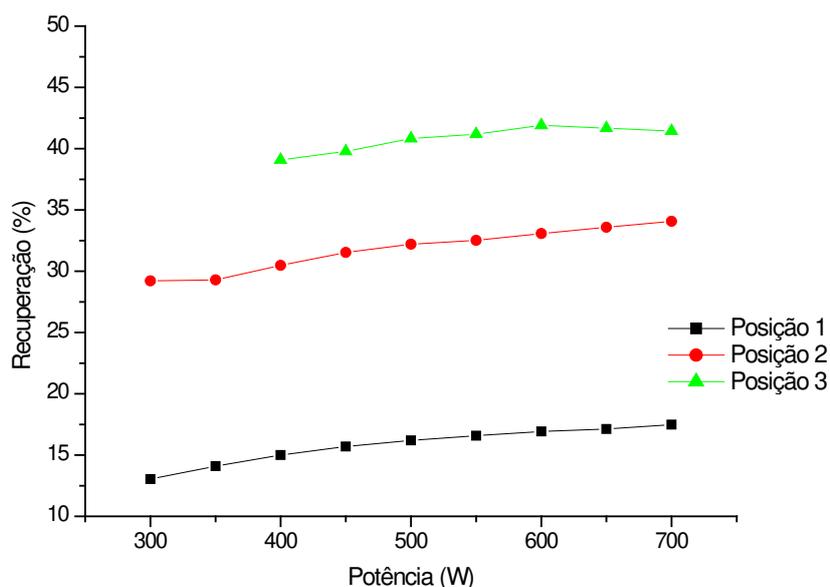


Figura 5.10: Variação da recuperação em função da potência de entrada.

A Figura 5.10 mostra um aumento da recuperação com o aumento da potência de entrada. Este efeito é proveniente do aumento da pressão de operação que sofre influência direta da potência de entrada, já que temos a válvula em uma posição fixa.

Para pressões mais elevadas a recuperação é consideravelmente maior do que para pressões mais baixas, já que em sistemas de osmose inversa o fluxo de permeado é tanto maior quanto for o gradiente de pressão do sistema, conforme indica a equação de fluxo do permeado (Equação 2.2) .

Os resultados obtidos no ensaio III mostram que a eficiência do sistema de osmose inversa está diretamente relacionada com a potência entregue a carga e a pressão de operação do sistema.

Diante disso, podemos observar que é viável a operação desses sistemas submetidos a potência de entrada variável, desde que se estabeleça o melhor ajuste da válvula de controle.

Como nesta pesquisa a aplicação desse sistema é direcionada ao acionamento por painéis fotovoltaicos duas soluções para o estabelecimento do ajuste da válvula de controle podem ser consideradas:

- Ajuste de acordo com o estudo estatístico do perfil de irradiação solar para o período de operação do sistema;
- Substituição da válvula de controle manual por uma válvula proporcional que disponibiliza em sua saída uma pressão proporcional ao sinal elétrico de entrada analógica (tensão e/ou corrente dos painéis).

5.3 Projeto do Arranjo Fotovoltaico

O projeto do arranjo fotovoltaico consiste basicamente na determinação da quantidade necessária de módulos fotovoltaicos para atender uma determinada solicitação da carga elétrica.

O número de módulos depende de dois fatores: quanto de energia é exigido pelo sistema e quanta radiação está disponível; devendo-se buscar a compatibilização da demanda e da oferta de energia.

Para o dimensionamento do arranjo fotovoltaico destinado ao sistema de dessalinização em estudo foi estabelecida a utilização de painéis, modelo KC130-TM da *Kyocera Corporation*, com as seguintes características:

Tabela 5.4: Especificações do painel fotovoltaico

Painel Solar – Modelo KC130-TM	
Potência nominal máxima de saída	130 W
Tensão nominal com circuito aberto	21,9 V
Tensão nominal máxima de saída	17,6 V
Corrente nominal máxima com curto circuito	8,02 A
Corrente nominal máxima de saída	7,39 A
Tensão máxima do sistema	600 V
Área de célula	100 cm ²

A demanda de energia do sistema de dessalinização em estudo consiste apenas de um motor de indução de potência 1 HP.

Para o projeto fotovoltaico são considerados os dados de radiação solar do pior e do melhor mês do ano 2008, os quais são Julho/2008 e Fevereiro/2008, respectivamente. A Tabela 5.5 mostra o tempo em horas em que a radiação solar esteve dentro das faixas médias estabelecidas (100 – 1.300 W/m²).

Tabela 5.5: Horas de irradiação solar média para o pior e melhor mês de 2008 a partir da irradiação média ofertada.

G* (W/m ²)		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1.000	1.100	1.200	1.300
FEV	Horas de Radiação (h)	1,36	1,26	1,02	1,07	1,24	1,00	1,02	0,98	1,13	0,88	0,79	0,25	0,01
JUL		2,36	1,99	2,18	1,59	1,23	0,97	0,74	0,54	0,31	0,08	0,02	0,00	0,00

G* : Faixa média de irradiação solar.

Considerando que o sistema exige uma potência máxima de 746 W (1 HP), o projeto fotovoltaico estabelece 2 conjuntos em paralelo, de 3 painéis associados em série, o que totaliza 6 painéis e fornece uma potência de 780W ao sistema.

De acordo com as especificações do painel fotovoltaico KC –130 TM é possível determinar a potência máxima fornecida individualmente, bem como, pelo o conjunto de painéis, as quais são mostradas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Potência fornecida pelos painéis a partir da irradiação média ofertada.

G (W/m ²)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1.000	1.100	1.200	1.300
Painel	9,2	20,0	31,4	43,0	54,8	66,8	78,9	91,0	103,2	115,5	127,7	140,0	140,0
Conjunto	55,2	120,1	188,1	257,9	328,9	400,8	473,2	546,1	619,4	692,8	766,5	840,2	840,2

De posse dos dados referentes ao tempo de permanência (Tabela 5.5) e a potência fornecida (Tabela 5.6), é possível estabelecer a produção de permeado para o pior e o melhor mês considerando as seguintes características do processo de dessalinização:

- Produção Diária Mínima: 1.000 L
- Pressão de Operação: (10 – 15) kgf/cm²
- Vazão de Alimentação: (500 – 700) L/h
- Vazão de Permeado: (200 – 300) L/h

Estas características foram estabelecidas a partir do ensaio II, com a válvula na posição 3, portanto correspondem a operação real do sistema.

Para estimar a vazão média do conjunto de painéis (*array*) foi utilizado o método dos mínimos quadrados para o conjunto de dados obtido no ensaio II e definido um polinômio que caracteriza o processo.

A partir do polinômio gerado foi estimada a vazão média de permeado para os valores médios de irradiação disponíveis ao processo.

Como a potência mínima para o acionamento do sistema de dessalinização é de aproximadamente 250 W e, de acordo com a tabela 5.5 essa potência é fornecida a partir de uma irradiação média de 400 W/m², a produção de água potável foi calculado para a faixa de irradiação de 400 – 1.300 W/m².

Considerando as horas de irradiação nas faixas de operação do sistema e a vazão média de produção de água potável do conjunto de painéis foi determinada a produção diária do sistema para o pior e melhor mês, conforme mostra a Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Produção de água permeada.

G (W/m ²)		400	500	600	700	800	900	1.000	1.100	1.200	1.300	Produção Diária (L)	
Vazão Média (L/h)		137,9	166,8	193,4	217,4	238,9	257,7	273,9	287,1	297,6	297,6		
Jul.	Horas de Radiação (h)	1,59	1,23	0,97	0,74	0,54	0,31	0,08	0,02	0,00	0,00		
Fev.		1,07	1,24	1,00	1,02	0,98	1,13	0,88	0,79	0,25	0,01		
Jul.	Vazão (L)	219,8	204,5	187,5	160,9	129,6	80,4	23,0	6,9	0,0	0,0		1.012,7
Fev.		148,0	207,2	193,3	220,8	233,1	291,3	239,9	226,3	74,2	3,1	1.837,2	

Os resultados apresentados na Tabela 5.7 mostram que a produção de água potável, tanto para o melhor quanto para o pior dia, ultrapassa a produção diária mínima estabelecida no projeto.

Estes resultados indicam a viabilidade do arranjo fotovoltaico projetado para o acionamento do sistema de dessalinização em estudo.

7. CONCLUSÕES

Os resultados da pesquisa desenvolvida nos permitem concluir que:

- O acionamento de sistemas de dessalinização via osmose inversa por energia fotovoltaica sem baterias é viável, tendo em vista que a produção de água potável é compatível com sistemas idênticos acionados por energia convencional.
- O sistema de dessalinização avaliado permite a operação numa ampla faixa de potência (300 – 700 W), o que demonstra a aplicabilidade de acionamento por sistemas fotovoltaicos sem baterias. O ajuste da válvula de controle exerce influência sobre a faixa de potência na qual o sistema opera.
- A pressão de operação e a potência de entrada são fatores determinantes na produção do permeado, na taxa de recuperação do sistema e na qualidade da água potável produzida, os quais aumentam com o aumento desses fatores.
- O ajuste da válvula de controle é um fator determinante no rendimento do sistema de dessalinização avaliado, no entanto a utilização de uma válvula de controle manual restringe a operação do sistema com a máxima eficiência ao longo de toda faixa de funcionamento.
- O arranjo fotovoltaico projetado atende a necessidade de energia do sistema de dessalinização avaliado, tendo em vista que a produção ultrapassa a produção diária mínima exigida pelo sistema.

7. PERSPECTIVAS

Este trabalho de pesquisa não teve a pretensão de esgotar as pesquisas relacionadas a sistemas de dessalinização via osmose inversa acionados por energia fotovoltaica sem baterias. Portanto, fica como sugestões para trabalhos futuros:

- Operar efetivamente o sistema de dessalinização com o arranjo fotovoltaico projetado a fim de verificar sua eficiência;
- Avaliar o custo em substituir a válvula de controle manual por uma proporcional;
- Propor alternativas para a utilização da energia solar produzida em níveis abaixo da operação do sistema de dessalinização;
- Estudar sistemas acionados por energia fotovoltaica de captação de águas superficiais e subterrâneas para fins de irrigação e/ ou purificação.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília, DF: ANEEL, 2002.

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.

BRITO, A. U. **Otimização do Acoplamento de Geradores Fotovoltaicos a Motores de Corrente Alternada Através de Conversores de Frequência Comerciais para Acionar Bombas Centrífugas**. Tese, Universidade de São Paulo - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, São Paulo, 2006.

BYRNE, W., **Reverse Osmosis – A Practical Guide for Industrial Users**. 2 edição. Editora Tall Oaks Publishing, 2002.

CAD, M. M., **Estratégias de Modelagem Dinâmica e Simulação Computacional do Motor de Indução Trifásico**. Dissertação, Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2000.

CARVALHO, P., **Água Potável Via Energia Solar**. Ciências Hoje, vol. 27, nº 158, 2000.

CRESESB, 1999. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**.

CRESESB, 2005. **Energia Solar – Princípios e Aplicações**.

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

FRANÇA, K.B., LABORDE, H. M. & NEFF, H., **Design and Performance of Small Scale Solar Powered Water Desalination Systems, Utilizing Reverse Osmosis.** Journal of Solar Energy Engineering, v. 122, 2000.

FREITAS, M. A. V., **O Estado das Águas no Brasil:** perspectivas de gestão e informação de recursos hídricos. Brasília, DF: ANEEL / MME/MMA – SRH / OMM / PNUD, 1999.

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

Grupo de Trabalho de Energia Solar (CRESESB, CEPEL). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro, RJ: CRESESB, 1999.

HOFERT, R., **Variable Speed Turbo Couplings Used as Pump Drive in Desalination Plants.** Desalination 125p, 1999.

KAHDIM, A. S.; JASSIM, A. A.; ISMAIL, S., **Effect of Different Operation Pressures for Various Membranes on the Performance of RO Plants.** Desalination, v. 155, ed. 3, 2003.

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.

LIMA, P. C. R., **Água e Energia.** Revista Plenarium, nº 3. Brasília – DF, 2006.

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.

MOHSEM, M. S. & JABER, J. O., **A Photovoltaic-Powered System for Water Desalination.** Desalination, 138p, 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/>

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, A. R., **Desempenho de um Sistema Via Osmose Inversa, em Escala Piloto, Alimentado por Painéis Fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado em engenharia química), UFCG, Campina Grande-PB, 2002.

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.

OZAKI, H. & LI, H., **Rejection of Organic Compounds by Ultra-Low Pressure Reverse Osmosis Membrane**. Water Research, v. 36, 2002.

RALUY, G.; SERRA, L.;UCHE, J. **Life Cycle Assessment of MSF, MED and RO Desalination Technologies**. Energy 31, 2006.

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.

SCWINGE, J.; NEAL, P. R.; WILEY, D. E.; FLETCHER, D. F.; FAUL, A. G.; **Spiral Wound Module and Spaces Review and Analysis**. Journal of Membrane Science. V. 242, ed. 1-2, 2004.

SCOTT, K., **Handbook of Industrial Membranes**, Elsevier Advanced Technology, 1ª ed., 1997.

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.

SOARES, A. K. C., **Avaliação de um Dessalinizador Via Osmose Inversa Usando Energia Solar Fotovoltaica: Estudo do Consumo Energético e Custos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFCG, Campina Grande – PB, 2008.

SOUZA, L. F., **Dessalinização como Fonte Alternativa de Água Potável**. Norte Científico, 2006.

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.

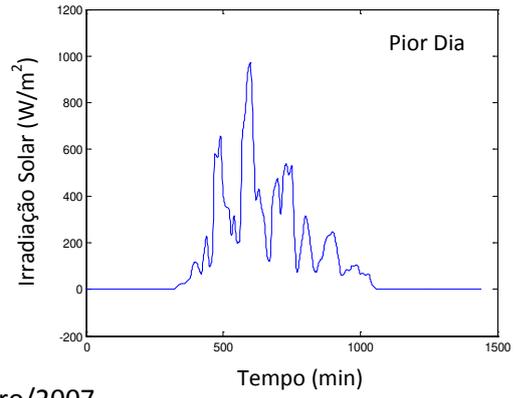
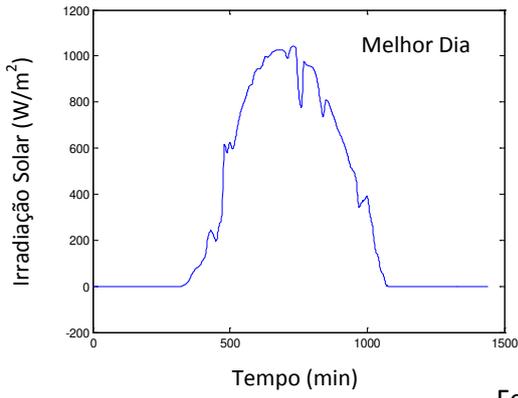
THOMSON, M. & INFELD, D., **A Photovoltaic–Powered Seawater Reverse–Osmosis System Without Batteries**, Desalination, 153p, 2002.

TSIOURTIS, N. X., **Desalination and the Environment**. Desalination 141, 2001.

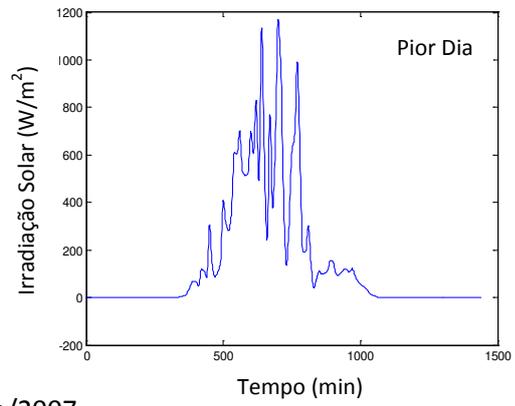
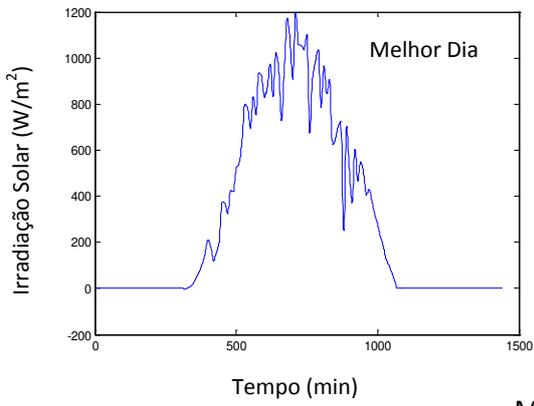
VITORINO, M. A., **Sistema de Bombeamento Fotovoltaico com Motor de Indução e sem Baterias**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), UFCG, Campina Grande – PB, 2008.

ANEXOS

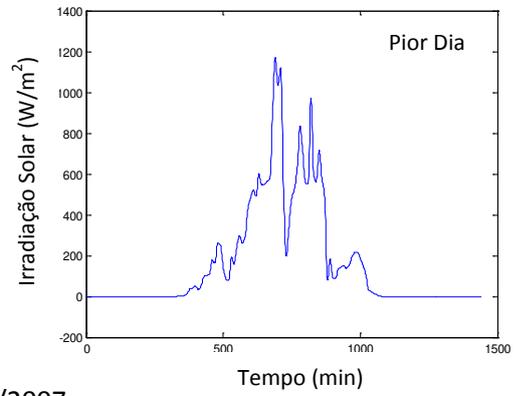
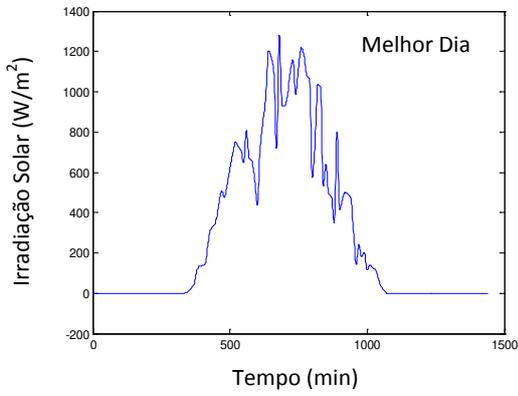
Janeiro/2007



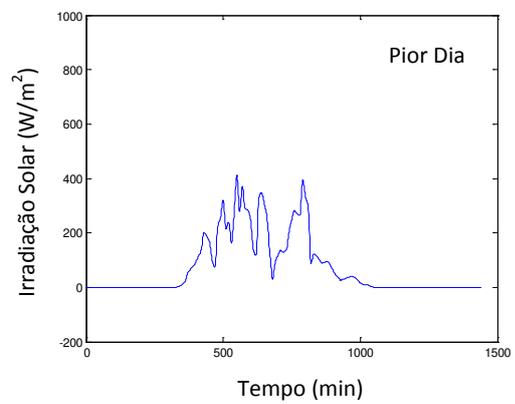
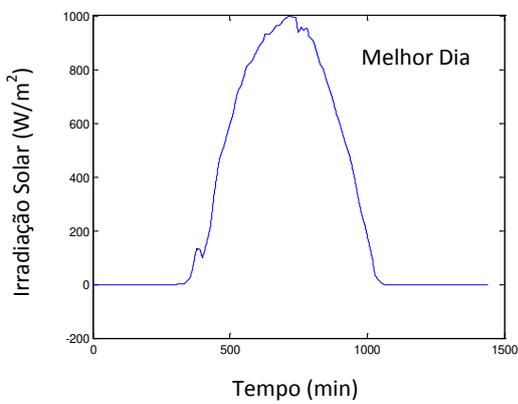
Fevereiro/2007



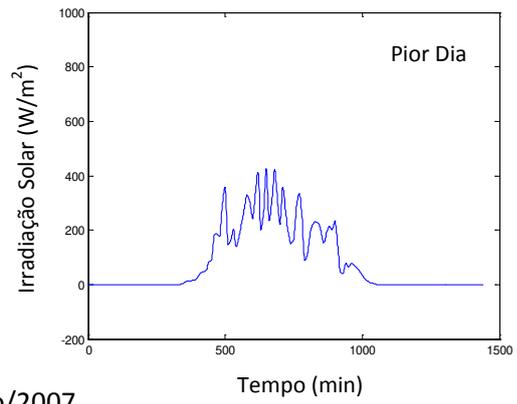
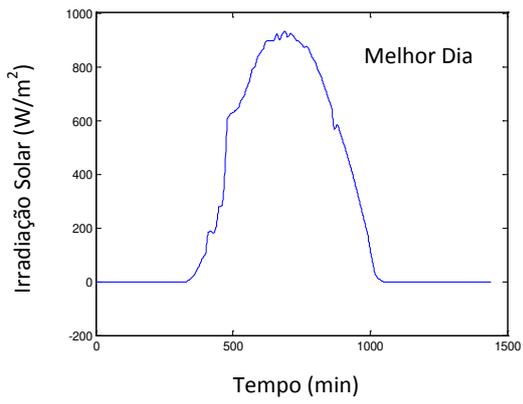
Março/2007



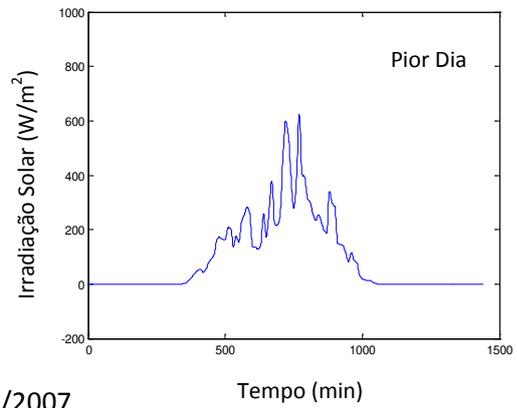
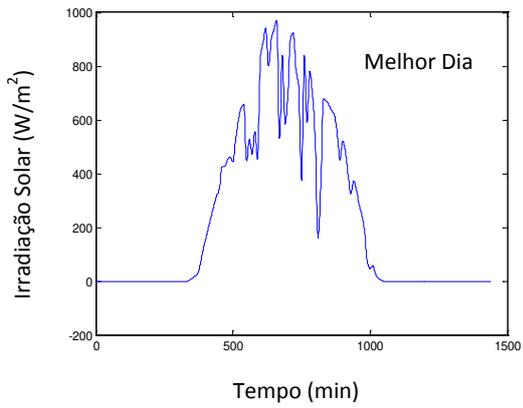
Abril/2007



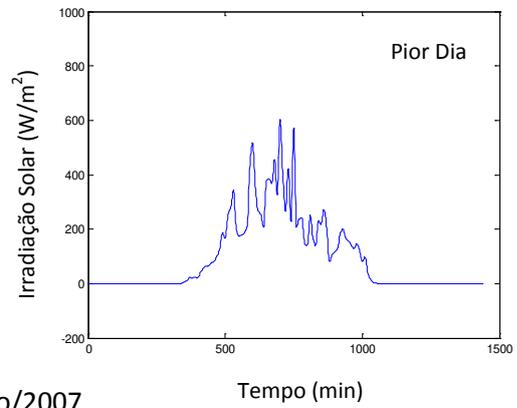
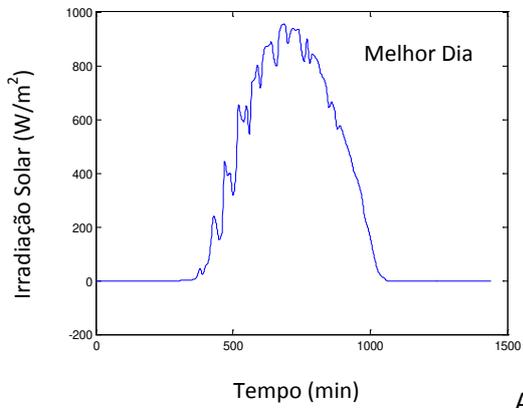
Maio/2007



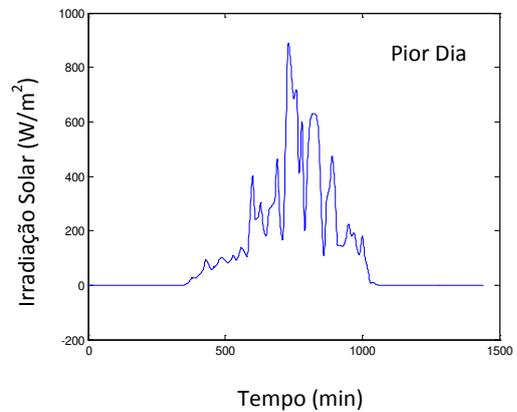
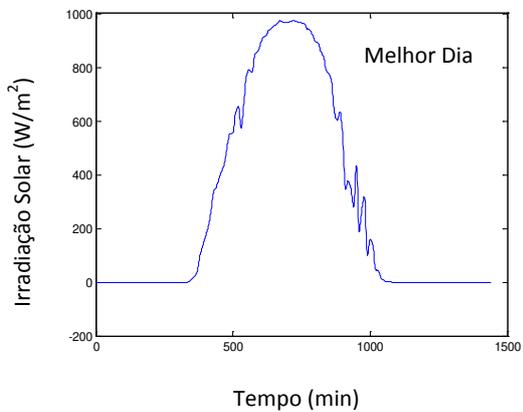
Junho/2007



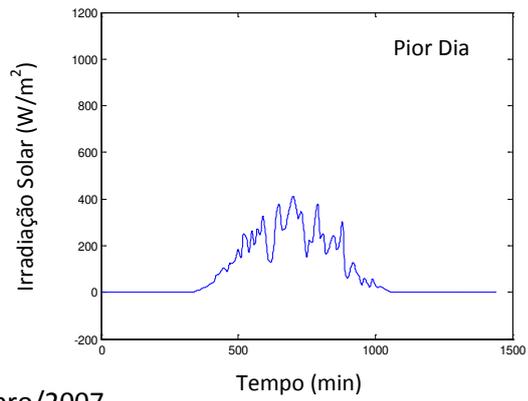
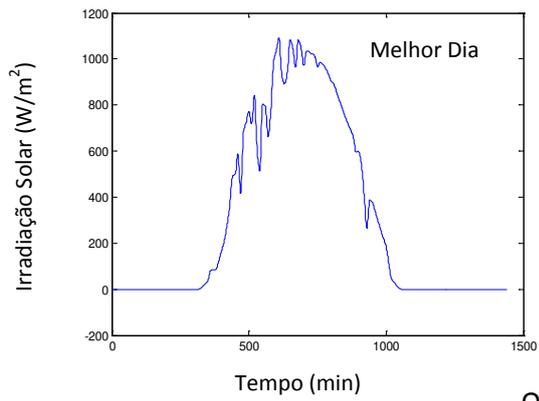
Julho/2007



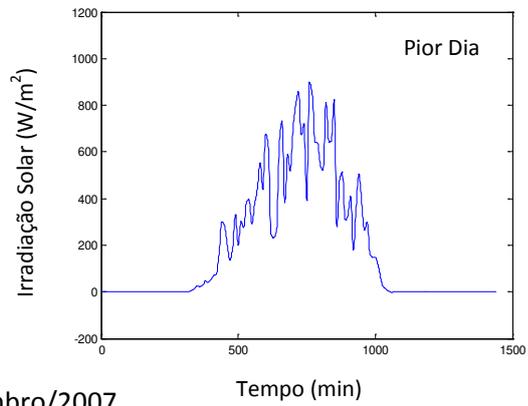
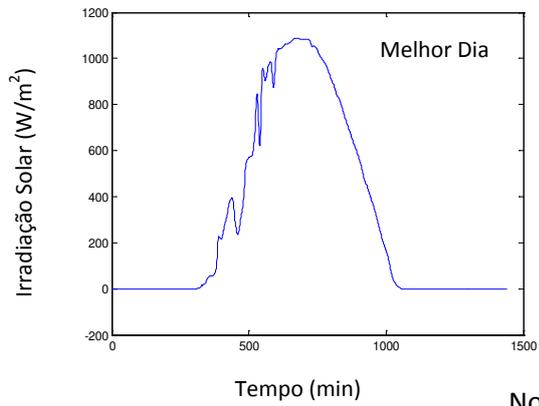
Agosto/2007



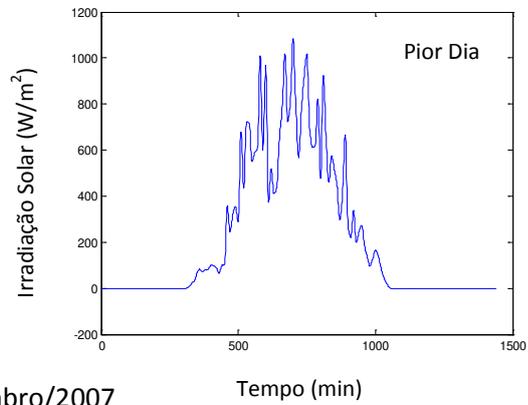
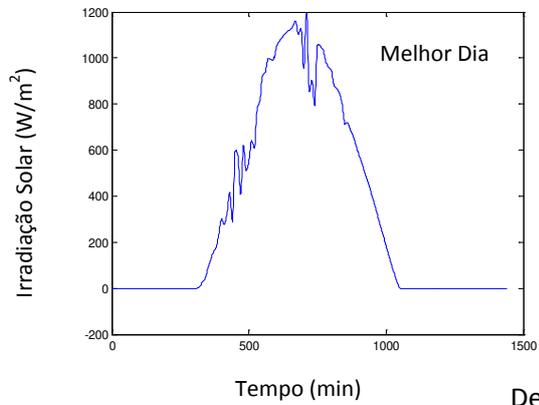
Setembro/2007



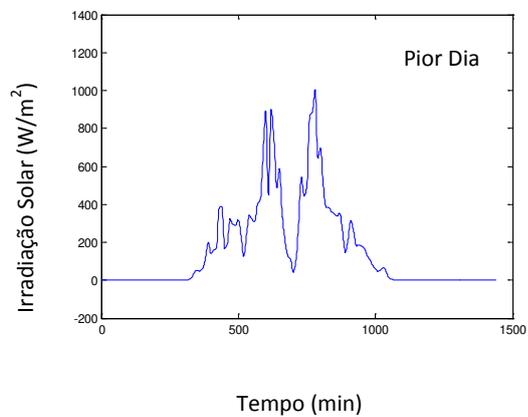
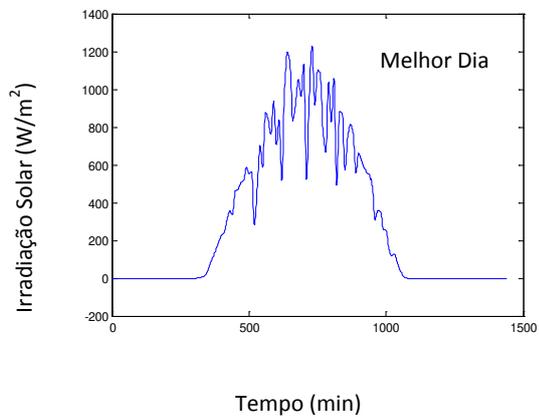
Outubro/2007



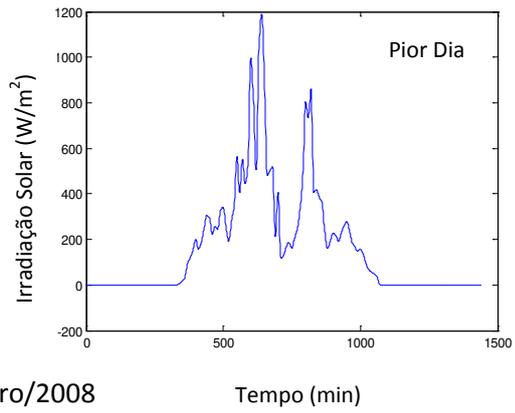
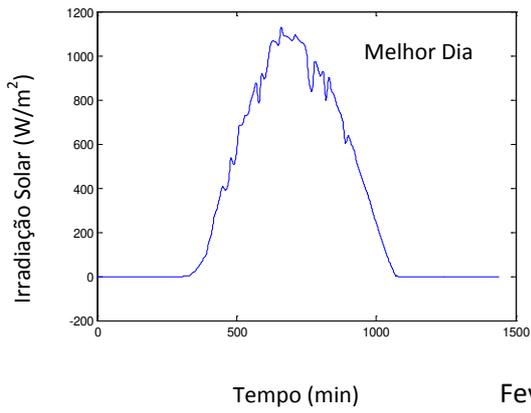
Novembro/2007



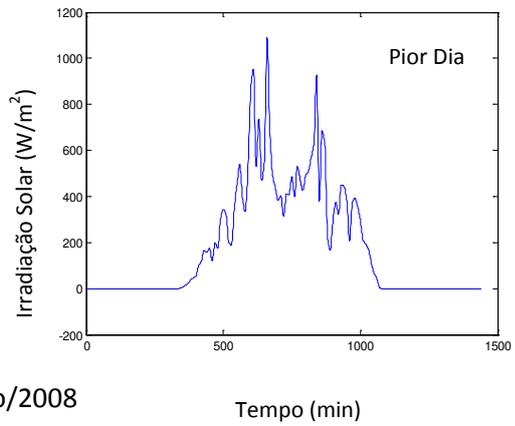
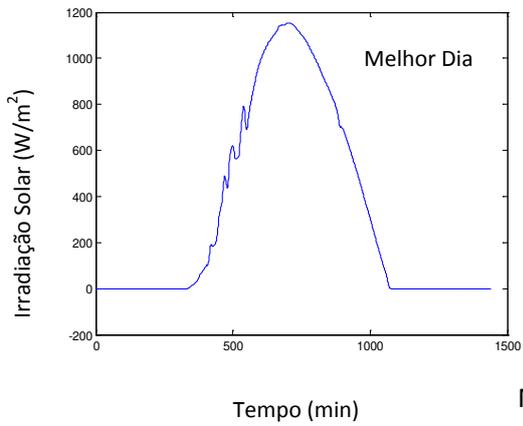
Dezembro/2007



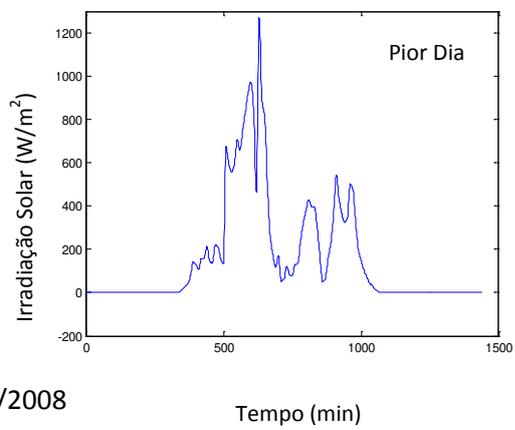
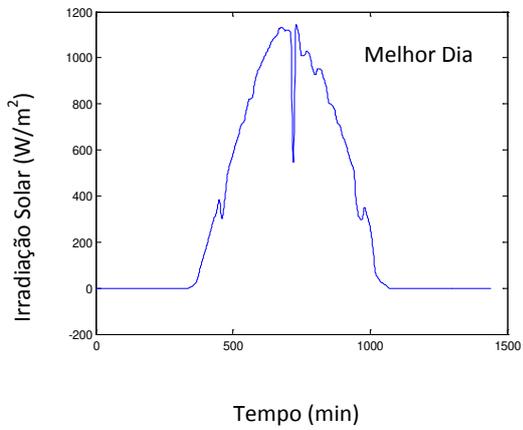
Janeiro/2008



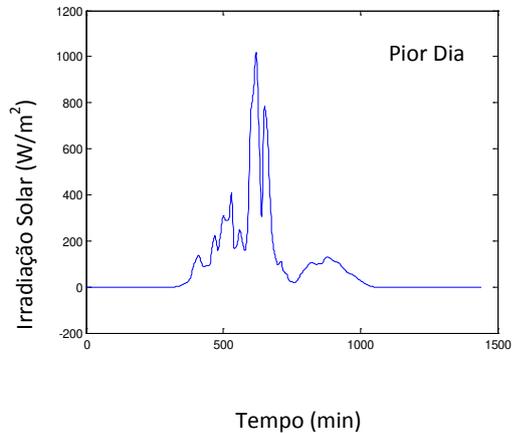
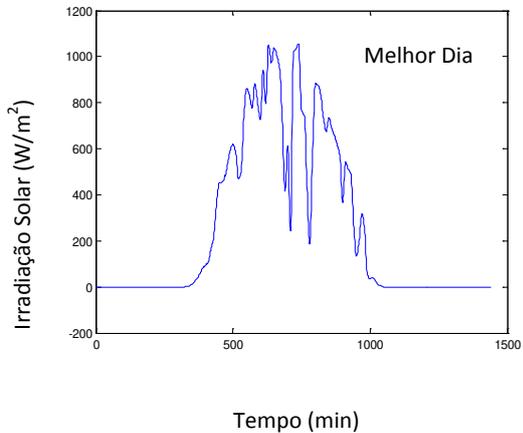
Fevereiro/2008



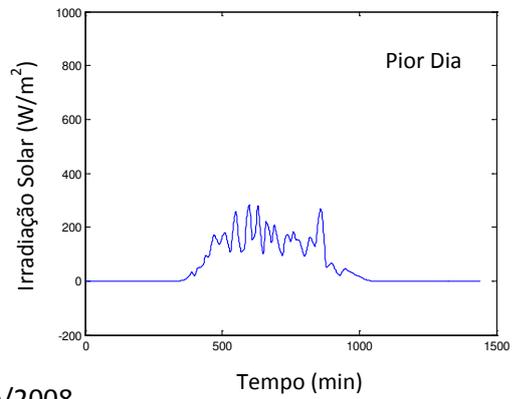
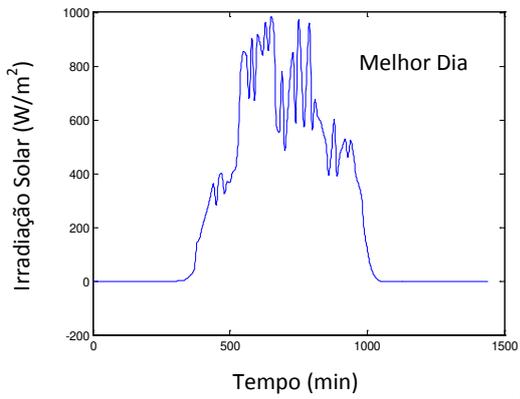
Março/2008



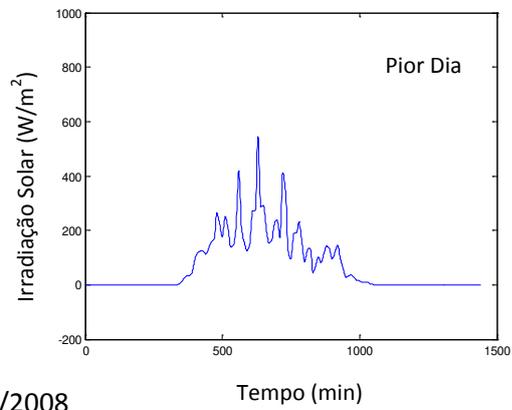
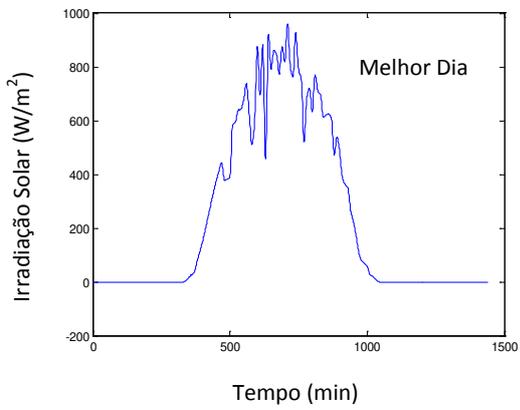
Abril/2008



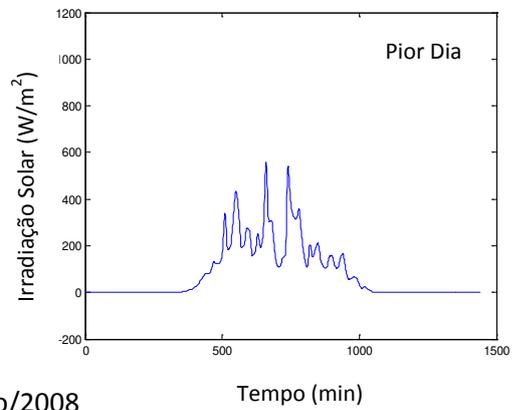
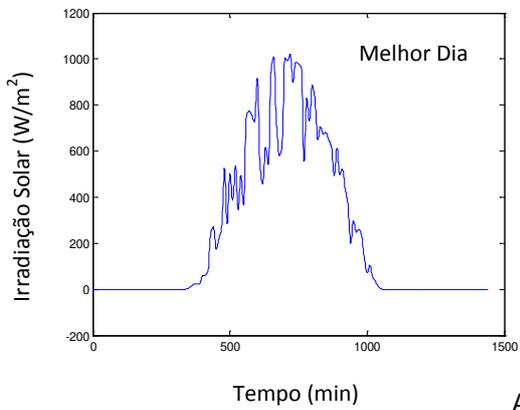
Maio/2008



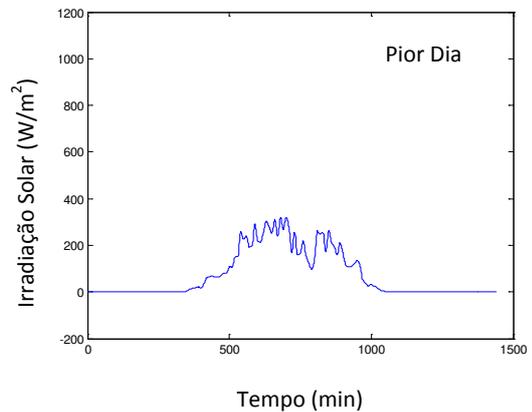
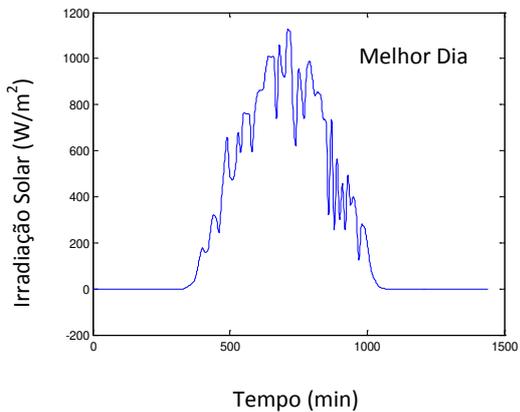
Junho/2008



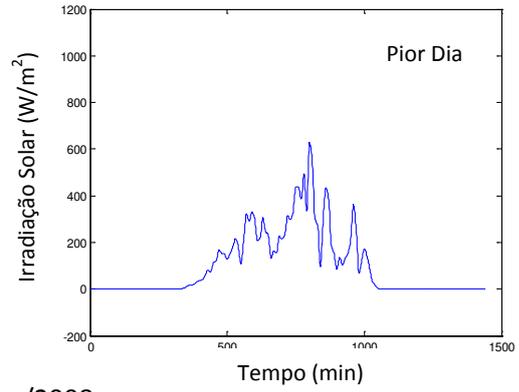
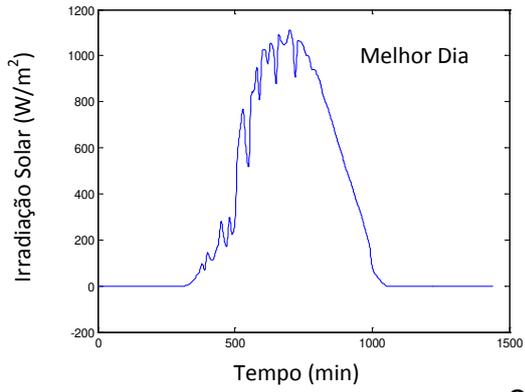
Julho/2008



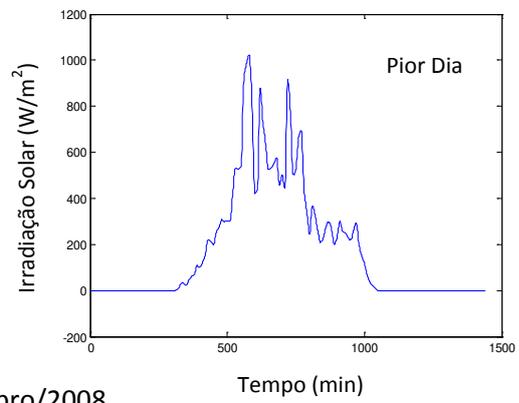
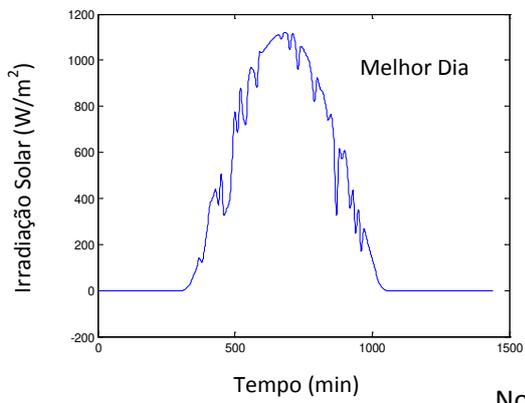
Agosto/2008



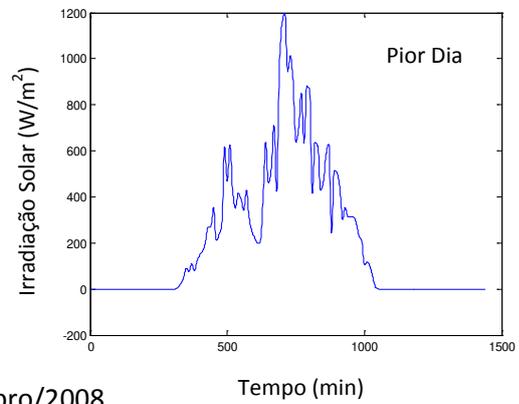
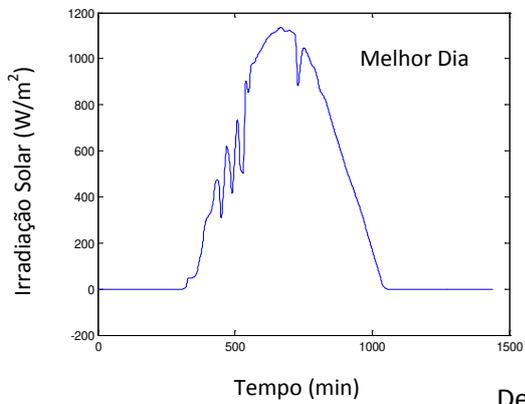
Setembro/2008



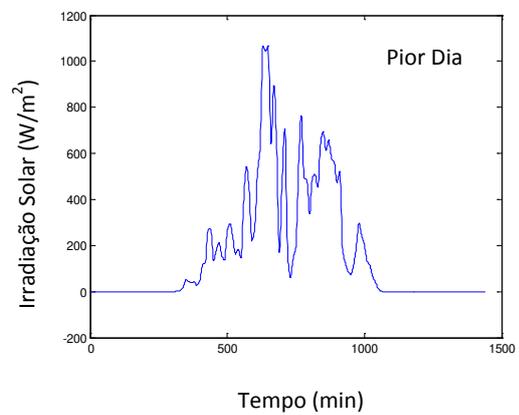
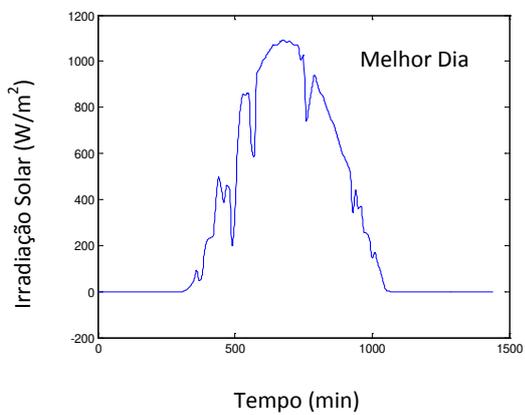
Outubro/2008



Novembro/2008



Dezembro/2008



PERFIL DE IRRADIAÇÃO SOLAR – ANO 2007 E 2008

Faixas de Irradiação (W/m ²)	Percentual de Irradiação Solar (%)												
	[50-150]	[150-250]	[250-350]	[350-450]	[450-550]	[550-650]	[650-750]	[750-850]	[850-950]	[950-1050]	[1050-1150]	[1150-1250]	[1250-1350]
Janeiro	14,38	10,87	9,34	8,79	10,04	9,81	9,11	9,08	8,37	7,48	2,38	0,33	0,00
Fevereiro	13,27	10,15	9,94	9,33	9,36	8,59	9,05	9,27	8,57	7,07	3,78	1,46	0,09
Março	12,92	12,33	11,48	10,22	9,90	10,28	8,77	7,39	6,35	6,12	3,16	1,02	0,03
Abril	14,25	12,46	11,94	9,41	9,89	9,22	8,54	8,39	7,37	6,53	1,80	0,18	0,00
Maiο	12,90	14,66	14,05	10,40	10,13	10,29	8,59	8,28	8,85	1,78	0,04	0,00	0,00
Junho	21,76	18,39	14,09	13,60	10,86	8,66	5,97	4,03	2,44	0,18	0,00	0,00	0,00
Julho	15,32	14,68	15,07	12,81	11,75	11,31	8,63	6,15	3,88	0,40	0,00	0,00	0,00
Agosto	16,17	13,68	14,16	12,52	10,22	9,20	8,48	7,08	5,78	2,49	0,18	0,00	0,00
Setembro	14,09	11,68	12,79	10,77	9,67	10,67	10,03	7,92	6,02	5,12	1,16	0,05	0,00
Outubro	12,31	10,90	11,01	9,70	9,65	10,58	9,56	8,36	6,80	5,71	4,73	0,63	0,02
Novembro	10,81	9,49	9,86	9,32	8,01	9,44	9,22	8,25	8,62	9,05	6,81	1,04	0,06
Dezembro	13,23	10,14	9,75	10,80	10,91	10,03	7,97	8,87	7,34	5,29	4,72	0,87	0,05
2007	14,20	12,37	11,9	10,6	10,02	9,86	8,68	7,79	6,74	4,84	2,46	0,47	0,02

PERFIL DE IRRADIAÇÃO SOLAR – ANO 2008

Faixas de Irradiação (W/m ²)	Percentual de Irradiação Solar (%)												
	[50-150]	[150-250]	[250-350]	[350-450]	[450-550]	[550-650]	[650-750]	[750-850]	[850-950]	[950-1050]	[1050-1150]	[1150-1250]	[1250-1350]
Janeiro	13,81	13,10	9,25	9,26	8,95	9,00	7,63	9,17	7,73	6,06	5,34	0,57	0,08
Fevereiro	11,30	10,51	8,48	8,95	10,35	8,33	8,47	8,13	9,42	7,30	6,57	2,08	0,09
Março	11,65	10,86	10,50	8,72	8,59	7,71	8,34	9,05	8,35	7,72	6,10	2,21	0,15
Abril	15,79	12,18	11,59	11,42	12,13	10,89	8,42	7,15	4,95	4,13	1,15	0,16	0,00
Maiο	16,14	14,30	13,34	13,20	10,63	10,02	8,05	7,16	4,53	2,52	0,07	0,00	0,00
Junho	19,36	16,23	14,98	14,43	9,90	7,84	7,61	5,84	3,51	0,27	0,00	0,00	0,00
Julho	19,64	16,58	18,18	13,29	10,22	8,08	6,17	4,52	2,60	0,70	0,20	0,00	0,00
Agosto	17,16	15,20	13,96	11,43	10,51	9,28	7,21	6,12	5,25	3,11	0,69	0,02	0,00
Setembro	13,15	12,15	11,44	11,49	10,22	10,01	9,36	7,96	6,81	4,75	2,52	0,10	0,00
Outubro	12,22	11,11	10,89	9,62	10,32	9,35	8,40	8,57	6,96	6,41	4,95	1,17	0,06
Novembro	11,67	9,22	9,44	9,25	9,17	9,02	8,77	8,76	8,76	8,11	6,60	1,20	0,00
Dezembro	12,51	10,54	9,98	10,80	8,90	8,08	8,41	9,47	8,47	6,75	5,32	0,73	0,00
2008	14,44	12,59	11,75	10,93	9,97	8,97	8,08	7,71	6,51	4,91	3,37	0,7	0,02

IRRADIAÇÃO MENSAL MÉDIA – 2007 E 2008

Irradiação Média (W/m ²)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Mês	Percentual (%)												
jan/07	14,38	10,87	9,34	8,79	10,04	9,81	9,11	9,08	8,37	7,48	2,38	0,33	0,00
jan/08	13,81	13,10	9,25	9,26	8,95	9,00	7,63	9,17	7,73	6,06	5,34	0,57	0,08
fev/07	13,27	10,15	9,94	9,33	9,36	8,59	9,05	9,27	8,57	7,07	3,78	1,46	0,09
fev/08	11,30	10,51	8,48	8,95	10,35	8,33	8,47	8,13	9,42	7,30	6,57	2,08	0,09
mar/07	12,92	12,33	11,48	10,22	9,90	10,28	8,77	7,39	6,35	6,12	3,16	1,02	0,03
mar/08	11,65	10,86	10,50	8,72	8,59	7,71	8,34	9,05	8,35	7,72	6,10	2,21	0,15
abr/07	14,25	12,46	11,94	9,41	9,89	9,22	8,54	8,39	7,37	6,53	1,80	0,18	0,00
abr/08	15,79	12,18	11,59	11,42	12,13	10,89	8,42	7,15	4,95	4,13	1,15	0,16	0,00
mai/07	12,90	14,66	14,05	10,40	10,13	10,29	8,59	8,28	8,85	1,78	0,04	0,00	0,00
mai/08	16,14	14,30	13,34	13,20	10,63	10,02	8,05	7,16	4,53	2,52	0,07	0,00	0,00
jun/07	21,76	18,39	14,09	13,60	10,86	8,66	5,97	4,03	2,44	0,18	0,00	0,00	0,00
jun/08	19,36	16,23	14,98	14,43	9,90	7,84	7,61	5,84	3,51	0,27	0,00	0,00	0,00
jul/07	15,32	14,68	15,07	12,81	11,75	11,31	8,63	6,15	3,88	0,40	0,00	0,00	0,00
jul/08	19,64	16,58	18,18	13,29	10,22	8,08	6,17	4,52	2,60	0,70	0,20	0,00	0,00
ago/07	16,17	13,68	14,16	12,52	10,22	9,20	8,48	7,08	5,78	2,49	0,18	0,00	0,00
ago/08	17,16	15,20	13,96	11,43	10,51	9,28	7,21	6,12	5,25	3,11	0,69	0,02	0,00
set/07	14,09	11,68	12,79	10,77	9,67	10,67	10,03	7,92	6,02	5,12	1,16	0,05	0,00
set/08	13,15	12,15	11,44	11,49	10,22	10,01	9,36	7,96	6,81	4,75	2,52	0,10	0,00
out/07	12,31	10,90	11,01	9,70	9,65	10,58	9,56	8,36	6,80	5,71	4,73	0,63	0,02
out/08	12,22	11,11	10,89	9,62	10,32	9,35	8,40	8,57	6,96	6,41	4,95	1,17	0,06
nov/07	10,81	9,49	9,86	9,32	8,01	9,44	9,22	8,25	8,62	9,05	6,81	1,04	0,06
nov/08	11,67	9,22	9,44	9,25	9,17	9,02	8,77	8,76	8,76	8,11	6,60	1,20	0,00
dez/07	13,23	10,14	9,75	10,80	10,91	10,03	7,97	8,87	7,34	5,29	4,72	0,87	0,05
dez/08	12,51	10,54	9,98	10,80	8,90	8,08	8,41	9,47	8,47	6,75	5,32	0,73	0,00
2007	14,20	12,37	11,9	10,6	10,02	9,86	8,68	7,79	6,74	4,84	2,46	0,47	0,02
2008	14,44	12,59	11,75	10,93	9,97	8,97	8,08	7,71	6,51	4,91	3,37	0,7	0,02

ENSAIO I – VÁLVULA ABERTA		
Potência (W)	Qc (L/min)	Qc (L/h)
150	13,0	780
160	14,0	840
170	15,0	900
180	16,0	960
190	17,0	1020
200	18,0	1080
210	19,0	1140
220	20,0	1200
230	20,2	1212
240	21,0	1260
250	21,4	1284
260	22,0	1320

ENSAIO II - EXPERIMENTAL										
Alimentação:			pH = 7,6		K = 4,0 mS		2069		Permeado:	
			pH = 6,7		K = 0,16 - 0,10 mS					
Potência (W)	Pot. Hidraulica	Pa (kgf/cm ²)	Qa (L/h)	Qp (L/min)	Qp (L/h)	Qc (L/min)	Qc (L/h)	r%	κ (mS)	
300	115	5,0	840,0	1,8	108,0	12,2	732,0	12,86	0,19	
300	115	6,0	702,0	2,2	132,0	9,5	570,0	18,80	0,18	
300	110	7,0	576,0	2,6	156,0	7,0	420,0	27,08	0,17	
400	166	5,0	1212,0	1,8	108,0	18,4	1104,0	8,91	0,19	
400	171	6,0	1044,0	2,3	138,0	15,1	906,0	13,22	0,18	
400	177	7,0	924,0	2,6	156,0	12,8	768,0	16,88	0,17	
400	175	8,0	798,0	3,0	180,0	10,3	618,0	22,56	0,16	
400	171	9,0	696,0	3,3	198,0	8,3	498,0	28,45	0,15	
400	146	10,0	534,0	3,6	216,0	5,3	318,0	40,45	0,14	
500	217	7,0	1134,0	2,6	156,0	16,3	978,0	13,76	0,17	
500	218	8,0	996,0	3,0	180,0	13,6	816,0	18,07	0,16	
500	216	9,0	876,0	3,3	198,0	11,3	678,0	22,60	0,15	
500	212	10,0	774,0	3,6	216,0	9,3	558,0	27,91	0,14	
500	186	11,0	618,0	3,9	234,0	6,4	384,0	37,86	0,13	
600	276	8,0	1260,0	3,0	180,0	18,0	1080,0	14,29	0,16	
600	279	9,0	1134,0	3,3	198,0	15,6	936,0	17,46	0,15	
600	278	10,0	1014,0	3,6	216,0	13,3	798,0	21,30	0,14	
600	271	11,0	900,0	3,9	234,0	11,1	666,0	26,00	0,13	
600	256	12,0	780,0	4,1	246,0	8,9	534,0	31,54	0,12	
600	209	13,0	588,0	4,3	258,0	5,5	330,0	43,88	0,11	
700	340	10,0	1242,0	3,6	216,0	17,1	1026,0	17,39	0,14	
700	320	11,0	1062,0	4,0	240,0	13,7	822,0	22,60	0,13	
700	311	12,0	948,0	4,2	252,0	11,6	696,0	26,58	0,12	
700	295	13,0	828,0	4,5	270,0	9,3	558,0	32,61	0,11	
700	260	14,0	678,0	4,7	282,0	6,6	396,0	41,59	0,10	

Legenda:

P_a: Pressão de Alimentação

Q_a: Vazão de Alimentação

Q_p: Vazão de Permeado

r: Recuperação

Q_c: Vazão de Concentrado

κ: Condutividade Elétrica

ENSAIO II – SIMULAÇÃO

Alimentação: 2000 PPM

Potência (W)	Pa (kgf/cm ²)	Qa (L/h)	Qp (L/min)	Qp (L/h)	Qc (L/min)	Qc (L/h)	r%
120	5,0	840,0	2,17	130,0	11,8	710,0	16,05
120	6,0	710,0	3,00	180,0	8,8	530,0	24,73
110	7,0	580,0	3,5	210,0	6,2	370,0	36,23
170	5,0	1200,0	2,33	140,0	17,7	1060,0	11,43
170	6,0	1040,0	3,00	180,0	14,3	860,0	17,45
180	7,0	930,0	3,67	220,0	11,8	710,0	24,15
180	8,0	800,0	4,33	260,0	9,0	540,0	32,62
180	9,0	700,0	4,83	290,0	6,8	410,0	41,89
150	10,0	530,0	5,17	310,0	3,7	220,0	57,97
210	7,0	1100,0	3,83	230,0	14,5	870,0	20,57
220	8,0	990,0	4,5	270,0	12,0	720,0	26,94
220	9,0	880,0	5,0	300,0	9,7	580,0	34,48
220	10,0	780,0	7,3	440,0	5,7	340,0	43,02
190	11,0	620,0	5,8	350,0	4,5	270,0	56,81
280	8,0	1260,0	4,5	270,0	16,5	990,0	21,55
290	9,0	1140,0	5,2	310,0	13,8	830,0	27,33
280	10,0	1020,0	5,8	350,0	11,2	670,0	34,13
280	11,0	900,0	6,3	380,0	8,7	520,0	42,22
260	12,0	780,0	6,7	400,0	6,3	380,0	51,88
210	13,0	590,0	6,7	400,0	3,2	190,0	68,17
350	10,0	1250,0	5,8	350,0	15,0	900,0	28,39
330	11,0	1070,0	6,5	390,0	11,3	680,0	36,32
320	12,0	950,0	7,0	420,0	8,8	530,0	44,12
700	13,0	830,0	7,3	440,0	6,5	390,0	53,33
700	14,0	680,0	7,5	450,0	3,8	230,0	66,00

Legenda: P_a: Pressão de Alimentação
Q_a: Vazão de Alimentação

Q_p: Vazão de Permeado
r: Recuperação

Q_c: Vazão de Concentrado
κ: Condutividade Elétrica

ENSAIO III – VÁLVULA EM POSIÇÃO FIXA									
Alimentação: pH = 7,8		K = 3,89 mS	2007 PPM		Permeado: pH = 6,8				
Potência	Pa (kgf/cm ²)	Qa (L/h)	Qp (L/min)	Qp (L/h)	Qc (L/min)	Qc (L/h)	r%	K (mS)	TDS
300	7	534	2,6	156	6,3	378	29,21	0,16	60,96
350	8,5	594	2,9	174	7,0	420	29,29	0,15	56,80
400	9,5	630	3,2	192	7,3	438	30,48	0,14	52,67
450	10,5	666	3,5	210	7,6	456	31,53	0,13	48,56
500	11,5	708	3,8	228	8,0	480	32,20	0,12	44,49
550	12,5	738	4,0	240	8,3	498	32,52	0,11	40,44
600	13,5	762	4,2	252	8,5	510	33,07	0,10	36,44
650	14	786	4,4	264	8,7	522	33,59	0,09	32,47
700	14,5	810	4,6	276	8,9	534	34,07	0,08	28,54
400	10	522	3,4	204	5,3	318	39,08	0,13	48,56
450	11	558	3,7	222	5,6	336	39,78	0,12	44,49
500	12	588	4,0	240	5,8	348	40,82	0,11	40,44
550	13	612	4,2	252	6,0	360	41,18	0,1	36,44
600	13,5	630	4,4	264	6,1	366	41,90	0,09	32,47
650	14	648	4,5	270	6,3	378	41,67	0,08	28,54
700	15	666	4,6	276	6,5	390	41,44	0,07	24,66
300	5	828	1,8	108	12,0	720	13,04	0,19	73,58
350	6	894	2,1	126	12,8	768	14,09	0,18	69,35
400	7	960	2,4	144	13,6	816	15,00	0,17	65,14
450	8	1032	2,7	162	14,5	870	15,70	0,16	60,96
500	9	1074	2,9	174	15,0	900	16,20	0,15	56,80
550	10	1122	3,1	186	15,6	936	16,58	0,14	52,67
600	10,5	1170	3,3	198	16,2	972	16,92	0,13	48,56
650	11	1209	3,5	207	16,7	1002	17,12	0,12	44,49
700	11,5	1236	3,6	216	17,0	1020	17,48	0,11	40,44

Legenda:

P_a: Pressão de Alimentação

Q_a: Vazão de Alimentação

Q_p: Vazão de Permeado

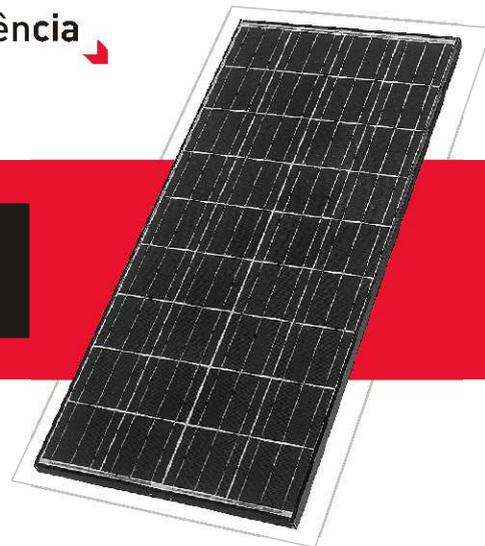
r: Recuperação

Q_c: Vazão de Concentrado

k: Condutividade Elétrica

Módulo Policristalino de Alta Eficiência

KC 130TM



Características Importantes dos Módulos Fotovoltaicos

A avançada tecnologia de processamento de célula e a produção automatizada da Kyocera têm produzido módulos policristalinos de alta eficiência.

A eficiência de conversão das células é acima de 16%.

As células são encapsuladas entre camadas de vidro temperado como cobertura, acetato de vinil etilênico e polivinil fluorídrico como fundo, para dar a máxima proteção contra as severas condições ambientais.

O laminado resultante é encapsulado em uma moldura de alumínio anodizado que oferece uma estrutura mais rígida e de fácil instalação.

Aplicações

- Estações repetidoras de rádios microondas
- Eletrificação de comunidades em áreas remotas
- Postos de saúde em áreas remotas
- Eletrificação de residências de veraneio
- Monitoração de sistemas de qualidades de água e meio ambiente
- Sistemas de navegação e bóias oceânicas
- Sistemas de bombeamento de água
- Luzes de obstrução aérea
- Sistemas de proteção catódica
- Dessalinização de água
- Veículos de recreação
- Sistemas de sinalização

Especificações

Especificações Elétricas

Modelo	KC 130TM
Máxima Potência	130 Watts
Tolerância	+10% / -5%
Voltagem de Máxima Potência	17.6 Volts
Corrente de Máxima Potência	7.39 Amps
Voltagem de Circuito Aberto	21.9 Volts
Corrente de Curto-Circuito	8.02 Amps
Altura	1425 mm
Largura	652 mm
Espessura	58 mm
Peso	11.9 Kg

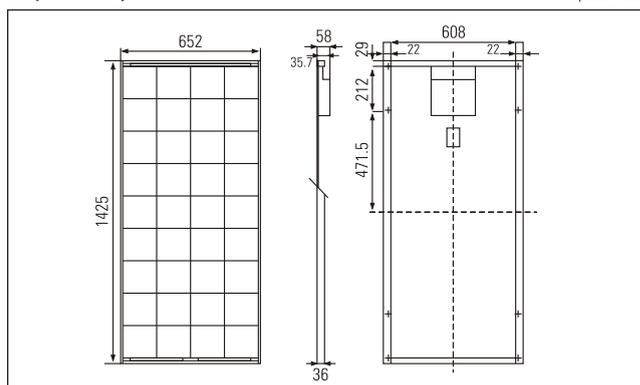
Parâmetro Térmico

Temperatura nominal de operação da célula	47°C
Icc Coeficiente de temperatura da corrente	$[3.18 \times 10^{-3}] \text{ A/}^\circ\text{C}$
Vca Coeficiente de temperatura da Voltagem	$[-8.21 \times 10^{-2}] \text{ V/}^\circ\text{C}$

Nota: As especificações Elétricas estão sob condições de teste de irradiação de $1 \text{ KW} / \text{m}^2$, Spectro de 1.5 de Massa de ar e temperatura de célula de 25°C .

Especificações Físicas

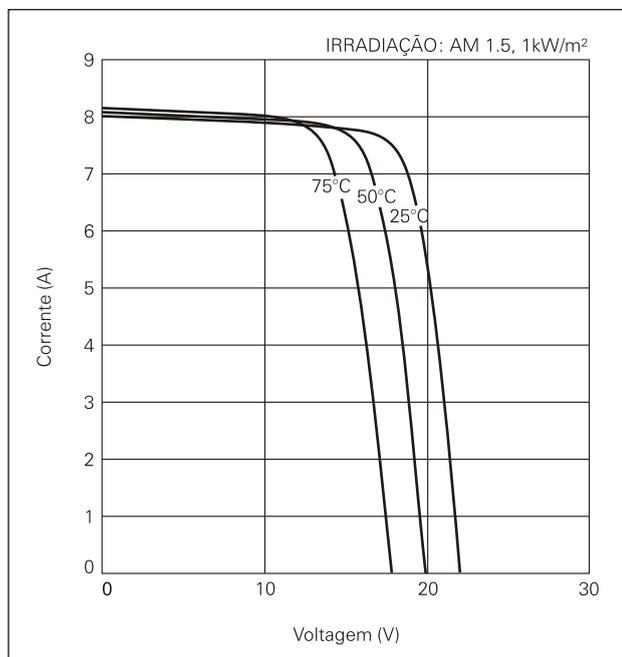
(Unit: mm)



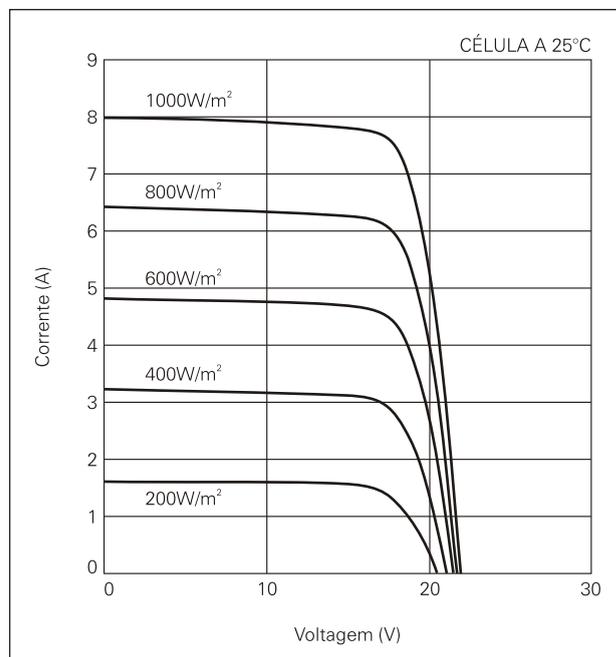
A Kyocera se reserva o direito de modificar estas especificações sem notificação.

Características Elétricas

Características de Voltagem e Corrente dos Módulos Fotovoltaicos KC 130TM em várias temperaturas de Células.



Características de Voltagem e Corrente dos Módulos Fotovoltaicos KC 130TM em vários níveis de irradiação.



Garantia de Qualidade

Os Módulos Fotovoltaicos Policristalinos Kyocera passaram pelos seguintes testes:

- Teste de ciclo térmico
- Teste de choque térmico
- Teste de ciclo térmico / refrigerado e de alta umidade
- Teste de isolamento elétrico
- Teste de impacto de granizo
- Teste de resistência mecânica, de vento e torção
- Teste de resistência à salinidade
- Teste de exposição à água e luz
- Teste de exposição no campo

Por favor, não hesite em contactar-nos para obter maiores detalhes.



Kyocera Corporation

KYOCERA Corporation Headquarters

Corporate Solar Energy Division
6 Takeda Tobadono-cho
Fushimi-ku, Kyoto
612.8501 Japan
Phone: [81] 75.604.3476 Telefax: [81] 75.604.3475
<http://www.kyocera.com>

KYOCERA Solar, Inc.

7812 East Acoma Drive
Scottsdale, AZ 85260, USA
Phone: [1] 480.948.8003 or [0800] 223.9580 Telefax: [1] 480.483.6431
<http://www.kyocerasolar.com>

KYOCERA Solar do Brasil Ltda.

Rua Maurício da Costa Faria, 85
22780.285, Recreio, Rio de Janeiro, Brasil
Phone: [55] 21.2437.8525 Telefax: [55] 21.2437.2338
<http://www.kyocerasolar.com.br>

KYOCERA Solar Pty Ltd.

Level 3, 6-10 Talavera Road, North Ryde
N.S.W. 2113 Australia
Phone: [61] 2.9870.3948 Telefax: [61] 2.9888.9588
<http://www.kyocerasolar.com.au/>

KYOCERA Fin ceramics GmgH

Fritz Muller strasse 107, D-73730 Esslingen, Germany
Phone: [49] 711.9393417 Telefax: [49] 711.9393450
<http://www.kyocerasolar.de/>

KYOCERA Asia Pacific Pte. Ltd.

298 Tiong Bahru Road, #13-03/05
Central Plaza, Singapore 168730
Phone: [65] 271.0500 Telefax: [65] 271.0600

KYOCERA Asia Pacific Ltd.

Room 803, Tower 1 South Seas Centre, 75 Moby Road,
Tsimshatsui East, Kowloon, Hong Kong
Phone: [852] 2.7237183 Telefax: [852] 2.7244501

KYOCERA Asia Pacific Ltd. Taipei Office

10 Fl., No.66, Nanking West Road, Taipei, Taiwan
Phone: [886] 2.2555.3609 Telefax: [886] 2.2559.4131

KYOCERA (Tianjin) Sales & Trading Corporation

Binjiang International Hotel 1106
105 Jianshe Road Heping Dist. Tianjin China
Tel: [22] 2331.8590 Fax: [22] 2330.6276