



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica



**PROPOSTA DE UM ARRANJO FOTOVOLTAICO ADEQUADO PARA O  
ACIONAMENTO DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO SEM BATERIAS**

**RÚBIA RAFAELA FERREIRA RIBEIRO**

CAMPINA GRANDE, PB  
FEVEREIRO, 2011

**Rúbia Rafaela Ferreira Ribeiro**

**PROPOSTA DE UM ARRANJO FOTOVOLTAICO ADEQUADO PARA O  
ACIONAMENTO DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO SEM BATERIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a banca examinadora da Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para a obtenção do título de graduado em Engenharia Elétrica.

**Orientador:** Prof. Dr. Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa

Campina Grande, PB  
Fevereiro, 2011

**PROPOSTA DE UM ARRANJO FOTOVOLTAICO ADEQUADO PARA O  
ACIONAMENTO DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO SEM BATERIAS**

Rúbia Rafaela Ferreira Ribeiro

Aprovada em \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

**Banca Examinadora**

-----  
Orientador

-----  
Examinador

Campina Grande, PB  
Fevereiro, 2011

## 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.

Ao meu **Orientador**, Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa, pela paciência e dedicação durante a elaboração deste trabalho.

A toda a equipe do **LABDES e LEIAM**, pela receptividade e apoio durante a execução esta atividade.

A Coordenação do **Curso de Engenharia Elétrica** pela atenção.

## 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/cm<sup>2</sup>).

**PALAVRAS-CHAVE:** energia fotovoltaica, radiação solar, potência elétrica.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>vi</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivo	2
<b>2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS</b>	<b>3</b>
2.1. O Conceito de Energia	3
2.2. Radiação Solar	3
2.3. Energia Solar	4
2.4. Configurações Básicas de Sistemas Fotovoltaicos	5
2.5. Componentes Básicos de Sistemas Fotovoltaicos	6
2.5.1. Módulo Fotovoltaico	7
2.5.2. Baterias	12
2.5.3. Controladores de Carga	13
2.5.4. Inversores	14
2.6. Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos	15
2.6.1. Avaliação do Recurso Solar	15
2.6.2. Estimativa da Curva de Carga	16
2.6.3. Escolha da Configuração	16
2.6.4. Dimensionamento do Sistema de Armazenamento	16
2.6.5. Dimensionamento da Geração Fotovoltaica	17
2.6.5.1. Exemplo de Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico	17
2.6.6. Especificação dos Demais Componentes Básicos	20
2.6.7. Projeto Elétrico	20
2.7. Energia Solar para Sistemas de Dessalinização	20
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>23</b>
3.1. Sistema Experimental	23
3.1.1. Sistema de Dessalinização Via Osmose Inversa	24
3.1.1.1. Filtro	24
3.1.1.2. Motor	24
3.1.1.3. Bomba	24
3.1.1.4. Membranas	25
3.1.2. Sistema de Geração de Energia	26
3.1.3. Sistema de Aquisição de Dados	26
3.2. Procedimento Experimental	26
<b>4. RESULTADOS</b>	<b>28</b>
4.1. Caracterização do Sistema de Dessalinização	28
4.1.1. Ensaio I	28
4.1.2. Ensaio II	29
4.1.3. Ensaio III	30

4.2. Estudo da Oferta de Energia Solar	33
4.3. Proposta do Arranjo Fotovoltaico	37
<b>5. CONCLUSÕES</b>	<b>40</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>41</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>42</b>



## 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.

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. Estas 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 Nordeste, 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 avaliar metodologias para o dimensionamento de um arranjo fotovoltaico visando o acionamento de um sistema de dessalinização via osmose inversa.

## **2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos referentes a energia solar e aos sistemas de geração fotovoltaica.

### **2.1. O Conceito de Energia**

A energia, nas suas mais diversas formas, é indispensável à sobrevivência da espécie humana. E mais do que sobreviver, o homem procurou sempre evoluir, descobrindo fontes e formas alternativas de adaptação ao ambiente em que vive e de atendimento às suas necessidades. Dessa forma, a exaustão, escassez ou inconveniência de um dado recurso, entre eles o energético, tende a ser compensada pelo surgimento de outro(s). Em termo de suprimento energético, a eletricidade se tornou uma das formas mais versáteis e convenientes de energia, passando a ser recurso indispensável e estratégico para o desenvolvimento socioeconômico de muitos países e regiões (ANEEL, 2002).

As fontes primárias usadas para a produção de energia elétrica podem ser classificadas em não-renováveis e renováveis. São consideradas fontes não-renováveis aquelas passíveis de se esgotar por serem utilizadas com velocidade superior aos milhões de anos necessários para sua formação. Nesta categoria estão o petróleo e seus derivados, os combustíveis radioativos e o gás natural. Fontes renováveis são aquelas, cuja reposição pela natureza é bem mais rápido que sua utilização energética (como as águas dos rios, marés, sol, ventos) ou cujo manejo pelo homem pode ser efetuado de forma compatível com as necessidades de sua utilização energética (como biomassa: cana-de-açúcar, florestas energéticas e resíduos animais, humanos e industriais). A maioria dessas fontes apresenta características estatísticas e estocásticas, de certa forma cíclicas, em períodos de tempo compatíveis com a operação das usinas elétricas e inferiores à vida útil das mesmas. Tais fontes podem ser utilizadas para produzir eletricidade principalmente através de usinas hidrelétricas, eólicas, solar fotovoltaicas e centrais térmicas (REIS, 2003).

Os tipos de energia predominantemente utilizados na era industrial são limitados. De acordo com a evolução da exploração das reservas de petróleo e de gás, é previsto que as reservas se esgotem nas três primeiras décadas do nosso século. Mesmo no caso de serem descobertos novos depósitos, apenas se prolongará a dependência da energia fóssil por mais algumas décadas (A. NETTO, 2000).

### **2.2. Radiação Solar**

O Sol fornece energia na forma de radiação, que é a base de toda a vida na Terra. No centro do Sol, a fusão transforma núcleos de hidrogênio em núcleos de hélio. Durante este processo, parte da massa é transformada em energia. O Sol é assim um enorme reator de fusão. Devido à grande distância existente entre o Sol e a Terra, apenas uma mínima parte (aproximadamente duas partes por milhão) da radiação solar emitida atinge a superfície da

Terra. Esta radiação corresponde a uma quantidade de energia de  $1 \times 10^{18}$  KWh/ano (GREENPRO, 2004).

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) (CRESESB, 1999).

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.

### **2.3. 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.

#### 2.4. 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 2.1) mostra o esquema de um sistema fotovoltaico básico.

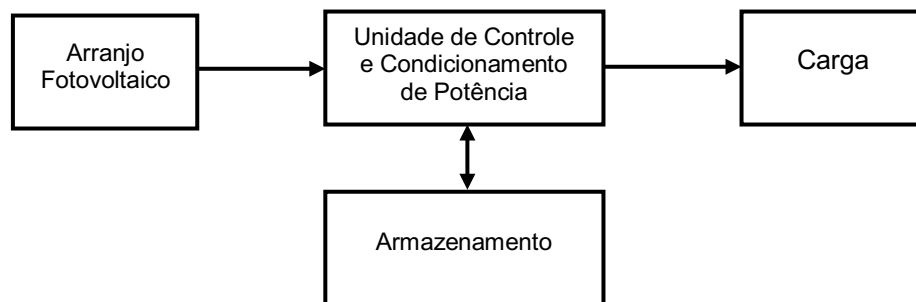


Figura 2.1 – Configuração Básica de Sistemas Fotovoltaicos

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 2.2) e descritas a seguir.

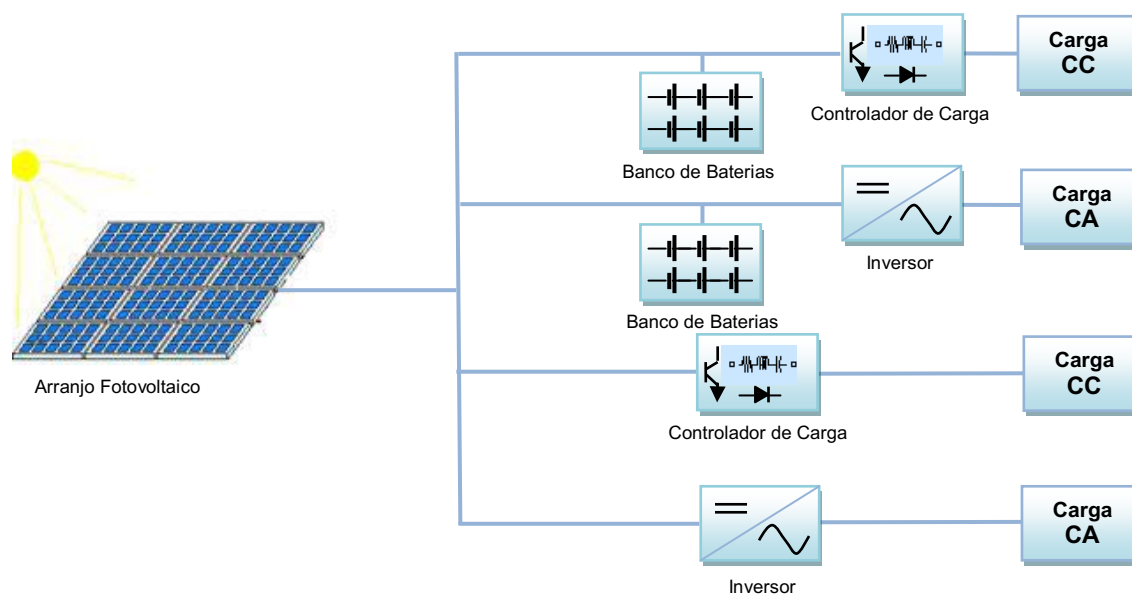


Figura 2.2 – Diagrama de Sistemas Fotovoltaicos em Função da Carga Utilizada

- **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.

## 2.5. 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 2.1 os sistemas fotovoltaicos são compostos por três elementos básicos: o arranjo de módulos fotovoltaicos, o subsistema de condicionamento de potencia, 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 potencia compreende: controlador de carga, inversor, conversor e seguidor de máxima potencia (CRESESB, 1999).

### **2.5.1. 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 costumeiramente 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 2.3), produzindo de 12 a 15 Volts de tensão e potência de até 50 Watts, dependendo da insolação.

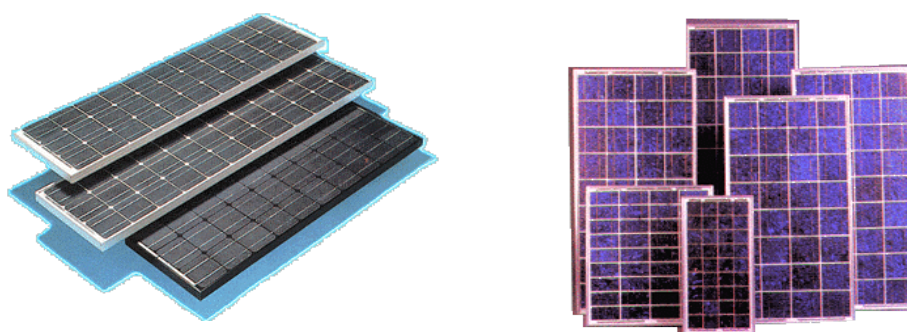


Figura 2.3 – Modelos de Módulos Fotovoltaicos

### a) Célula Fotovoltaica

Fotovoltaico significa a transformação direta da luz em energia elétrica, recorrendo-se a células solares. Neste processo, são utilizados materiais semicondutores como o silício, o arsenieto de gálio, teluriato de cádmio ou disselenieto de cobre e índio. A célula de silício cristalina é a mais comum. Atualmente, cerca de 95% de todas as células solares do mundo são de silício. Numa posição próxima do oxigênio, é o segundo elemento químico mais frequentemente utilizado na Terra. O silício apresenta uma disponibilidade quase ilimitada. O silício não existe como um elemento químico. Existe apenas associado à areia de sílica (GREENPRO, 2004).

O material utilizado nas células solares deve ser da maior pureza possível. Isto pode ser conseguido através de sucessivas etapas na produção química. Até aos dias de hoje, os fabricantes de células solares têm obtido, na sua maior parte, o material purificado do desperdício da indústria eletrônica de semicondutores.

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 2.4). 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).



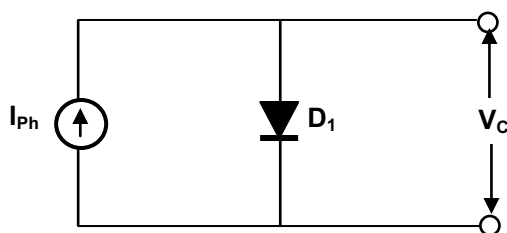


Figura 2.4 – Circuito Equivalente da Célula Solar (Modelo Ideal)

A (Figura 2.5) 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 semiconductor; 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.

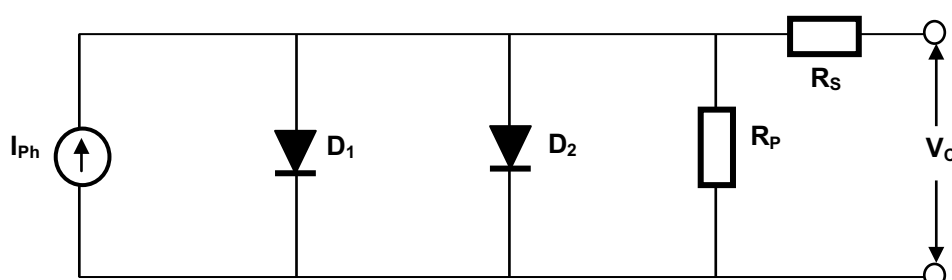


Figura 2.5 – Circuito Equivalente da Célula Solar (Modelo Real)

## 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 2.6.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 2.6.b).

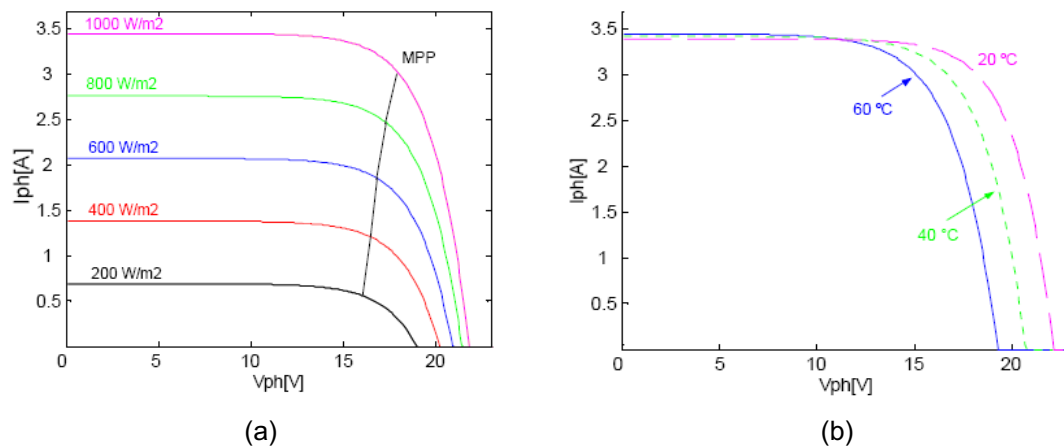


Figura 2.6 – Fatores que Influenciam a Curva Característica dos Módulos Fotovoltaicos

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 ( $\eta$ ).

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 2.7).

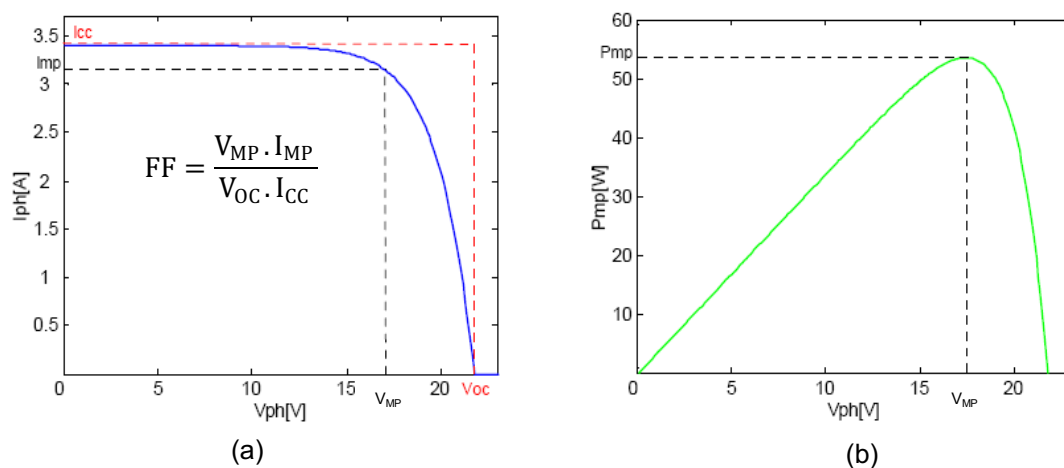


Figura 2.7 – Curva Característica  $I \times V$ , com Definição do FF, e a Curva de Potência do Módulo

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 2.8).

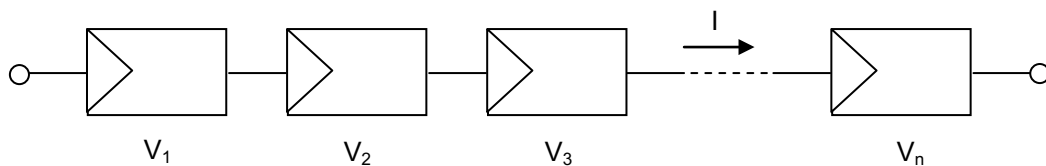


Figura 2.8 – Arranjo Série dos Módulos

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 2.9).

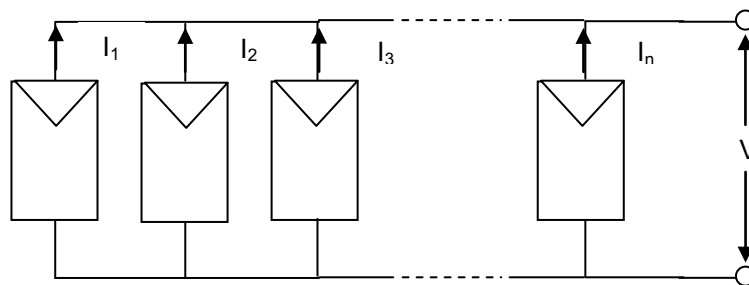


Figura 2.9 – Arranjo Paralelo dos Módulos

O arranjo em paralelo permite obter-se uma corrente resultante correspondente à soma de todos os valores de corrente de cada uma das 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.

### **2.5.2. 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.

Nos sistemas de geração fotovoltaica são utilizadas baterias recarregáveis, em virtude da característica da geração de energia disponibilizada pela radiação solar, quando há geração superior ao consumo esta energia excedente é armazenada nas baterias e quando o consumo é maior que a geração utiliza-se parte da energia armazenada na bateria (GREENPRO, 2004).

Normalmente o tempo de vida das baterias é em torno de cinco anos, e com todos os cuidados, não é superior a dez anos. Já a capacidade da bateria é dada em ampère-hora, ou seja, este valor especifica a taxa de corrente que ela fornece durante um período de uma hora de serviço ou fornecimento.

Nas instalações de energia solar, os acumuladores ou baterias de chumbo-ácido, são os elementos mais comuns para os armazenamentos de curta duração. Estas baterias têm a melhor relação preço-eficiência e podem assegurar elevadas e reduzidas correntes de carga com uma boa eficiência. Nos sistemas fotovoltaicos, a capacidade de armazenamento situa-se geralmente entre 0,1 e 100 kWh, embora já tenham sido implementados alguns sistemas na gama dos MWh (CRESESB, 1999).

As baterias de ácido de chumbo compreendem várias células individuais, cada uma delas com uma tensão nominal de 2 Volts. Quando são montadas em bloco, as células são dispostas dentro de um invólucro comum, sendo internamente ligadas em série (por exemplo: 6 células para um bloco de 12 V). Nos grandes sistemas de acumulação, as baterias são construídas geralmente como células individuais, devido ao seu peso. Quando são instaladas, são ligadas entre si em série ou em paralelo, criando diferentes níveis de tensão e capacidades (GREENPRO, 2004).

Quando o gerador fotovoltaico recarrega a bateria, com uma tensão superior à tensão dos terminais da bateria, os elétrons circulam na direção contrária (do pólo positivo para o pólo negativo). Verifica-se então a inversão do processo químico que ocorreu durante a

descarga. O processo não é completamente reversível. Pequenas quantidades de sulfato de chumbo não se voltam a dissolver (sulfatação). Em resultado do processo de carga/descarga, a capacidade da bateria diminui. Esta perda de capacidade é maior quanto maior foi a profundidade da descarga. Se for utilizada apenas uma parte da capacidade da bateria, então a diminuição é relativamente pequena, pelo que a vida da bateria, isto é, o seu número de ciclos, aumenta consideravelmente para operações caracterizadas por fracas descargas (CRESESB, 1999).

A capacidade de um acumulador é a quantidade de eletricidade que a bateria pode fornecer até ficar totalmente descarregada, em determinadas condições de descarga. A capacidade nominal ( $C_n$ ) é o produto da descarga constante ( $I_n$ ) e do tempo de descarga ( $t_n$ ) (GREENPRO, 2004).

A tensão nominal de uma bateria de ácido de chumbo é de 2,0 V por célula. Em geral estão disponíveis no mercado baterias de 12 V com seis células em série e baterias de 24 V com doze células em série. Em funcionamento, a tensão nos terminais das baterias flutua de acordo com o seu estado operacional. Para proteger a bateria, são pré-determinados dois valores limite, que devem ser mantidos de forma rigorosa. Durante a carga, a tensão máxima de carga marca o limite superior. Na descarga, a tensão mínima de descarga marca o limite inferior que é tolerado. Outro parâmetro a ter em conta é a tensão de gaseificação, a partir da qual a bateria começa a gaseificar de forma significativa durante o processo de carga.

A tensão em circuito aberto de uma bateria ou a tensão que se verifica na inexistência de uma carga é denominada a tensão de equilíbrio, não podendo ser medida imediatamente após a carga ou descarga, uma vez que é necessário estabelecer em primeiro lugar o equilíbrio termodinâmico. A tensão de equilíbrio depende da concentração do eletrólito. Dependendo do estado da carga e do tipo de bateria, flutua algures entre 1,96 V e 2,12V para cada uma das células (CRESESB, 1999).

### **2.5.3. 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.

Controladores de carga são componentes críticos em sistemas fotovoltaicos, pois caso venham a falhar, a bateria ou a carga podem sofrer danos irreversíveis. Eles devem ser projetados considerando-se as especificações dos diversos tipos de bateria.

Pequenos sistemas de cargas estáveis e contínuas podem ser projetados para operar sem um controlador de carga, desde que a tensão entregue pelo arranjo seja compatível com a tensão da bateria. No entanto, como ocorre na grande maioria dos casos, o controlador é indispensável e sua utilização permite uma otimização no dimensionamento do banco de baterias e um maior nível de proteção contra um aumento excessivo de consumo ou uma possível intervenção do usuário (CRESESB, 1999)

#### **2.5.4. 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.

## **2.6. 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.

### **2.6.1. 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  $1 \text{ kW/m}^2$  ( $1.000 \text{ W/m}^2$ ) 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.

### **2.6.2. 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.

### **2.6.3. 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.

### **2.6.4. 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.

### **2.6.5. 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 IxV 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.

#### **2.6.5.1. Exemplo de Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico**

O primeiro pensamento em um projeto é saber qual o objetivo principal. Desta forma, vamos dimensionar um arranjo fotovoltaico autônomo para alimentação de um sistema de dessalinização via osmose inversa.

O passo seguinte é saber a localização da instalação do sistema fotovoltaico. Então, sejam os dados do local:

- Local: Campina Grande – PB.

- Latitude: 7° 13' 50" S – 35° 52' 52" O

Posteriormente são especificadas as características da carga a ser alimentada que para o nosso caso será considerando um sistema de dessalinização de 1 HP:

Tabela 2.1 – Especificações da Carga Alimentada

<b>Carga</b>	<b>Potência</b>	<b>Nº de Horas de Uso por Dia</b>	<b>Energia Diária</b>
Eletrolisador	746 W	5 h	3.730 Wh
Demanda Diária Total de Energia			3.730 Wh
Demanda Diária Total de Energia em Ah			104 Ah

Para o dimensionamento do banco de baterias são realizadas as seguintes considerações:

Tabela 2.2 – Dimensionamento do Banco de Baterias

<b>Dimensionamento do Banco De Baterias</b>	
Dias de Armazenamento Necessário	3 dias
Limite de Profundidade de Carga	0,8
Capacidade Necessária em Ah	390 Ah
Capacidade da Bateria Seleccionada em Ah	170 Ah
Número de Baterias em Paralelo	3
Número de Baterias em Série	3
Número Total de Baterias	9
Capacidade Total do Banco de Baterias em Ah	510 Ah
Capacidade Total do Banco de Baterias em KWh	18,36 kWh
Profundidade Média Diária de Descarga	0,15

Para o dimensionamento do arranjo fotovoltaico são considerados inicialmente os dados de irradiação solar da localidade especificada. Os valores utilizados são disponibilizados pelo SunData, que trata-se de um programa destinado ao cálculo da radiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional disponibilizado pela CRESESB.

Tabela 2.3 – Radiação Diária Média para a cidade de Campina Grande - PB

Ângulo	Radiação Diária Média (kWh/m <sup>2</sup> .dia)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Plano Horizontal	5,47	5,39	5,31	4,83	4,42	3,86	<b>3,83</b>	5,08	5,22	5,89	<b>6,08</b>	5,69
Ângulo igual a latitude	5,25	5,27	5,31	4,95	4,63	4,07	<b>4,02</b>	5,27	5,27	5,79	<b>5,85</b>	5,43
Maior Média Anual	5,35	5,33	5,31	4,90	4,55	3,99	<b>3,94</b>	5,19	5,25	5,84	<b>5,95</b>	5,55
Maior Mínimo Mensal	4,37	4,64	4,99	5,00	4,94	4,44	<b>4,32</b>	<b>5,47</b>	5,10	5,18	4,89	4,43

**Fonte:** SunData (CRESESB)

Os dados referentes a disponibilidade solar utilizados para o dimensionamento fotovoltaico serão considerados em relação ao plano horizontal e tendo como referência o pior mês, sob o ponto de vista de radiação solar.

De posse dos dados de irradiação solar, são feitas as especificações a cerca do arranjo fotovoltaico propriamente dito, conforme é apresentada na tabela 2.4:

Tabela 2.4 – Dimensionamento do Arranjo Fotovoltaico

Dimensionamento do Arranjo Fotovoltaico	
Demanda diária total de energia	<b>3.730 Wh</b>
Eficiência da bateria (0,70 – 0,85)	<b>0,85</b>
Requisito de produção diária de energia pelo arranjo	<b>3.170 Wh</b>
Máxima tensão do módulo fotovoltaico (tensão do ponto de máxima potência x 0,85)	<b>14,96</b>
Potência garantida pelo módulo (90% da nominal no ponto de máxima potência)	<b>117 W</b>
Horas de máxima incidência (1 kWh/m <sup>2</sup> ) da radiação solar para uma dada inclinação em relação a horizontal e um dado mês	<b>3,83 horas</b>
Produção de energia por módulo e por dia	<b>448,11 Wh</b>
Efeito da temperatura na produção de energia pelo módulo, onde DF = 0,8 para climas quentes e DF = 0,9 para clima moderado	<b>313,7 Wh</b>
Número de módulos necessários	<b>10</b>
Número de módulos em série	<b>10</b>
Número de strings em paralelo	<b>1</b>
Número de módulos a serem comprados	<b>10</b>
Potência nominal do módulo fotovoltaico	<b>130 W</b>
Potência nominal do arranjo	<b>1.300 W</b>

### 2.6.6. 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.

### 2.6.7. 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.

## 2.7. 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 (THOMSOM *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/cm<sup>2</sup> a 15 kgf/cm<sup>2</sup> 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/m<sup>3</sup>, 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/cm<sup>2</sup> a 10,0 kgf/cm<sup>2</sup>. 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/m<sup>3</sup>.

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 1.000mg/L a 2.500mg/L e água de poço com concentração de 3800mg/L. A pressão máxima obtida foi de 8,2 kgf/cm<sup>2</sup>, mesmo com a grande variação de tensão em função da irradiação solar, o sistema mostrou condições técnicas de produzir 0,25 m<sup>3</sup>/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 1.000mg/L a 2.000mg/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/m<sup>3</sup>.

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.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é feita uma descrição do sistema experimental, o qual inclui o sistema de dessalinização e o sistema de geração de energia, bem como os procedimentos experimentais utilizados nesta pesquisa.

#### 3.1. Sistema Experimental

A Figura 3.1 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.

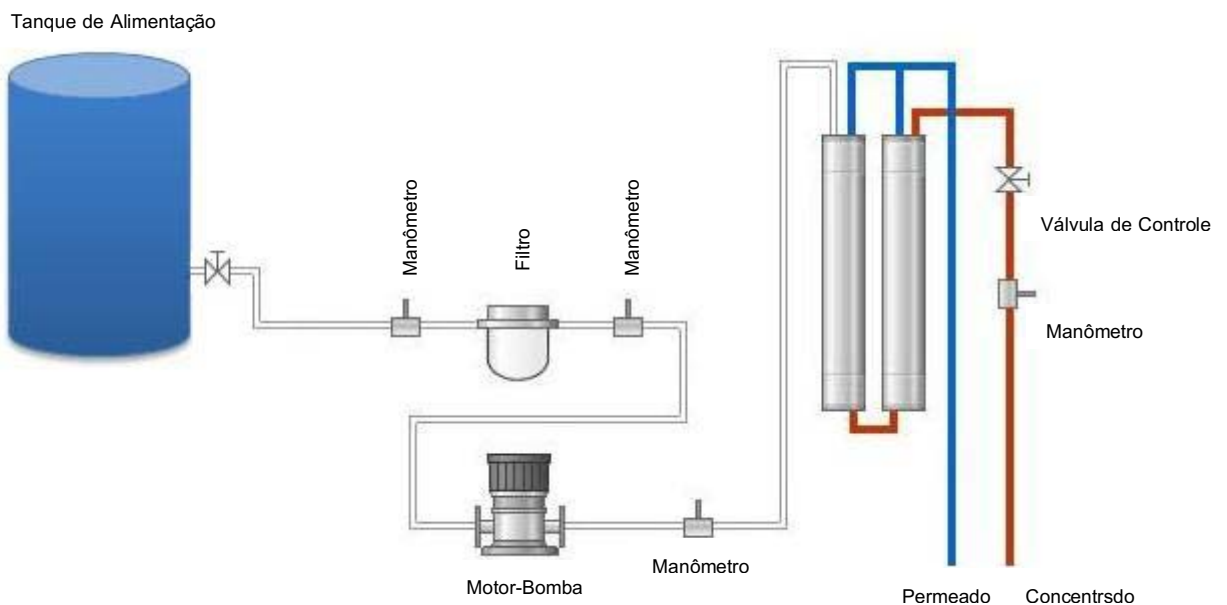


Figura 3.1 – Sistema Experimental de Dessalinização

A topologia utilizada para o bombeamento da água no sistema de dessalinização é apresentada na Figura 3.2, a qual é responsável pelo acionamento do sistema motor-bomba.

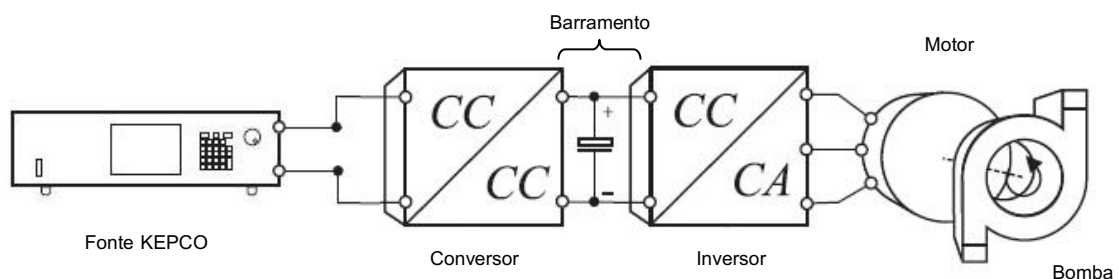


Figura 3.2 – Topologia do Sistema de Acionamento

Fonte: (VITORINO, 2008)

### 3.2.1. Sistema de Dessalinização Via Osmose Inversa

#### 3.2.1.1. 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.

#### 3.2.1.2. 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 3.1). Este motor é acoplado a uma bomba de alta pressão, os quais alimentam o sistema de osmose inversa.

Tabela 3.1 – Especificações do Motor CA *WEG*

<b>Motor <i>WEG</i> W21</b>	
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.

#### 3.2.1.3. Bomba

Para a alimentação do sistema foi utilizada uma bomba de alta-pressão da marca *PROCON* Série 5, cujas características estão descritas na (Tabela 3.2). 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/cm<sup>2</sup>), 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 3.2 – Especificações da Bomba *PROCON* (Série 5)

<b>PROCON de Alta Pressão – Série 5</b>	
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/cm<sup>2</sup> e 1 a 4 kgf/cm<sup>2</sup>), 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.

#### 3.2.1.4. 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 3.3). Estas membranas são inseridas em vasos de alta pressão ou permeador (pressão máxima de operação de 42 kgf/cm<sup>2</sup>) e estão associadas em série visando recuperar uma maior quantidade de água.

Tabela 3.3 – Especificações da Membrana de Osmose Inversa

<b>Membrana FILMTEC BW30LE-4040</b>	
Material	Compósito de poliamida
Tipo	BW30LE-4040
Configuração	Enrolado em espiral
Pressão Máxima Aplicada	42,18 kgf/cm <sup>2</sup>
Vazão Máxima de Alimentação	3,6 m <sup>3</sup> /h
Vazão Nominal do Permeado	8,7 m <sup>3</sup> /d
Temperatura Máxima de Operação	45°C
pH	2,0 – 11,0
Área Nominal da Membrana	7,6 m <sup>2</sup>
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.

### 3.2.2. 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.

### 3.2.3. 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.

## 3.3. 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.

A avaliação do sistema foi realizada através da realização de três ensaios:

- 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.
- 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/cm<sup>2</sup> 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.
- 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 e na recuperação.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

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

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

### 4.1. Caracterização do Sistema de Dessalinização

#### 4.1.1. 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 4.1 apresenta a quantidade de potência consumida pelo sistema para a circulação do fluxo de alimentação que é inteiramente convertido em corrente de concentrado.

**Tabela 4.1:** 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.

#### 4.1.2. Ensaio II

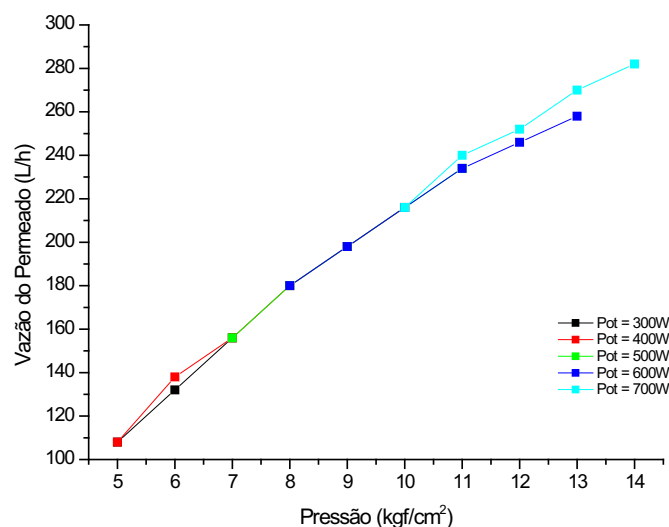
Para este ensaio foi utilizada como água de alimentação uma solução de cloreto de sódio de 2.000 mg/L e pH 6,7, sendo avaliados os comportamentos da vazão do permeado e da recuperação do sistema em função da variação da pressão de operação.

A Figura 4.1 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 kgf/cm<sup>2</sup> e 10,0 kgf/cm<sup>2</sup>, 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 kgf/cm<sup>2</sup>, com potência de entrada 700 W, sendo esta vazão de 282 L/h.

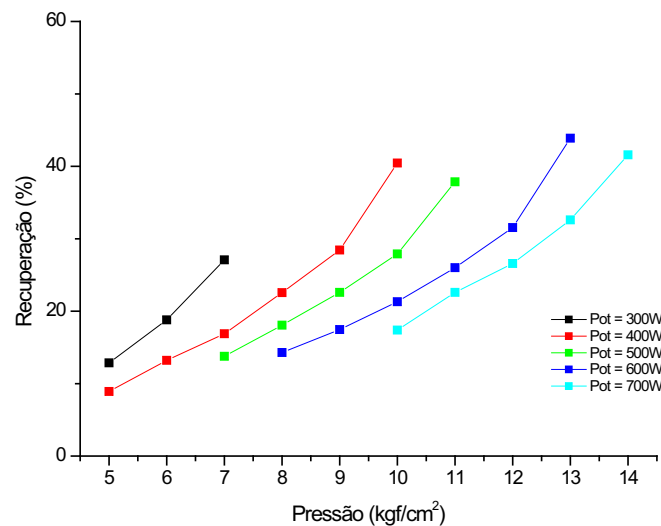


**Figura 4.1:** Variação da vazão do permeado em função da pressão, para potência de entrada fixas.

Na Figura 4.2 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 4.2 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<sup>2</sup>), 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 4.2:** Variação da recuperação do sistema em função da pressão, para potência de entrada fixas.

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2 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.

#### 4.1.3. Ensaio III

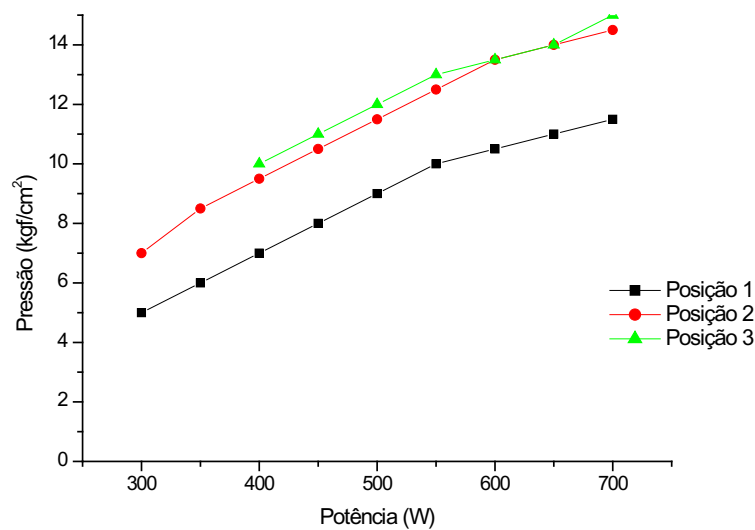
A Figura 4.3 mostra o comportamento da pressão em função da potência de entrada, para três posições distintas da válvula de controle do dessalinizador.

As posições da válvula indicam a faixa de operação da pressão do sistema, as quais são mostradas na Tabela 4.2:

**Tabela 4.2:** Faixas de operação da pressão em função da posição da válvula de controle

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

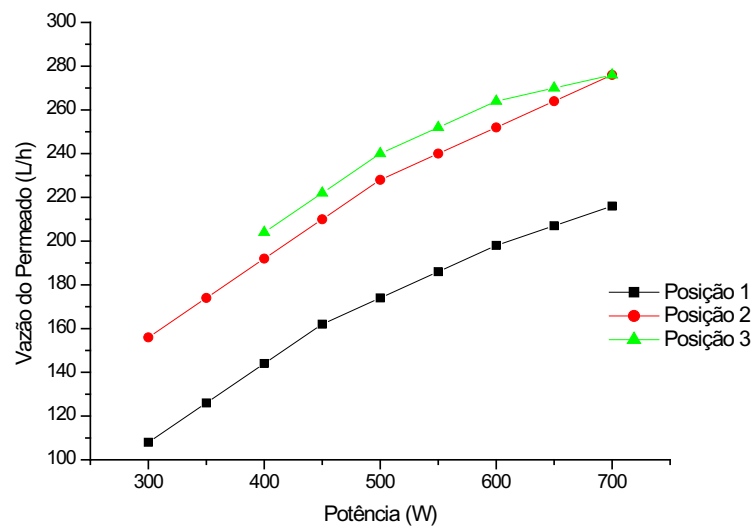
As faixas de pressão atingidas pelas diferentes posições devem-se a abertura imposta a válvula de controle, estando na posição 1 mais aberta e na posição 3 mais fechada.

**Figura 4.3:** Variação da pressão em função da potência de entrada.

A partir da Figura 4.3 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 4.3 evidencia a faixa de operação do sistema em estudo, que tem como máximo de pressão de operação 15 kgf/cm<sup>2</sup>.

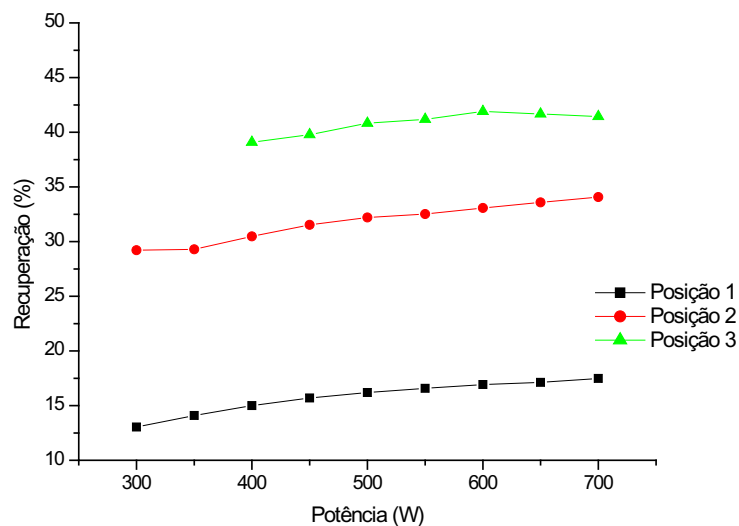
Na Figura 4.4 é apresentado o comportamento da vazão de permeado em função da potência de entrada.



**Figura 4.4:** 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 4.4 pode ser explicado de acordo com a variação na pressão de operação, apresentada na figura 4.3, já que o fluxo do permeado aumenta com o aumento da pressão

Na Figura 4.5 é apresentado o comportamento da recuperação em função da potência de entrada.



**Figura 4.5:** Variação da recuperação em função da potência de entrada.

A Figura 4.5 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.

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).

#### **4.2. Estudo da Oferta de Irradiação Solar**

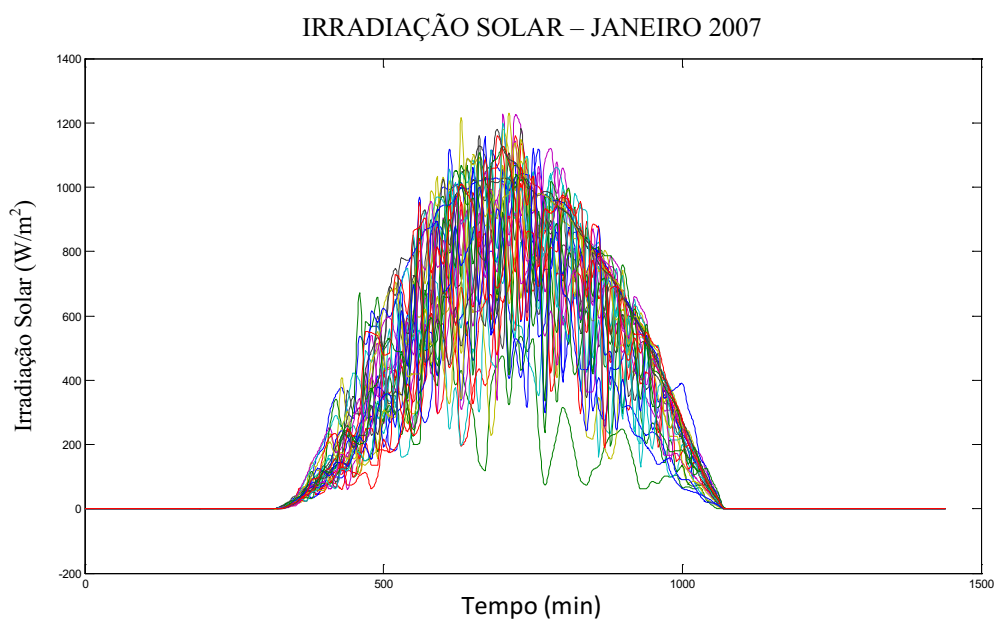
Os dados referentes ao potencial de energia solar utilizados nesta pesquisa foram disponibilizados pelo Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e definem o perfil de irradiação solar da região de Campina Grande – PB no período de Janeiro/2007 à Dezembro/2008.

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.

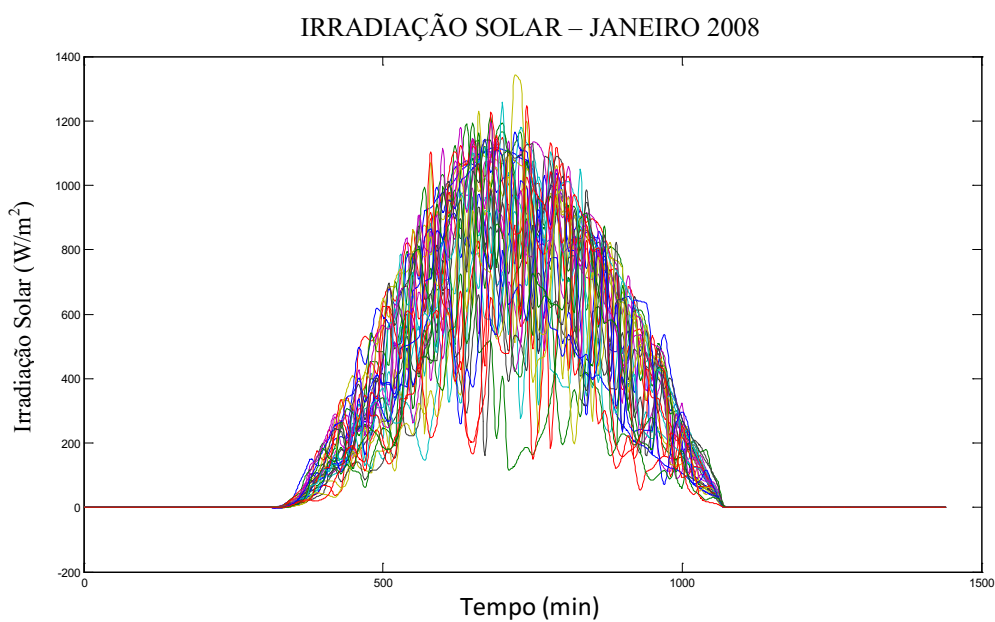
Os resultados foram apresentados graficamente através de curvas do perfil de irradiação solar diário e mensal, além de tabelas e gráficos do percentual de radiação solar mensal.

Nas Figuras 4.6 e 4.7 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  $1.300 \text{ W/m}^2$ .

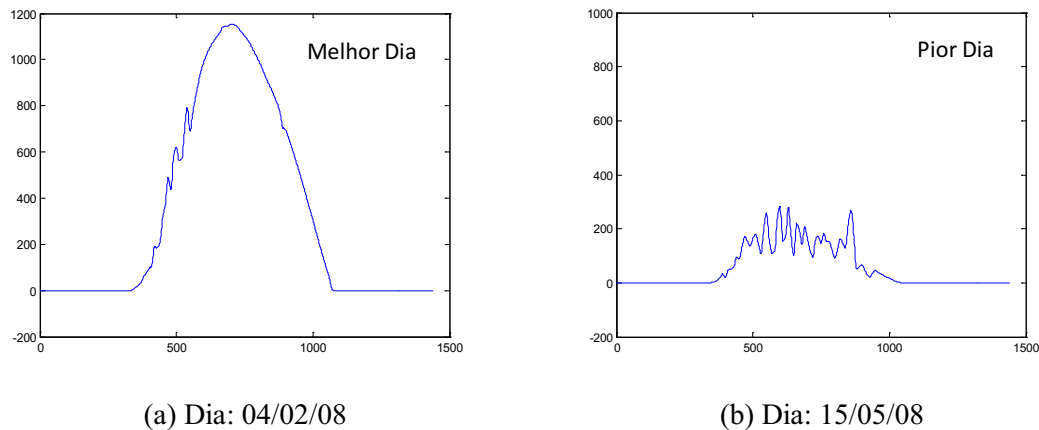


**Figura 4.6:** Perfil de irradiação diária para Janeiro/2007



**Figura 4.7:** Perfil de irradiação diária para Janeiro/2008

Nas Figuras 4.8(a) e 4.8(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.



**Figura 4.8:** Curvas tempo (min) versus irradiação solar diária ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

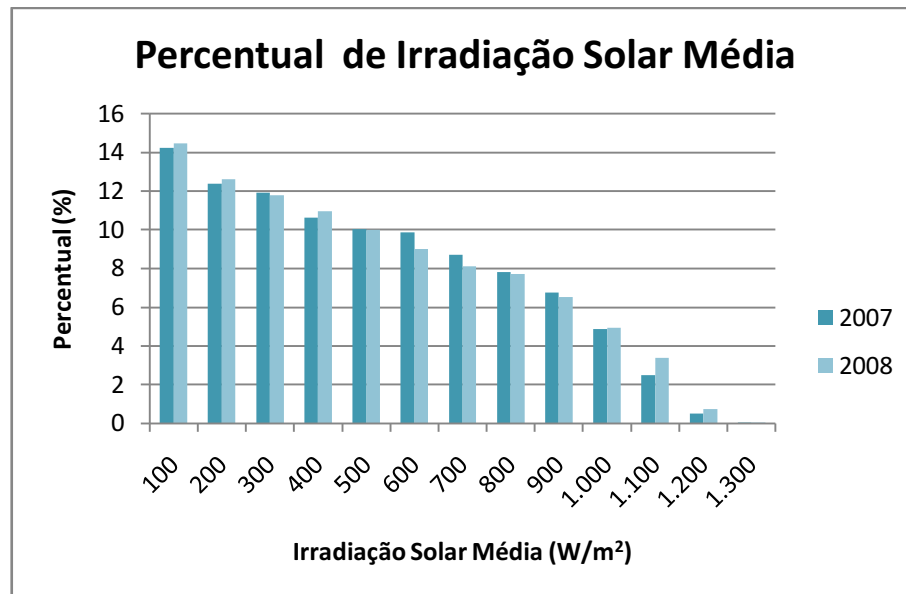
A Figura 4.8(a) mostra um perfil de insolação bastante regular, o qual permite uma distribuição de energia solar desejável e ocasiona uma operação bastante eficiente de sistemas, especialmente aqueles que não se utilizam de acumuladores de cargas (baterias), como é o caso do sistema de dessalinização utilizado nesta pesquisa.

Já a Figura 4.8(b) apresenta um perfil de irradiação bastante irregular e de baixa disponibilidade de energia solar, o qual atinge um máximo de  $250 \text{ W}/\text{m}^2$  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 4.8(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  $1.300 \text{ W}/\text{m}^2$  em intervalos regulares de  $100 \text{ W}/\text{m}^2$  e então definido o percentual de horas diárias em que a irradiação solar esteve dentro destes intervalos. A partir da figura 4.9 é possível observar a distribuição percentual da radiação solar para os anos de 2007 e 2008.



**Figura 4.9:** Percentual da irradiação solar média para os anos 2007 e 2008

A Figura 4.9 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/m<sup>2</sup> 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 m<sup>3</sup>/h. Essa afirmação em termos de oferta de energia pode ser observada com mais detalhes, na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3:** Percentual de energia solar entre (300 – 800 W/m<sup>2</sup>) para os anos de 2007 e 2008.

Mês	Percentual de Energia Solar Entre [300 – 800] W/m <sup>2</sup> (%)	
	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
<b>Total</b>	<b>58,85</b>	<b>57,41</b>

A Tabela 4.3 mostra que a soma dos percentuais de oferta de energia solar entre 300 e 800 W/m<sup>2</sup> 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 4.9, 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 em estudo, essa disponibilidade de energia solar é bastante relevante para o acionamento a partir de energia fotovoltaica.

### 4.3. Proposta 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 4.4:** Especificações do painel fotovoltaico

<b>Painel Solar – Modelo KC130-TM</b>	
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 <sup>2</sup>

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 4.5 mostra o tempo em horas em que a radiação solar esteve dentro das faixas médias estabelecidas (100 – 1.300 W/m<sup>2</sup>).

**Tabela 4.5:** Horas de irradiação solar média para o pior e melhor mês de 2008 a partir da irradiação média ofertada.

G* (W/m <sup>2</sup> )		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
		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 4.6.

**Tabela 4.6:** Potência fornecida pelos painéis a partir da irradiação média ofertada.

G (W/m <sup>2</sup> )		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1.000	1.100	1.200	1.300
Painel	Potência (W)	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
		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 4.5) e a potência fornecida (Tabela 4.6), 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/cm<sup>2</sup>
- Vazão de Alimentação: (500 – 700) L/h
- Vazão de Permeado: (200 – 300) L/h

Estas características foram estabelecidas a partir do ensaio III, 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 III 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 4.6 essa potência é fornecida a partir de uma irradiação média de 400 W/m<sup>2</sup>, a produção de água potável foi calculado para a faixa de irradiação de 400 – 1.300 W/m<sup>2</sup>.

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 4.7.

**Tabela 4.7:** Produção de água permeada.

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

Os resultados apresentados na Tabela 4.7 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.

## 5. 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.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

A. NETTO, J. L. C., **Energia Elétrica da Energia Solar**, Campina Grande – PB: SENAI, 2000.

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

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.

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

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.

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

GREENPRO. **Energia Fotovoltaica: Manual Sobre Tecnologias, Projeto e Instalação**. Portugal: 2004.

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

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.

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.

REIS, L.B.; **Geração de Energia Elétrica: Tecnologia, Inserção Ambiental, Planejamento, Operação e Análise de Viabilidade.** 3. ed. Barueri, SP: Manole, 2003..

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.

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.

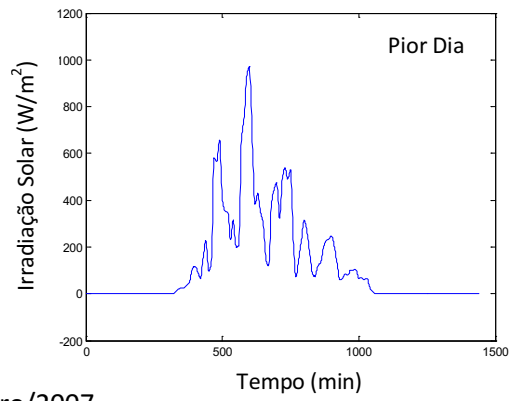
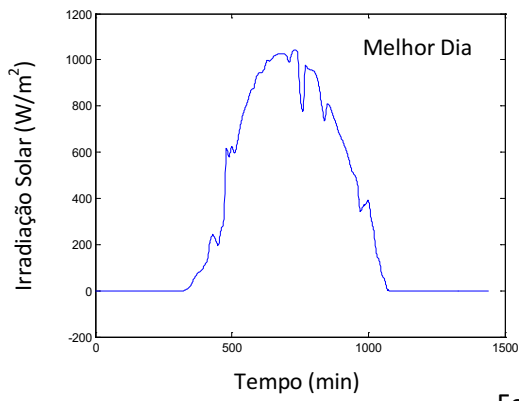
SOARES, A. K. C., **Avaliação de um Dessalinizador Via Osmose Inversa Usando Energia Solar Fotovoltaica: Estudo do Consumo Energético e Custos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFCG, Campina Grande – PB, 2008.

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

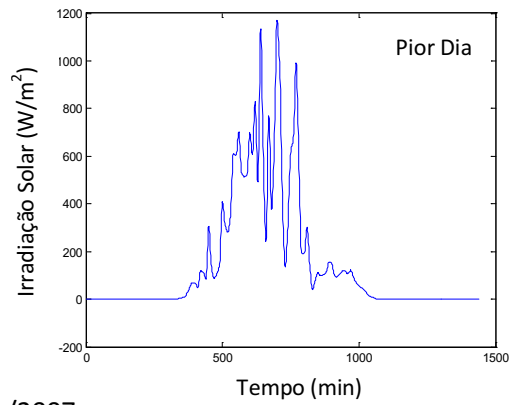
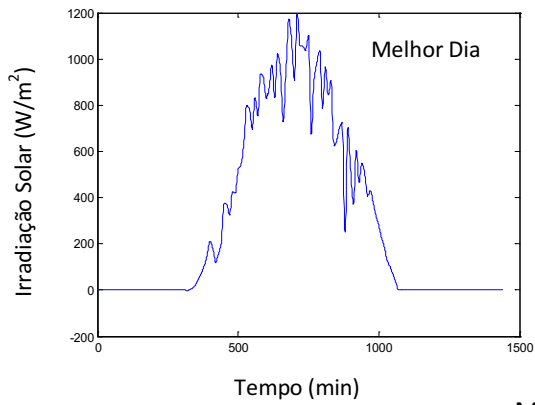
VITORINO, M. A., **Sistema de Bombeamento Fotovoltaico com Motor de Indução e sem Baterias.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), UFCG, Campina Grande – PB, 2008.

# ANEXOS

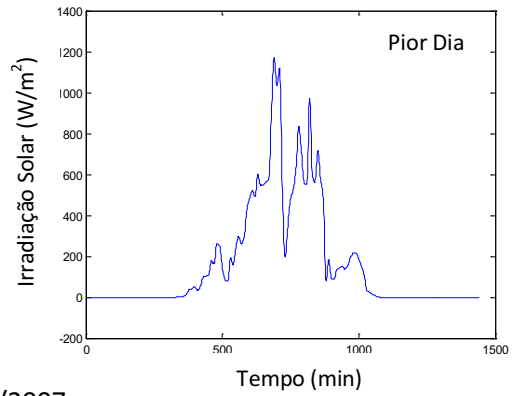
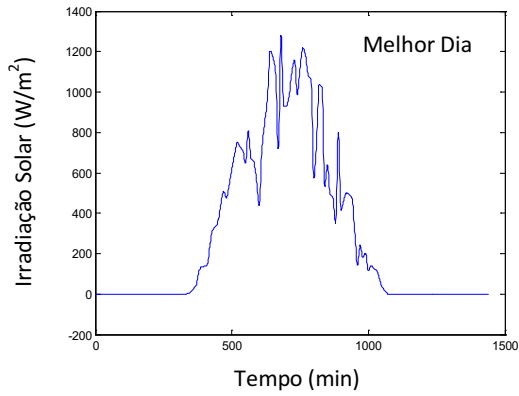
### Janeiro/2007



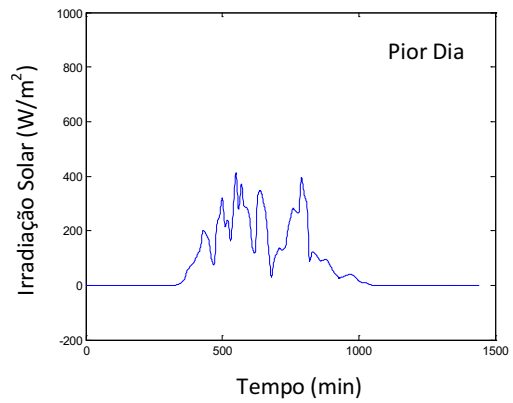
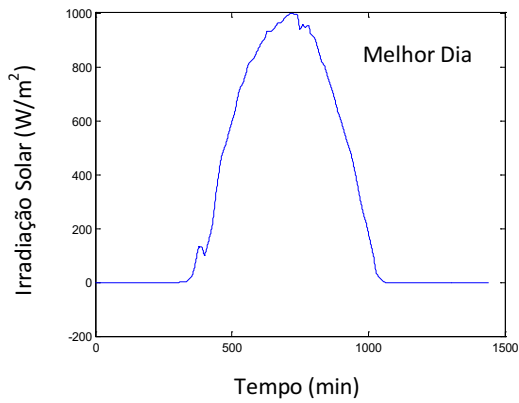
### Fevereiro/2007



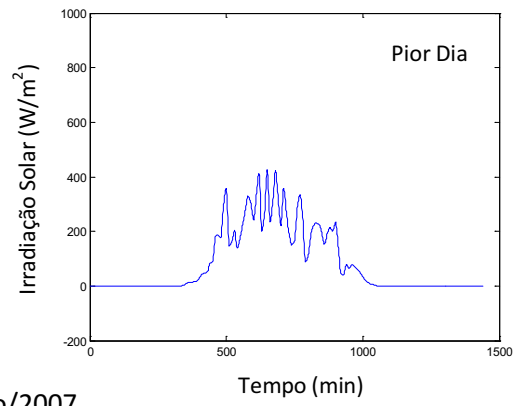
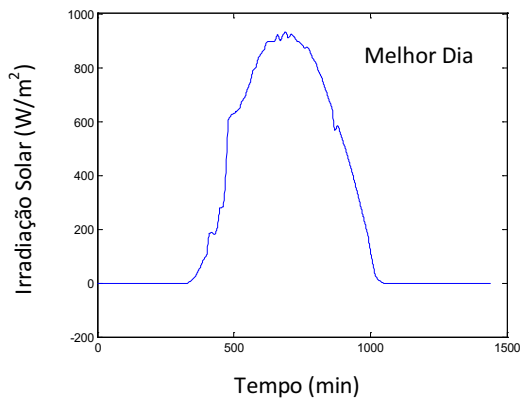
### Março/2007



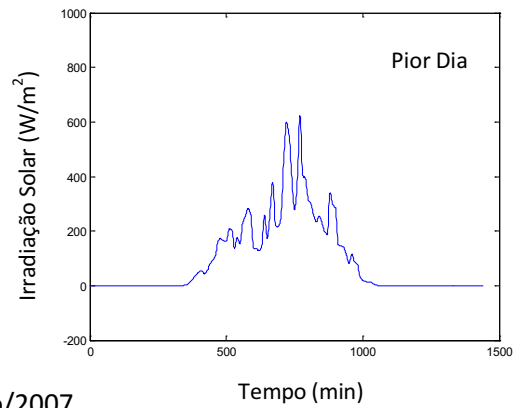
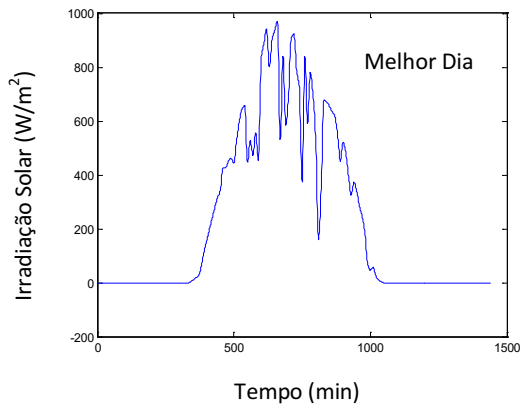
### Abril/2007



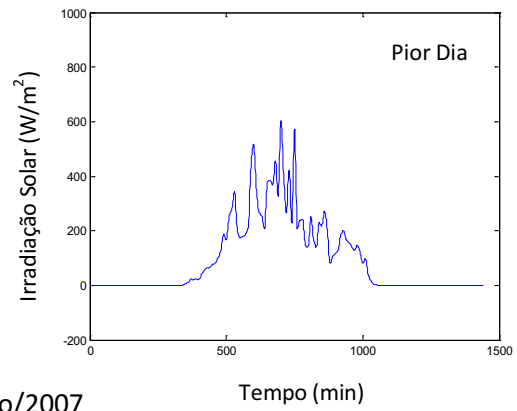
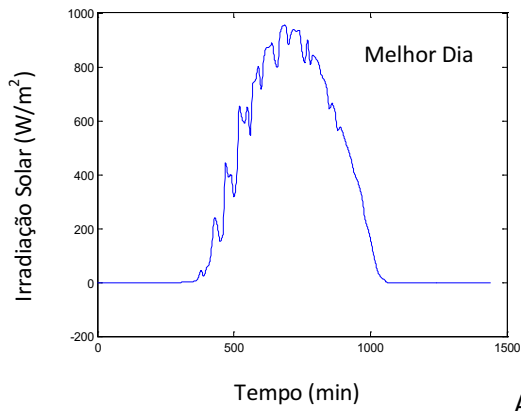
Maio/2007



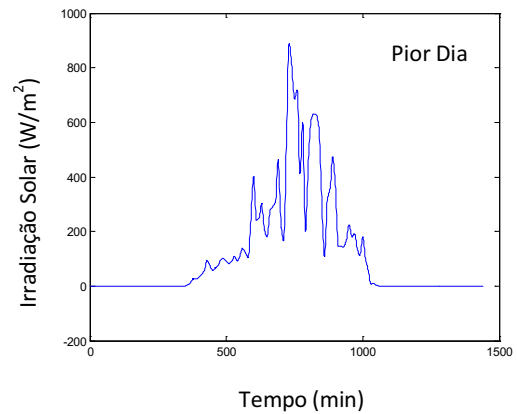
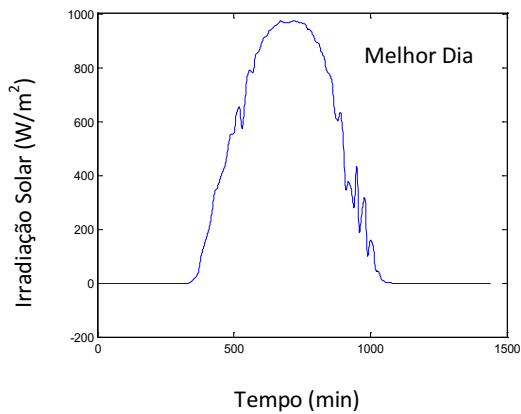
Junho/2007



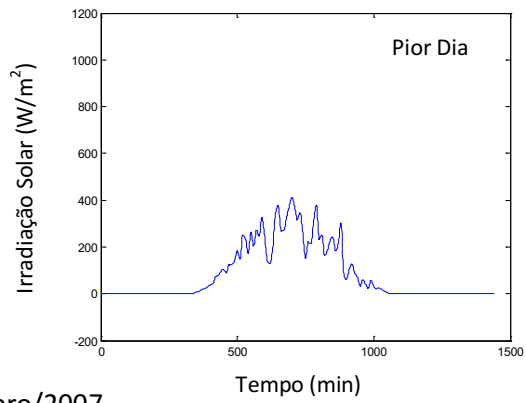
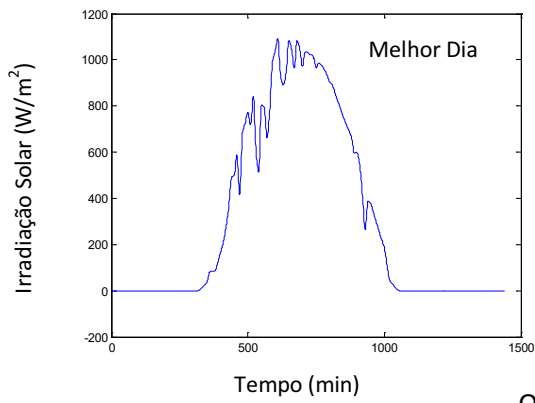
Julho/2007



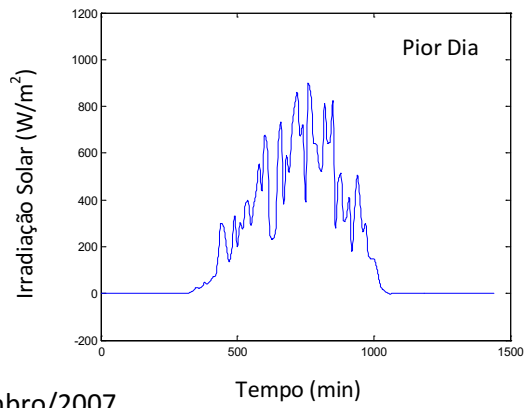
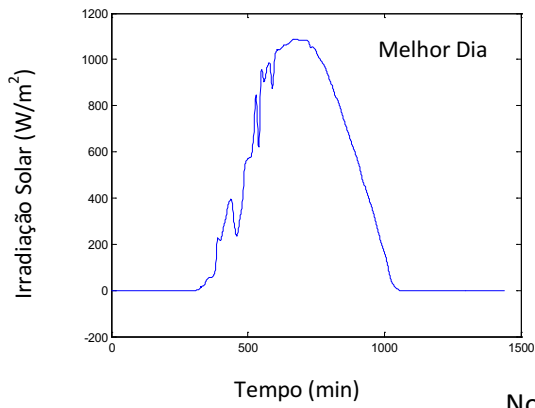
Agosto/2007



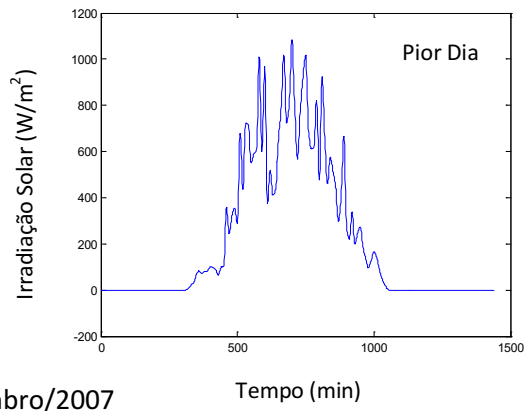
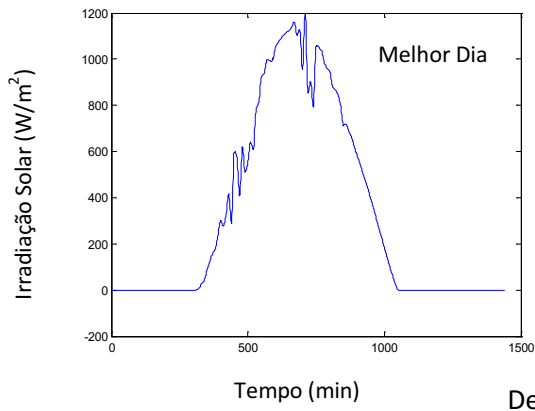
Setembro/2007



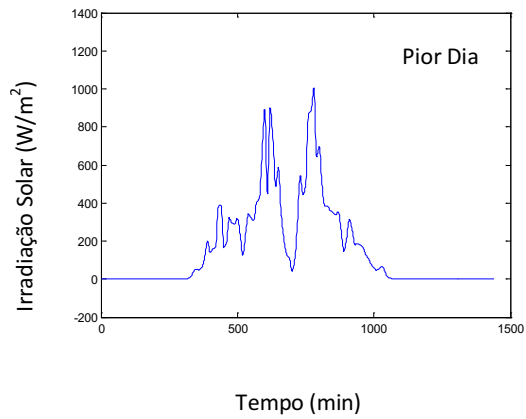
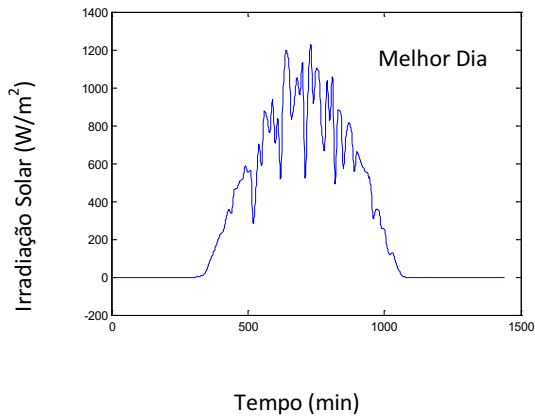
Outubro/2007



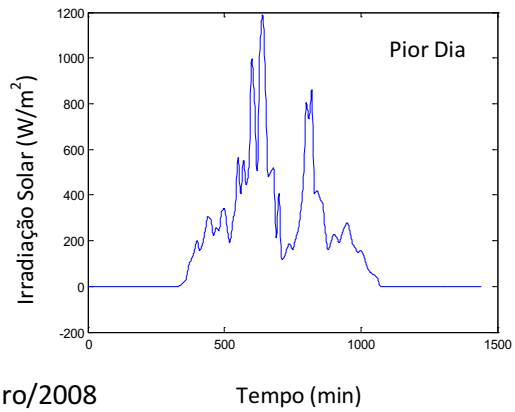
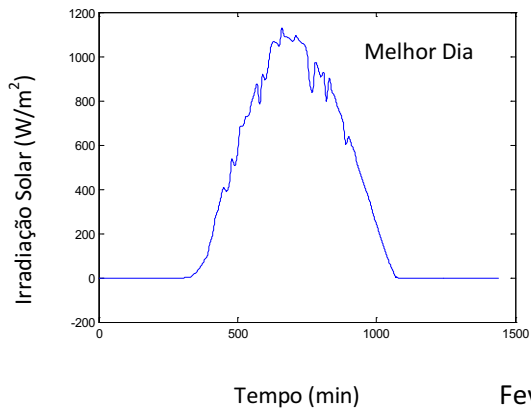
Novembro/2007



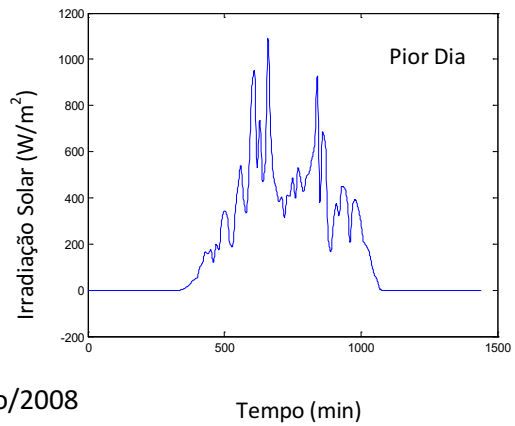
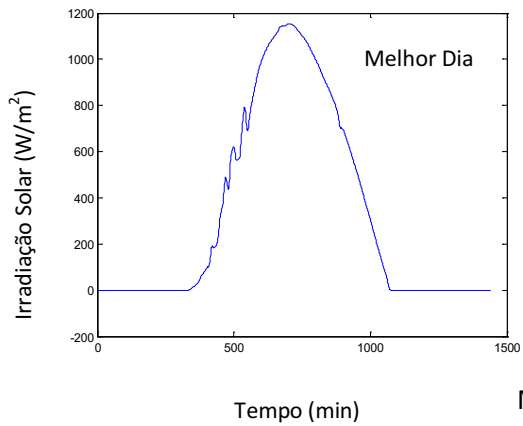
Dezembro/2007



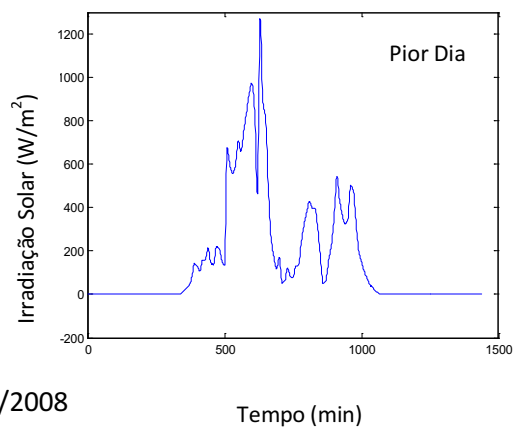
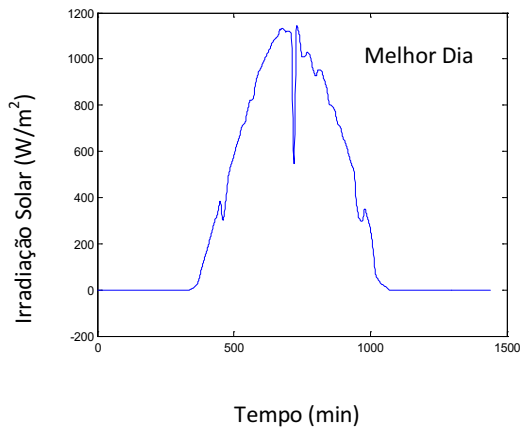
Janeiro/2008



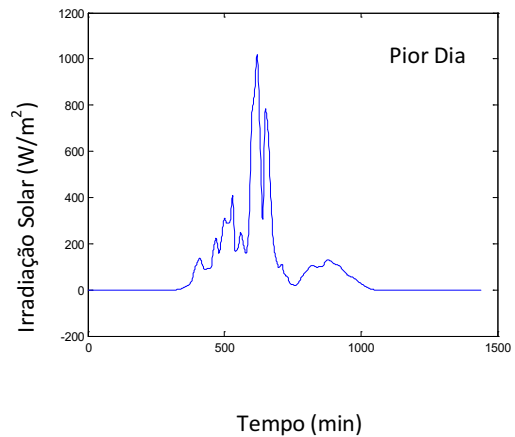
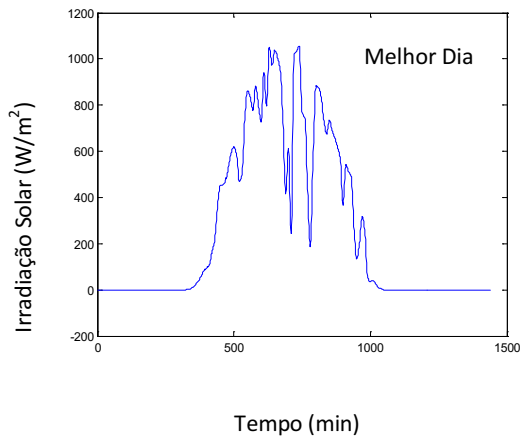
Fevereiro/2008



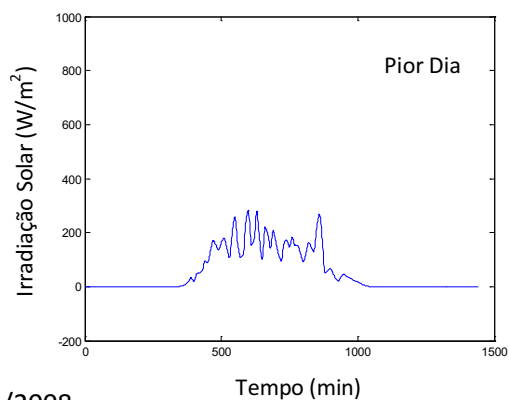
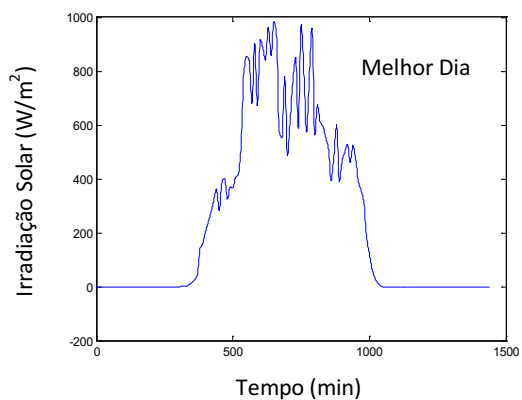
Março/2008



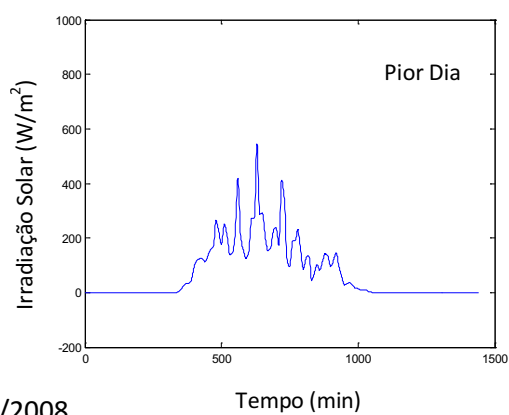
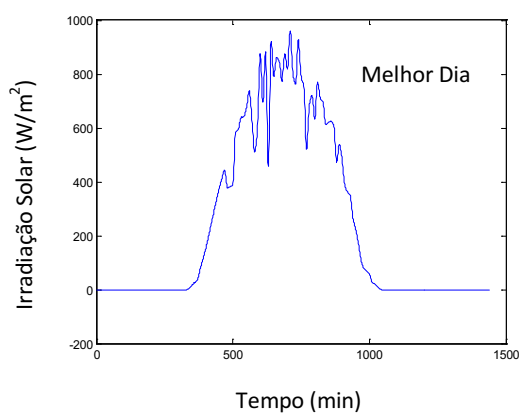
Abril/2008



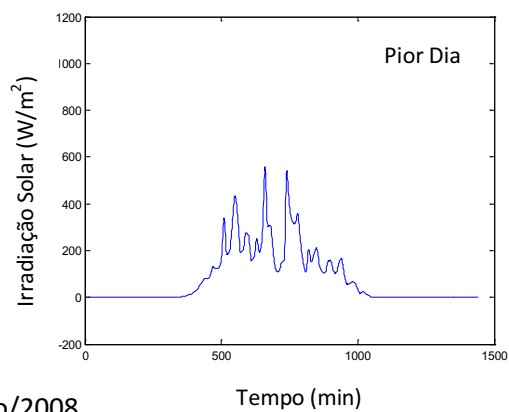
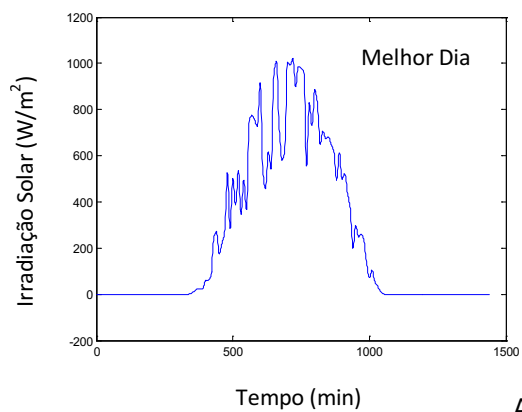
### Maio/2008



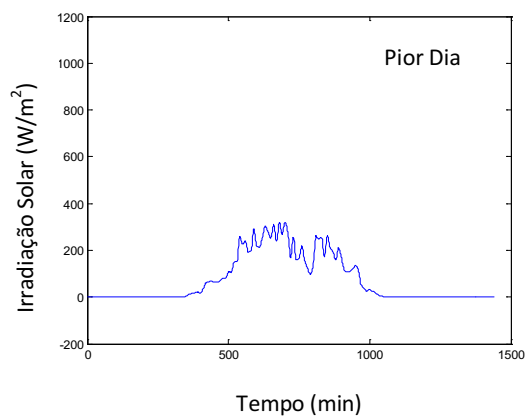
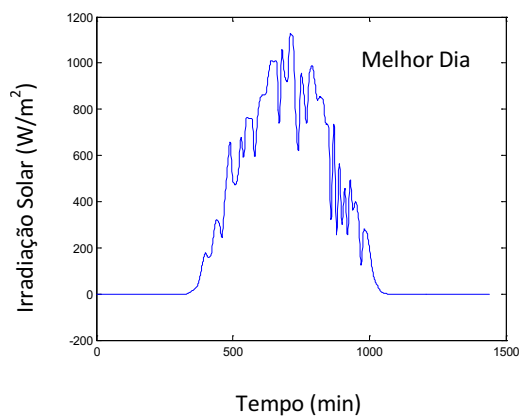
### Junho/2008



### Julho/2008

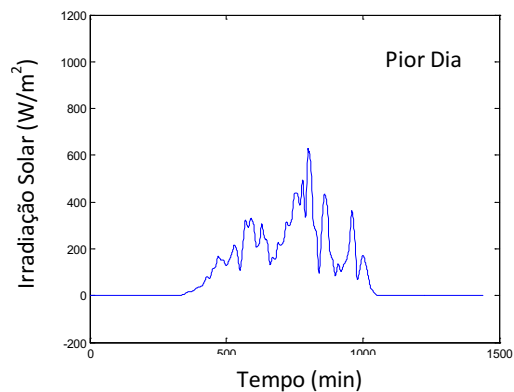
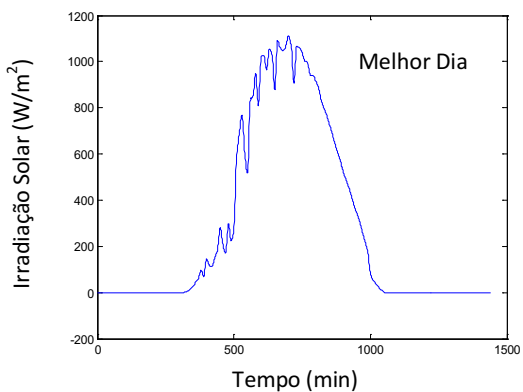


### Agosto/2008

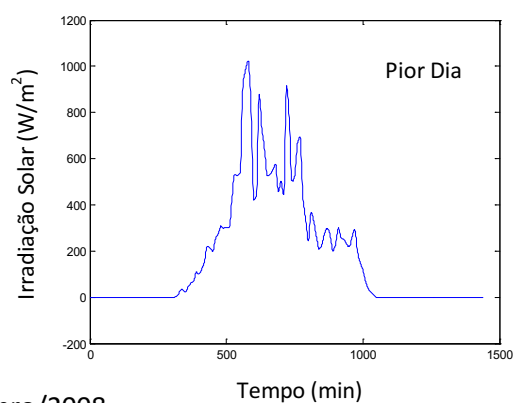
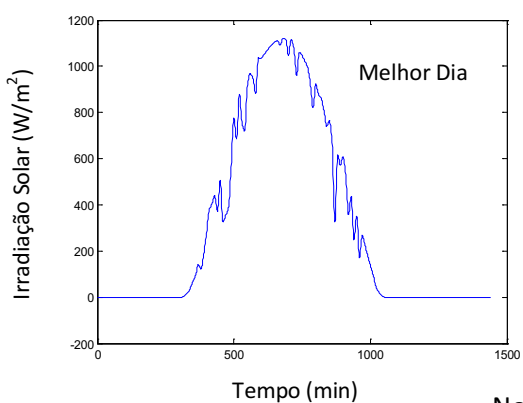




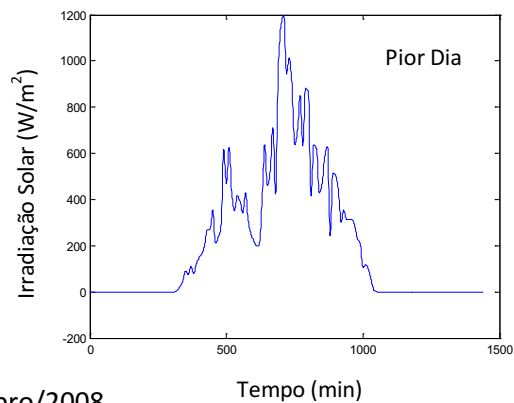
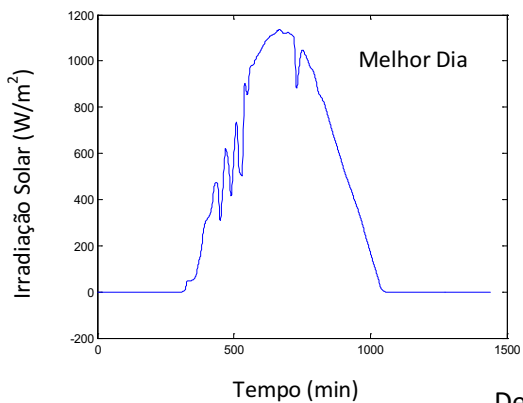
### Setembro/2008



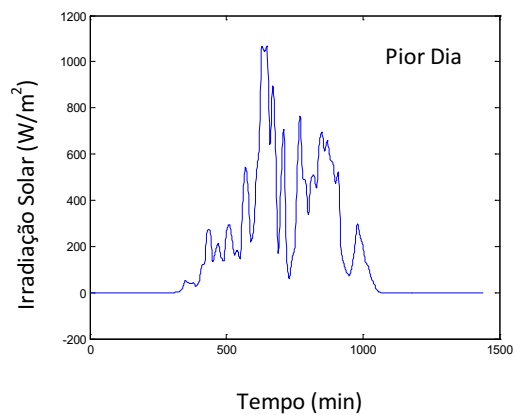
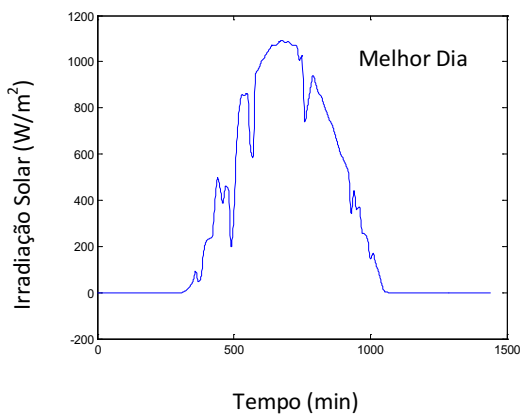
### Outubro/2008



### Novembro/2008



### Dezembro/2008



PERFIL DE IRRADIAÇÃO SOLAR – ANO 2007 E 2008

Faixas de Irradiação (W/m <sup>2</sup> )	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
<b>2007</b>	<b>14,20</b>	<b>12,37</b>	<b>11,9</b>	<b>10,6</b>	<b>10,02</b>	<b>9,86</b>	<b>8,68</b>	<b>7,79</b>	<b>6,74</b>	<b>4,84</b>	<b>2,46</b>	<b>0,47</b>	<b>0,02</b>

PERFIL DE IRRADIAÇÃO SOLAR – ANO 2008

Faixas de Irradiação (W/m <sup>2</sup> )	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
<b>2008</b>	<b>14,44</b>	<b>12,59</b>	<b>11,75</b>	<b>10,93</b>	<b>9,97</b>	<b>8,97</b>	<b>8,08</b>	<b>7,71</b>	<b>6,51</b>	<b>4,91</b>	<b>3,37</b>	<b>0,7</b>	<b>0,02</b>

IRRADIAÇÃO MENSAL MÉDIA – 2007 E 2008

Irradiação Média (W/m <sup>2</sup> )	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
<b>2007</b>	<b>14,20</b>	<b>12,37</b>	<b>11,9</b>	<b>10,6</b>	<b>10,02</b>	<b>9,86</b>	<b>8,68</b>	<b>7,79</b>	<b>6,74</b>	<b>4,84</b>	<b>2,46</b>	<b>0,47</b>	<b>0,02</b>
<b>2008</b>	<b>14,44</b>	<b>12,59</b>	<b>11,75</b>	<b>10,93</b>	<b>9,97</b>	<b>8,97</b>	<b>8,08</b>	<b>7,71</b>	<b>6,51</b>	<b>4,91</b>	<b>3,37</b>	<b>0,7</b>	<b>0,02</b>

<b>ENSAIO I – VÁLVULA ABERTA</b>		
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 <sup>2</sup> )	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<sub>a</sub>: Pressão de Alimentação  
Q<sub>a</sub>: Vazão de Alimentação

Q<sub>p</sub>: Vazão de Permeado  
r: Recuperação

Q<sub>c</sub>: Vazão de Concentrado  
κ: Condutividade Elétrica

**ENSAIO II – SIMULAÇÃO**

Alimentação: 2000 PPM

Potência (W)	Pa (kgf/cm <sup>2</sup> )	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: Pa: Pressão de Alimentação  
Qa: Vazão de Alimentação

Qp: Vazão de Permeado  
r: Recuperação

Qc: 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 <sup>2</sup> )	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<sub>a</sub>: Pressão de Alimentação

Q<sub>a</sub>: Vazão de Alimentação

Q<sub>p</sub>: Vazão de Permeado

r: Recuperação

Q<sub>c</sub>: Vazão de Concentrado

κ: Condutividade Elétrica