



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UMA MOTOBOMBA
DE SUPERFÍCIE ACIONADA POR UM MOTOR CA
INDUÇÃO TIPO *SHADED POLE* ALIMENTADO POR
PAINEL FOTOVOLTAICO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Wilson Antônio Barin

Santa Maria, RS, Brasil.

2012

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UMA MOTOBOMBA DE
SUPERFÍCIE ACIONADA POR UM MOTOR CA INDUÇÃO
TIPO *SHADED POLE* ALIMENTADO POR PAINEL
FOTOVOLTAICO**

Wilson Antônio Barin

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Água e Solos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola.**

Orientador: Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva

Santa Maria, RS, Brasil.

2012

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Barin, Wilson Antônio
ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UMA MOTOBOMBA DE SUPERFÍCIE
ACIONADA POR UM MOTOR CA INDUÇÃO TIPO SHADED POLE
ALIMENTADO POR PAINEL FOTOVOLTAICO / Wilson Antônio
Barin.-2012.
82 p.; 30cm

Orientador: João Batista Dias de Paiva
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2012

1. Energia solar. 2. Bombeamento fotovoltaico. 3.
Motor CA-Shaded Pole. 4. Meio Rural. I. Paiva, João
Batista Dias de II. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UMA MOTOBOMBA DE
SUPERFÍCIE ACIONADA POR UM MOTOR CA INDUÇÃO TIPO
SHADED POLE ALIMENTADO POR PAINEL FOTOVOLTAICO**

elaborada por
Wilson Antônio Barin

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Agrícola

COMISSÃO EXAMINADORA:

João Batista Dias de Paiva, Prof. Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Ademar Michels, Prof. Dr.

Daniela Guzzon Sanagiotto, Profa. Dra. (UFSM)

Santa Maria, 29 de março de 2012.

AGRADECIMENTOS

A Deus por iluminar sempre nossos caminhos, nos dar esperanças e forças para realizarmos os nossos sonhos e trabalhos.

Ao Professor Dr. João Batista Dias de Paiva que, com sua sabedoria e orientação, possibilitou-me a realização desta dissertação.

Aos Professores dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Engenharia Civil, Engenharia Elétrica e Engenharia de Produção, que me transmitiram informações precisas para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos funcionários, Anacleto Brondani, tecnólogo em Eletrônica e Eletricidade e Alcides Sartori, Hidrometrista e tecnólogo em Edificações, que me auxiliaram nas medições do Painel Fotovoltaico e da Motobomba, dispositivos estes usados no presente trabalho.

Aos meus familiares que souberam entender as minhas ausências para que eu pudesse realizar este Mestrado.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UMA MOTOBOMBA DE SUPERFÍCIE ACIONADA POR UM MOTOR CA INDUÇÃO TIPO *SHADED POLE* ALIMENTADO POR PAINEL FOTOVOLTAICO.

AUTOR: WILSON ANTÔNIO BARIN
ORIENTADOR: JOÃO BATISTA DIAS DE PAIVA
DATA E LOCAL DA DEFESA: SANTA MARIA, 29 DE MARÇO DE 2012.

O presente trabalho tem por finalidade determinar o comportamento e a viabilidade técnica e energética de um sistema de bombeamento fotovoltaico utilizando uma bateria do tipo chumbo-ácido, estacionária ou usada em veículos automotores, alimentada por um painel fotovoltaico. A bateria fornecerá energia elétrica para um motor elétrico CA, tipo *Shaded Pole*, que por sua vez acionará uma bomba centrífuga de superfície. A transformação da CC da bateria em CA, para alimentar o motor da bomba, se dará através de um Inversor CC-CA, 12/220 V. A tensão elétrica aplicada na bateria, pelo painel, será monitorada por um Controlador de Carga Solar. O conjunto motobomba será de fabricação brasileira, de modo a facilitar a aquisição, reposição e montagem do sistema proposto. A quantidade de água diária a ser bombeada pelo sistema dependerá da radiação solar do local, das horas em que o painel alimentará a bateria, da altura manométrica e da potência da motobomba. A partir da avaliação deste sistema de bombeamento em questão, com a motobomba alimentada pela luz solar que incide no painel fotovoltaico e pela bateria, será possível determinar o volume de água bombeado e como este será utilizada em pequenas propriedades rurais ou assentamentos, visando atender as diversas necessidades destas localidades, como irrigação de produtos hortigranjeiros, consumo humano, animal (bebedouro), entre outros.

Palavras-chave: Energia solar. Bombeamento fotovoltaico. Motor CA-*Shaded Pole*. Meio Rural.

ABSTRACT

Master's Dissertation
Post Graduation Program in Agricola Engineering
Federal University of Santa Maria

ANALYSIS OF A CENTRIFUGAL SURFACE PUMP SUPPORTED BY A SHADED POLE AC MOTOR CONNECTED TO PHOTOVOLTAIC PANEL

AUTHOR: WILSON ANTÔNIO BARIN
TUTOR: JOÃO BATISTA DIAS DE PAIVA
DATE AND PLACE OF DEFENSE: SANTA MARIA, MARCH, 29TH, 2012.

The proposed work evaluates the technical viability of a photovoltaic pumping system and presents the main characteristics of the system application. The pumping system uses a lead acid battery and a photovoltaic panel. The battery supplies energy to an alternating current motor, namely Shaded Pole, which feeds the centrifugal surface pump. The energy from the battery is changed to AC voltage by a DC-AC inverter, 12/220 V. The voltage level applied on this battery is monitored by a load controller (solar power regulator). The whole proposed system is made in Brazil, which facilitates the purchase, alteration and building of the system. The amount of water pumped is related to the solar radiation, the solar exposition period, the manometric height and the pumping power. By evaluating the proposed system is possible to find the volume of pumped water and how this amount will be applied at small rural municipalities, as human and animal water consumption, irrigation, among others.

Keywords: Solar Energy. Photovoltaic pumping. Motor AC - Shaded Pole. Rural municipalities.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Uso da tecnologia fotovoltaica em uma Estação Meteorológica.	14
Figura 2 – Diagrama de uma Célula Fotovoltaica.....	25
Figura 3 – Painel com células de silício monocristalino.	26
Figura 4 – Painel com células de silício policristalino.	27
Figura 5 – Painel com célula de silício amorfo.	27
Figura 6 – Painel fotovoltaico e Caixa de água.	38
Figura 7 – Motobomba de superfície em um flutuador e tubulação de recalque.	39
Figura 8 – Sistema de bombeamento CC isolado com armazenamento de energia (bateria) - Modo Indireto.	41
Figura 9 – Sistema de bombeamento fotovoltaico com caixa de água elevada.	41
Figura 10 – Motobomba com motor CA – Dimensões: 21 x 10 cm.	43
Figura 11 – Vista com detalhe do estator do Motor de CA indução Shaded Pole.	47
Figura 12 – Exemplo de configuração de um inversor CC-CA (12V-127V).....	48
Figura 13 – Caixa de água para irrigação por gotejamento.	55
Figura 14 – Gotejador com múltiplas saídas.	55
Figura 15 – Motobomba CA, monofásica com acessórios.....	58
Figura 16 – Instrumentos de medições usados no motor CA da bomba.	59
Figura 17 – Instalação experimental do bombeamento fotovoltaico.....	61
Figura 18 – Motobomba, sem acessórios na saída, reposicionada na plataforma.	62
Figura 19 – Gráfico com a curva da motobomba com dados obtidos na segunda simulação. .	65
Figura 20 – Medição do desempenho do painel fotovoltaico com o circuito montado.	67
Figura 21 – Dados da motobomba CA.	72
Figura 22 – Foto da Placa de Identificação com dados do painel fotovoltaico usado no sistema de bombeamento.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre os sistemas de bombeamento de água existentes no Brasil.....	21
Tabela 2 – Custos diretos de fabricação de módulos (painéis) fotovoltaicos – US\$/Wp.....	40
Tabela 3 – Resultados parciais dos testes da motobomba CA, em operação.....	46
Tabela 4 – Primeira simulação. Resultado dos testes da motobomba CA.	61
Tabela 5 – Resultado dos testes do Painel fotovoltaico. 68 Wp. (Dia 01/11/2011).....	68
Tabela 6 – Média anual mensal de Radiação Solar em Santa Maria. – Ano 2008.....	69
Tabela 7 – Valores diários dados em Wh/m ² , em Santa Maria. – Janeiro de 2011.....	69
Tabela 8 – Média mensal e anual de Radiação Solar Global em Santa Maria. – Ano 2011....	70

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.

CEPEL	– Centro de Pesquisas de Engenharia Elétrica.
ANEEL	– Agência Nacional de Energia Elétrica.
MME	– Ministério de Minas e Energia.
MCT	– Ministério de Ciência e Tecnologia.
NREL	– National Renewable Energy Laboratory.
IBGE	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
PRODEEM	– Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios.
PROINFA	– Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia Elétrica.
PUCRS	– Pontífice Universidade Católica do Rio Grande do Sul.
PNAD	– Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
PROÁLCOOL	– Programa Nacional do Alcool.(BR).
UEMG	– Universidade Estadual de Minas Gerais.
UFPA	– Universidade Federal do Pará.
UFRJ	– Universidade Federal do Rio de Janeiro.
UFSC	– Universidade Federal de Santa Catarina.
UFPE	– Universidade Federal de Pernambuco.
UFSM	– Universidade Federal de Santa Maria.
Km/h	– Quilômetros por hora.
m/s	– Metros por segundo
kW	– Quilo-Watt. = 1.000 W.
kWh	– Quilo-Watt-hora.
MWh	– Mega-Watt-hora
MW	– Mega-Watt. = 1.000.000 W ou 1.000 kW.
A	– Ampère
W	– Watt.
V	– Volt.
VA	– Volt-Ampère.
Voc	– Tensão elétrica a vazio (sem carga).
Isc	– Corrente de curto circuito.
Ip	– Corrente de partida (quando o motor elétrico entra em funcionamento)
In	– Corrente nominal (quando o motor elétrico atinge a rotação máxima)

l/dia	– Litro por dia.
l/h	– Litro por hora.
l/min	– Litro por minuto.
l/s	– Litro por segundo.
m ³ /s	– Metros cúbicos por segundo.
Wp	– Watt pico.
W/m ²	– Watt por metro quadrado.
kWh/m ²	– Quilo-watt-hora por metro quadrado.
MJ/ m ²	– Mega Joule por metro quadrado.
kJ / m ²	– Quilo Joule por metro quadrado.
CC	– Corrente Contínua.
CA	– Corrente Alternada.
FV	– Fotovoltaico.
mca	– Metros de coluna de água.
US\$	– Moeda americana (Dólar).
R\$	– Moeda brasileira (Real).

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	12
1.1 Introdução	12
1.2 Objetivos.....	14
1.2.1 Objetivos gerais	14
1.2.2 Objetivos Específicos	15
CAPÍTULO II – JUSTIFICATIVAS E CONCEITUALIZAÇÃO BÁSICA.....	16
2.1 Justificativa	16
2.2 Energia Solar	18
2.3 A Energia Solar e a Agricultura.....	20
2.4 Bombeamento de água	20
CAPÍTULO III – CÉLULAS E PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	24
3.1 Introdução às Células Fotovoltaicas	24
3.1.1 Célula de silício monocristalino	25
3.1.2 Células de Silício Policristalino.....	26
3.1.3 Células de Silício Amorfo	27
3.1.4 Células de Filme Fino.....	28
3.2 Funcionamento das Células Fotovoltaicas	29
3.3 Painéis solares fotovoltaicos.....	29
3.4 Operação de painéis fotovoltaicos	31
3.5 Medição da Radiação Solar	34
CAPÍTULO IV – PROCESSOS DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO	35
4.1 Introdução ao Bombeamento Fotovoltaico	35
4.2 Configurações de Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico.....	40
4.3 Tipos de Bomba de Recalque.....	42
4.3.1 Bomba de diafragma.....	42
4.3.2 Bomba centrífuga	42
4.3.3 Bomba vibratória	44
4.3.4 Potência hidráulica das bombas de recalque	44
4.4 Motores Elétricos utilizados nos Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico.....	44
4.5 Inversores CC-CA	47

4.6 Armazenamento de Energia	49
4.7 Baterias	50
4.8 Controladores de carga	52
CAPITULO V – APROVEITAMENTO DA ÁGUA BOMBEADA PELOS SISTEMAS FOTVOLTAICOS: METODOLOGIA E APLICAÇÃO PRÁTICA.....	54
5.1 Introdução	54
5.1.1 Consumo humano e/ou saneamento básico	54
5.1.2 Irrigação ou Fertirrigação	54
5.1.3 Bebedouros	56
5.2 Procedimentos experimentais para a avaliação do sistema de bombeamento fotovoltaico	56
5.3 Avaliação Experimental	58
5.3.1 Desempenho da motobomba	58
5.3.1.1 Primeira simulação	59
5.3.1.2 Segunda simulação	62
5.3.1.3 Terceira Simulação	64
5.3.1.4 Traçado da curva vazão X altura manométrica	64
5.3.2 Desempenho do painel fotovoltaico	66
5.3.3 Radiação Solar	69
CAPITULO VI – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS E ORÇAMENTOS	71
6.1 Comparação de Resultados.....	71
6.1.1 Motobomba.....	71
6.1.2 Painel fotovoltaico.....	73
6.1.3 Aproveitamento da água bombeada	74
6.1.4 Orçamento	74
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Introdução

A crise energética na década de 1970, de repercussão mundial, foi causada pelo embargo ao fornecimento de petróleo aos Estados Unidos e aos países europeus, imposto pelas nações árabes, considerando a errônea previsão de que o mesmo se esgotaria na virada do século. Começou-se então a pensar em outras fontes de energia, que substituíssem o petróleo e que fossem, de preferência, renováveis. Estas fontes foram denominadas: Fontes Alternativas de Energia. O impulso inicial que as Fontes Renováveis de Energia tiveram foi em função do racionamento e do boicote no fornecimento de gasolina somado aos altos preços que o petróleo alcançou naquela época. O primeiro projeto criado no Brasil de incentivo à utilização de Fontes Alternativas de Energia Renovável foi o PROÁLCOOL, existente até hoje.

Atualmente, tem-se um novo estímulo para o uso das fontes renováveis em função do vislumbamento do esgotamento de fontes convencionais que geram energia elétrica, devido ao aumento de consumo provocado pelo crescimento da população e da economia. A utilização de recursos fósseis para a geração de energia, especialmente as usinas térmicas, é reconhecidamente danosa ao meio ambiente. A elevada emissão de gases para a atmosfera tem como consequência o aquecimento global e o efeito estufa, contribuindo para alteração do clima na Terra e provocando grandes prejuízos na produção agrícola mundial. A implantação de usinas hidrelétricas causa alagamento em grandes áreas de terras férteis que poderiam ser usadas para a produção de alimentos, deslocam multidões e, além disso, dependem das chuvas.

As formas de energia que substituirão os combustíveis fósseis têm que estar diretamente relacionadas com a sustentabilidade e, evidentemente, diminuir a atual degradação ambiental. O desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer as necessidades das gerações futuras. Sob este ângulo, a utilização de fontes renováveis de energia, merece atenção especial (SACHS, 2007).

Outro alento para o uso desta energia eficiente e ambientalmente benigna vem da Organização Mundial da Saúde (OMS), que adverte para o uso, manejo e consumo

sustentáveis das fontes de energia para evitar a contaminação ambiental e respeitar os limites recomendáveis.

Uma voz que se fez ouvir cedo e globalmente foi a do político alemão Hermann Scheer, um dos formuladores da Lei das Energias Renováveis da Alemanha, que se transformou em modelo para 47 nações. Só entre 2006 e 2008, os investimentos anuais globais em busca dessas novas fontes duplicaram de US\$ 63 bilhões para US\$ 120 bilhões. A capacidade mundial das fazendas de moinhos eólicos saltou de 74.000 MW, em 2006, para 135.000 MW em 2009. As instalações de redes fotovoltaicas, mais que triplicaram, passando de 5.100 MW, para 19.000 MW, neste mesmo período. As fontes renováveis trazem a esperança de um abastecimento de energia garantido, seguro e de longo prazo. Elas representam uma promessa social muito superior ao das energias fósseis e atômicas (EDINGER, R., SANJAY, K).

A recente catástrofe nas Usinas Nucleares do Japão, devido a terremotos, no início de 2011, reacendeu a discussão sobre fontes alternativas de energia e levou muitos países a reconsiderar sua utilização.

A geração de energia elétrica através do aproveitamento solar no meio rural, principal objetivo deste trabalho, além de eletricidade para iluminação, pode proporcionar o devido suprimento de água, para consumo humano e/ou animal, saneamento básico, beneficiamento de produtos, desenvolvimento da agropecuária, etc. Atualmente, onde existem redes elétricas, o uso da energia solar ainda tem o custo relativamente elevado, se comparado à energia fornecida diretamente pela concessionária, mas em regiões remotas sem redes, em especial no meio rural, ainda é viável.

Com relação ao potencial de utilização da energia fotovoltaica, embora o custo de implantação seja alto, não podemos deixar de levar em consideração, que sua vida útil é de aproximadamente 30 anos, a manutenção do sistema é reduzida, em comparação as demais tecnologias renováveis, e a energia solar é um recurso primário energético não esgotável e grátis (GALDINO, 2003).

A figura 1 mostra uma Estação Meteorológica, afastada das redes elétricas, alimentada de energia elétrica através de Painéis Fotovoltaicos que possibilitam o fornecimento de dados climáticos (umidade relativa do ar, temperatura, velocidade do vento, radiação solar, etc.), de suma importância na agricultura.



Figura 1 – Uso da tecnologia fotovoltaica em uma Estação Meteorológica.

Fonte: Cier 2003.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos gerais

Consistem em pesquisar e diagnosticar o comportamento e a viabilidade técnica da implantação de um sistema de bombeamento fotovoltaico utilizando uma bateria estacionária ou comum de veículo automotor, alimentada por um painel fotovoltaico e uma motobomba de superfície, acionada por um motor elétrico de CA, “*Shaded Pole*”, de fabricação brasileira,

com a finalidade de abastecimento de água potável para consumo humano e/ou animal e/ou para irrigação, a ser usado em pequenas propriedades rurais ou assentamentos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar a vazão produzida pela motobomba, à medida que aumenta a altura manométrica (altura de recalque + perdas de cargas).
- Determinar o consumo elétrico do motor CA, em (A), em função da potência da bomba (W) e da variação da altura manométrica.
- Determinar a eletricidade (A) gerada pelo painel fotovoltaico (máxima, mínima, média e total), ocorrida durante um dia.
- Determinar o tempo (horas) que a motobomba poderá ser acionado por dia.
- Determinar o custo do conjunto proposto com motor CA (brasileiro) e comparar com o custo do conjunto convencional, com motor CC (importado).

CAPÍTULO II – JUSTIFICATIVAS E CONCEITUALIZAÇÃO BÁSICA

2.1 Justificativa

Segundo Kazay e Legey, em 2003, existiam no Brasil 17 milhões de pessoas sem disponibilidade de energia elétrica, embora a expansão das redes elétricas tenha alcançado grandes avanços nos últimos anos como consequência da obrigatoriedade da universalização do serviço elétrico (Lei 10.438/2002 MME) e do Programa Luz para Todos, (Decreto nº. 4.873 de 11 de novembro de 2003), que levou energia elétrica a mais de dez milhões de pessoas no meio rural, nos últimos quatro anos (MME, 2010). Entretanto deve-se fazer com que a eletricidade traga a prosperidade econômica, através da energização de equipamentos que valorizem os produtos rurais, permitindo uma maior rentabilidade por parte da agricultura familiar, além de elevar os níveis de educação e saúde, através de escolas, postos médicos, bombeamento de água, etc.

A agricultura familiar desempenha um importante papel na economia brasileira. Ela representa 35% do total nacional, envolvendo 75% dos estabelecimentos agrícolas, 25% das terras cultiváveis e reunindo cerca de 14 milhões de pessoas reunidas em 100.000 comunidades (CRUZ, 2004).

Segundo Gastal (1997), a geração de energia elétrica através do aproveitamento solar, no meio rural, proporciona as seguintes vantagens:

- Iluminação - que possibilita o incremento das atividades produtivas, de lazer, educacionais e culturais e segurança, no período noturno;
- Bombeamento de água - a ser usada para consumo humano, de animais domésticos ou para a irrigação, com o aumento da produção hortigranjeira;
- Suprimento de água - que melhora as condições de higiene, reduz a incidência de doenças associadas ao acesso inadequado da mesma, bem como diminui a migração humana para as outras regiões (Êxodo Rural);
- Beneficiamento de produtos agrícolas - que reduz os custos de transporte e permite que ocorra um incremento na receita da propriedade, além de possibilitar a conservação de produtos rurais;

- Desenvolvimento da agropecuária – pela incorporação de tecnologias que modernizam processos produtivos, como, por exemplo, a ordenha mecânica, resfriamento e desnatamento de leite, aquecimento de água para higienização em geral, debulha e moagem de grãos, preparo de forragem natural, cercas elétricas, chocadeiras e criadeiras de aves, secagem, etc.;
- Benefícios no trabalho doméstico - pela incorporação de eletrodomésticos utilizados nas tarefas cotidianas do lar;
- Valorização - das terras agriculturáveis e o aumento da produção agrícola com a irrigação;
- Redução do uso de combustíveis fósseis - na produção agropecuária e na vida doméstica no campo, quando evitado o uso de motores a combustão;
- Benefícios à União, Estados e Municípios – através do aumento da arrecadação de impostos. Isto ocorre sob a forma de tributos, tais como Imposto de Renda (IR), Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), Fundo de Investimento Social (FINSOCIAL), Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), etc. No entanto, a produção familiar somente é viável e rentável se forem adotadas tecnologias de forma racional e organizada, o que, comprovadamente, tem sido o melhor caminho para manter ou tornar os produtores familiares competitivos.

Mundialmente o uso da energia solar, para eletricidade e/ou bombeamento de água, vem tomando impulso e se popularizando cada vez mais em função de sua confiabilidade, versatilidade, durabilidade e baixo custo de operação (DIEGUES, 2005).

De acordo com dados do Ministério de Minas e Energia do Governo Federal, como já foi comentado anteriormente, existia, no Brasil em 2003, cerca de 17 milhões de brasileiros, que não tinham acesso à energia elétrica. As estatísticas revelam ainda que, no Norte do País, 62,5% da população rural (em torno de 2,6 milhões de pessoas) não tinham acesso à energia elétrica (CRUZ, 2004).

2.2 Energia Solar

Se conseguirmos ver a Terra da superfície do Sol, perceberíamos que ela é um ponto girando no espaço a uma distância de 150 milhões de quilômetros que recebe deste, por ano, algo como a energia de $8,93 \cdot 10^8$ TWh, e que consome em torno de $3,95 \cdot 10^4$ TWh, isto é, recebe dez mil vezes mais energia do que consome no mesmo período, valores estes relativos a 1990 (CIER, 2003).

A Energia Solar que incide sobre a Terra acima da atmosfera, medida por satélites, tem um valor médio de 1367 W/m^2 . A radiação que incide na superfície da Terra é atenuada de 30% a 50 %, devido à camada da atmosfera, nuvens, poluição, etc., ficando em torno de 700 a 1100 W/m^2 , dependendo da latitude do local e da época do ano (CIER, 2003).

A energia solar, somente para aquecimento e/ou luz, já é utilizada pelo homem há séculos. Porém, no ano de 202 AC, na Grécia, Arquimedes desenvolveu um aparato que, concentrando os raios solares num espelho parabólico, conseguiu obter um fecho luminoso de grande intensidade (“Raio da Morte”, como foi denominado na época), que provocou incêndio nas velas dos barcos de guerra romanos que estavam sitiando a ilha de Siracuse, onde ele vivia. Em 1774, Lavoisier construiu um Forno Solar que, através de duas lentes convergentes (com dois metros de diâmetro), conseguia obter uma temperatura de 1750 graus Celsius, era utilizado em suas pesquisas para fundição de metais. O primeiro cientista a pesquisar substâncias químicas para gerar energia elétrica a partir da energia solar foi Alexandre Edmond Becquerel, em 1839. Em suas experiências, Becquerel utilizou substâncias químicas tais como o Arsenieto de Gálio (MOURA BEZERRA, 2008).

Em 1873, Adams Smith descobre o efeito fotovoltaico. Entretanto, só após 1883 é que as primeiras células foram construídas, por Charles Fritts, que cobriu o Selênio (semicondutor) com uma camada extremamente fina de ouro, de modo a formar junções P e N. Em 1930 Shottky estabelece a teoria do Efeito Fotovoltaico. Em 1954, Gerald Pearson, Calvin Fuller e Daryl Chapin, desenvolvem no Laboratório da *Bell Telephone*, a primeira célula fotovoltaica prática - mono-silício (CIER 2003).

Somente em 1956, foi construído o primeiro painel fotovoltaico e, em 1958, um painel semelhante foi colocado, pela NASA, no satélite artificial VANGUARD I, para transmissão de dados para a terra (CIER 2003).

Também em 1958 a nave espacial *Skylab* levou consigo um transmissor de rádio de 5 W , alimentado por um painel fotovoltaico (FRAINDENAICH 2003).

Mas foi em 1976 que se iniciou a produção de painéis fotovoltaicos, em escala industrial, seguindo o desenvolvimento da Microeletrônica (LORENZO, 1999).

Na década de 90 iniciou-se o uso de painéis fotovoltaicos para eletrificação rural na maioria dos países em desenvolvimento (CIER, 2003).

A energia luminosa do sol é essencial nas reações bioquímicas da vida vegetal ou animal. A energia química deriva diretamente da energia luminosa solar, armazenando-se sob a forma potencial em alimentos vegetais e combustíveis. A energia térmica provém diretamente da energia solar, pela utilização da radiação ou diretamente através dos combustíveis e da energia química nela armazenada. A energia hidráulica também é dependente do sol, que evapora a água dos mares, lagos, rios, etc., e a faz retornar sob a forma de chuva ou neve, assegurando a perenidade do ciclo. A energia potencial da água retida nos lagos é utilizada sob a forma de energia hidráulica. A energia eólica também é proveniente do sol, que aquece a terra e, por diferenças de temperaturas, provoca o deslocamento do ar atmosférico (ventos). Assim, pode-se dizer que as fontes energéticas do sol são primárias, com exceção da fissão nuclear (BENEDUCE, 1999).

Toda a energia solar é emitida sob a forma de irradiação luminosa: 41% no visível, 52% no infravermelho e 7% no ultravioleta. A parte diretamente utilizável é a radiação luminosa ao nível do solo, também denominada de Radiação Horizontal, cuja potência varia de 0 a 1100 W/m², dependendo da época do ano e da latitude do local. A energia solar fotovoltaica é aquela obtida por meio da conversão direta da luz em eletricidade, sendo a potência solar instantânea, que incide em um determinado ponto, medida em W/m² (potência/área), e o total dessa energia, num dia, que atinge esse ponto, medido em kWh/m²/dia. No entanto, esta disponibilidade varia de acordo com as estações do ano (mínimo no inverno e máximo no verão), com a latitude do ponto e com o clima do local (GALDINO e LIMA, 2003).

A UNICAMP (SP), através do Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (NIPE), realizou evento que propôs fomentar o uso da energia solar fotovoltaica no Brasil, bem como a fabricação das células de silício grau solar. O Brasil exporta todo o seu silício (o país possui uma das maiores reservas do mundo) na forma de silício grau metalúrgico e, depois, importa todo o silício grau solar que precisa, pagando um preço 100 vezes maior (NIPE-UNICAMP-SP, 2011).

2.3 A Energia Solar e a Agricultura

Graças ao bom desempenho da agricultura brasileira, nos últimos cinco anos (2007-2011), ainda é possível suportar pressões dos mercados externos. A produtividade agrícola tem se superado a cada ano pelo fato de novas pesquisas e tecnologias estarem sendo aplicadas no campo, as quais geram a necessidade de um consumo maior de combustíveis e de energia elétrica (principalmente na irrigação). O setor agropecuário vem consumindo a cada ano mais energia. O gasto de óleo diesel, por sua vez, tem crescido com a mecanização da agricultura, e o uso da eletricidade aumentou consideravelmente nos últimos anos (ANEEL, 2011).

A disponibilidade de energia elétrica é essencial para valorizar a atividade rural elevando a renda de pequenos produtores, agregando valores aos seus produtos, assim como melhorando a qualidade de vida do homem do campo (MOSCKOWICZ, 1996).

A tecnologia fotovoltaica apresenta-se como uma das melhores opções para fornecer eletricidade às comunidades rurais, sendo largamente utilizada em outros países, tais com a Alemanha, Portugal, Espanha, Estados Unidos e Japão.

2.4 Bombeamento de água

No Nordeste do Brasil, os habitantes de pequenas vilas rurais ainda fazem uso do esforço humano ou animal para extrair ou transportar água de sua fonte até os locais de utilização. As bombas manuais constituem uma das opções mais divulgadas para o abastecimento de água no meio rural, especialmente para o consumo humano. Os sistemas de bombeamento diesel são também muito utilizados. Quando se trata de pequenas comunidades rurais, a potência do sistema diesel, mesmo os de menor porte, é demasiadamente elevada para atender a demanda, tendo que funcionar em nível parcial de potência e, por conseguinte, de forma pouco eficiente. As exigências de uma adequada manutenção dos sistemas diesel, em termos de custos e frequência de atendimento, fazem com que esses sistemas se encontrem, muitas vezes, além das possibilidades dessas comunidades (FRAIDENRAICH, 2003).

Nenhuma técnica de bombeamento, por si só, é adequada para todas as situações existentes. Cada tipo de sistema de bombeamento tem um campo de aplicação para o qual é mais eficiente. O bombeamento fotovoltaico é especialmente útil para o atendimento de necessidades agrícolas moderadas e para demandas de quantidades medianas de água, tal como as requeridas por pequenos povoados de 100 a 1000 habitantes considerando que cada pessoa, no meio rural, gasta em torno de 70 litros de água por dia (FILHO, 1996).

Na Tabela 1 é apresentada uma comparação entre os sistemas de bombeamento de água existentes no Brasil (FRAINDEIRAICH, 2003).

Tabela 1 – Comparação entre os sistemas de bombeamento de água existentes no Brasil.

Tipo de Bomba	Vantagens	Desvantagens
Manual	Baixo custo.	Manutenção freqüente.
	Fácil manutenção.	Baixo volume de água.
	Não usa combustível.	Demanda tempo e energia
	Pode ser usadas em poços.	
Fotovoltaico	Pouca manutenção.	Investimento inicial caro.
	Sem ruído e poluição.	Baixa produção com baixa radiação solar.
	Combustível é grátis.	
	Confiável.	
	Grande durabilidade.	Pouco difundido.
	Opera sem supervisão.	
	Poucos custos repetitivos.	
Sistema modular, fácil de instalar e de adaptar à demanda.	Reposição, de peças importadas, difícil e cara.	
Diesel	Inversão de capital moderada.	Manutenção inadequada reduz vida útil.
	Pode ser portátil.	Combustível caro.
	Tecnologia bem conhecida.	Produz ruído e poluição.
	Fácil de instalar.	Motor diesel é super dimensionado: isto diminui sua eficiência energética.

Apesar de ainda pouco difundidos, os sistemas de bombeamento fotovoltaicos apresentam muitas vantagens sobre os sistemas convencionais. O fato de ser um equipamento modular, com módulos de potência reduzida, como por exemplo, de 50 Wp (watt pico),

permite acompanhar o crescimento da demanda de água do local, com o aumento da potência do equipamento agregando mais painéis ao sistema. O gerador fotovoltaico (painel) não possui peças móveis, o que facilita sua instalação e manutenção. Outra vantagem deste sistema é a relação entre o perfil temporal do recurso energético e a demanda de água, tanto do ponto de vista diário como sazonal, já que os períodos de elevada insolação (Radiação Solar) coincidem com os de maior consumo de água (Verão). Vários programas vêm sendo executados por meio de parcerias entre instituições públicas e privadas, sempre visando prover serviços básicos a diversas comunidades rurais afastadas das redes elétricas, como iluminação de casas, escolas, creches, abastecimento de água para saneamento básico e/ou para pequena irrigação de produtos hortigranjeiros e pequenos pomares. Nas últimas duas décadas, a tecnologia de bombeamento fotovoltaico passou por um considerável progresso em componentes tais como inversores, condicionadores de potência e motobombas, que foram aperfeiçoados e tiveram melhorada sua capacidade de adaptação. A queda que ocorre, a cada ano, no preço dos painéis fotovoltaicos, acompanhada pelo aumento da eficiência do conjunto do bombeamento fotovoltaico, faz com que estes sistemas se tornem uma das opções mais viáveis para o atendimento de pequenas comunidades rurais afastadas das redes elétricas convencionais.

Também, segundo Fraindenraich (2003) a instalação de painéis fotovoltaicos para iluminação e/ou para abastecimento de água, utilizando a Energia Solar, pode trazer vantagens como:

- é uma energia limpa, pois não gera nenhum tipo de poluição;
- a instalação é muito simples, não necessitando de assistência técnica;
- a manutenção é mínima, pois não há desgaste dos painéis ou das células fotovoltaicas, e consiste somente na limpeza dos painéis;
- a vida útil dos módulos pode chegar a 30 anos;
- não consome combustível;
- permite sua auto-suficiência energética;
- sem conta de luz, pois a radiação do sol é grátis.
- Ainda, segundo Machado, (2003), cada m² de coletor solar (painel) fotovoltaico permite economizar, na geração de energia elétrica;
- 66 litros de óleo diesel/ano;
- 215 kg de lenha;

- como também evitar a inundação de aproximadamente 56 m² de solo, usado para acúmulo de água nas barragens das usinas hidroelétricas.

CAPÍTULO III – CÉLULAS E PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

3.1 Introdução às Células Fotovoltaicas

O nome Fotovoltaico vem da palavra Foto, que quer dizer luz, e Volt, que é uma grandeza da eletricidade. Provavelmente, muitas pessoas já entraram em contato com equipamentos que utilizam estas células solares em calculadoras, relógios e brinquedos, etc., onde a luz é convertida em eletricidade e, desta forma, gera energia elétrica para seus funcionamentos, independentemente de outras fontes.

A célula fotovoltaica é feita de duas finas camadas de silício, sobrepostas em forma de sanduíche, onde são ligados dois fios metálicos, um em cada camada. A camada de cima, chamada de camada N (negativa), tem uma espessura muito fina, onde são depositadas substâncias químicas (Boro) para dopagem, de forma a ter um excesso de elétrons livres. Na parte de baixo, a outra camada, chamada P (positiva), que é mais espessa que a camada N, tem também dopagem (Fósforo ou Índio) de forma a obter poucos elétrons livres, melhor dizendo, deficiência de elétrons. Este desequilíbrio de elétrons entre as duas camadas, gera uma pequena tensão elétrica (DDP), que pode ser aplicada numa carga elétrica.

A fig. 2 mostra o diagrama de uma célula fotovoltaica de silício.

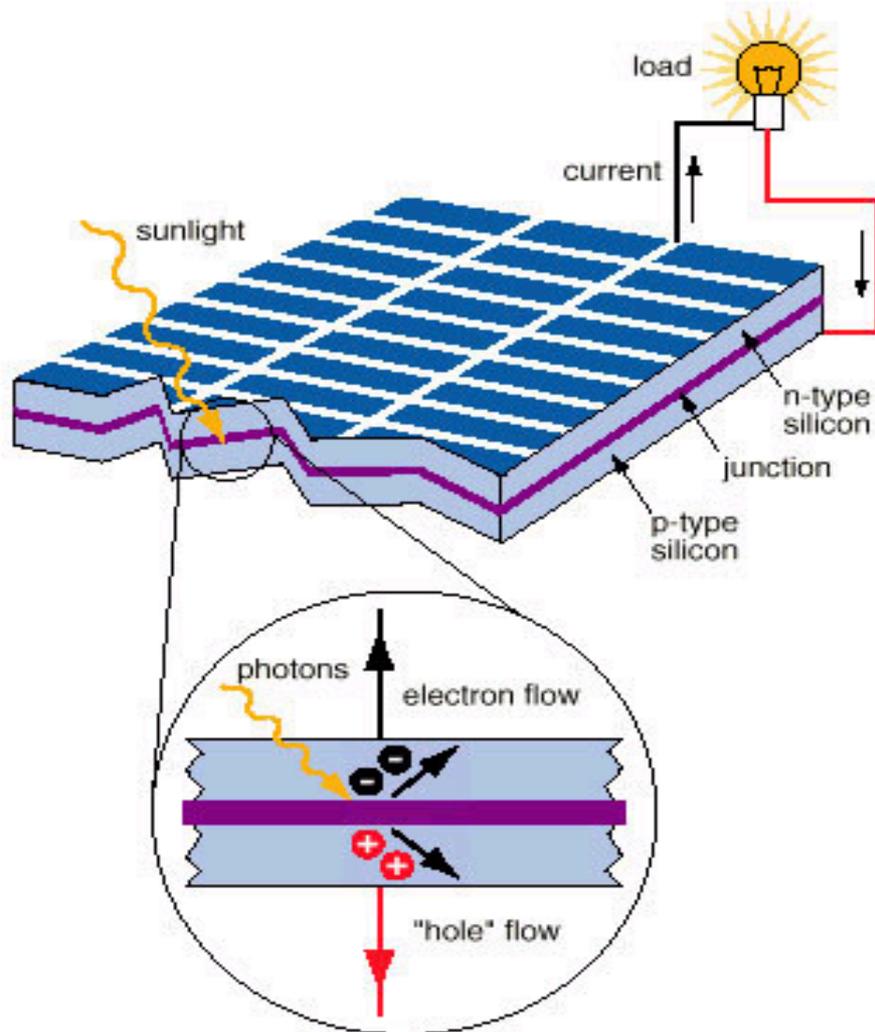


Figura 2 – Diagrama de uma Célula Fotovoltaica

Fonte: Cresesb 2000.

As células fotovoltaicas podem ser do tipo de silício monocristalino, de silício policristalino, de silício amorfo ou de filme-fino (GOETZBERGER, 2003).

3.1.1 Célula de silício monocristalino

Estas células são obtidas a partir de barras cilíndricas de silício monocristalino, produzidas em fornos especiais. As células são obtidas por corte das barras em forma de pastilhas finas (0,4 – 0,5 mm de espessura). A sua eficiência na conversão da luz solar em

eletricidade é superior a 12%. Na figura 3 está apresentado um painel com células de silício monocristalino mostrando as diferentes texturas entre células.



Figura 3 – Painel com células de silício monocristalino.

Fonte: Australian CRC for Renewable Energy Ltd. 2004.

3.1.2 Células de Silício Policristalino

Estas células são produzidas a partir de blocos de silício obtidos por fusão de silício puro em moldes especiais. Uma vez nos moldes, o silício esfria lentamente e se solidifica. Neste processo, os átomos não se organizam num único cristal. Forma-se uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais. Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade é ligeiramente menor do que nas de silício monocristalino. Na figura 4 está apresentado um painel com células de silício policristalino.



Figura 4 – Painel com células de silício policristalino.

Fonte: Australian CRC for Renewable Energy Ltd.2004.

3.1.3 Células de Silício Amorfo

Estas células são obtidas por meio da deposição de camadas finas de silício sobre superfícies de vidro ou metal. Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade varia entre 5% e 7%. Na figura 5 está apresentado um painel com células de silício amorfo.



Figura 5 – Painel com célula de silício amorfo.

Fonte: Australian CRC for Renewable Energy Ltd. 2004.

3.1.4 Células de Filme Fino

Estas células CIGS (como são chamadas comercialmente) têm espessura de poucos microns (de 50 a 500 vezes mais fino que os de Si Cristalino) e, portanto, utilizam uma quantidade muito inferior de matéria prima em sua fabricação; têm 0,2% na participação no mercado de células e possuem um rendimento de 13%. Atualmente, os materiais mais comuns na fabricação das células são Silício Amorfo, Telureto de Cádmio (CdTe) e Diseleneto de Cobre mais Índio (CuInSe₂). Os módulos de filme-fino utilizam materiais de pureza mais baixa, mais baratos que os Si das células dos módulos cristalinos que têm maior poder de absorção da luz. Porém, como o processo de fabricação é mais simples, as imperfeições em sua estrutura e a quantidade de impurezas são maiores e por estas razões, o seu desempenho elétrico é mais baixo. A eficiência destes módulos situa-se entre 7% a 11% (em módulos comerciais típicos), o que demanda o uso de painéis com área superior àquelas dos módulos com células monocristalinas. Por outro lado, estes módulos são mais leves e mais flexíveis, possibilitando uma maior integração arquitetônica e facilidade de instalação (ROEDERN, e ULLAL 2008). (GOETZBERGER, 2002).

A maioria dos autores parece concordar que a tecnologia mais promissora para a energia fotovoltaica é a do filme-fino, pois, ao atingir níveis de eficiência competitivos aos módulos cristalinos atuais, possibilitará uma redução significativa no custo da energia (GREEN, 2005).

Até o momento, o melhor desempenho destes módulos foi de uma célula de Diseleneto de Cobre e Índio Gálio (CIGS), que alcançou uma eficiência de 19,9%, valor quase igual aos 20,3% da célula de Si Policristalino e 24,7% da célula de Si Monocristalino (NREL, 2008).

O menor preço do watt-pico dos módulos de filme-fino é de US\$ 3,74, enquanto que dos módulos Si Monocristalinos é de US\$ 4,28, e, dos de Si Policristalinos, de US\$ 4,17.

A última classe é aquela de alta concentração, cujos módulos usam pequenas pastilhas com várias junções entre diferentes materiais (heterojunção) com o objetivo de aumentar o espectro absorvido da luz solar e o rendimento do módulo. A principal questão desta tecnologia é que encarece o preço das células e o ganho da eficiência sob condições normais de radiação (1000 W/m²) não é muito significativa, ficando em 26% (SIEMER, 2009).

Maycock (2005) aponta que, em 2004, 85% da produção de células fotovoltaicas foram do tipo Si mono ou policristalinos, enquanto que as células de filme-fino de Si amorfo

correspondem a 3,9%, os de diseleneto de cobre e índio a 0,25%, e os de telureto de cádmio a 1,1%.

3.2 Funcionamento das Células Fotovoltaicas

As células solares comerciais são elaboradas à base de silício com alto grau de pureza, com a adição de certos elementos químicos (boro ou fósforo) para formar a junção P-N. Células convencionais são capazes de gerar uma corrente elétrica da ordem de 30 mA/ cm², sendo que comercialmente é comum encontrarem-se células que variam de 50 a 150 cm², ou seja, são capazes de gerar unitariamente uma corrente elétrica de 1,5 a 4,5 A, a uma tensão de 0,30 a 0,48 V.

A luz solar consiste de pequenos pacotes de energias, chamados Fótons, que, quando atingem o átomo de certas substâncias químicas (tais como o silício), fazem com que estas liberem elétrons, produzindo eletricidade. As substâncias químicas derivadas do silício são as mais apropriadas para essa finalidade. Hoje em dia, as células fotovoltaicas, construídas com Silício Semicristalino, como citado anteriormente, possuem um rendimento que aproveita de 14 a 16 % da luz incidente para obter eletricidade. Em julho de 2007, pesquisadores da Universidade de *Delaware* (EUA) conseguiram, em laboratório, bater o recorde de eficiência energética das células solares cristalinas, fabricadas de silício, atingindo um rendimento de 42,8 % de conversão sob condições normais de iluminação. Isto foi possível através de um sistema óptico de concentração da luz diretamente na célula, usando uma lente que não chega a um centímetro de diâmetro e evita o desperdício de luz (MESSENGER e VENTRE, 2004).

Na figura 5, é possível observar o diagrama de uma Célula Fotovoltaica.

3.3 Painéis solares fotovoltaicos

Depois de fabricadas, as células fotovoltaicas são conectadas entre si e encapsuladas sob uma placa de vidro, formando um conjunto selado chamado de painel ou módulo. Para sistemas autônomos costumam ser utilizadas 36 células em cada módulo, já que este é o

número necessário para possibilitar a recarga de uma bateria de chumbo-ácido sulfúrico de 12 V (GREEN, 2005).

A potência elétrica do painel, dada em Wp, depende do número de células, contidas nele. Normalmente são construídos painéis, cujas potências elétricas variam de 50 a 140 Wp.

Em 2007, a produção de módulos (painéis) de filme-fino respondia por aproximadamente 12% da produção mundial. Por causa do aumento das vendas e evolução do processo de fabricação dos módulos de Si cristalino, o preço da energia fotovoltaica vem sistematicamente caindo. Todavia, os mecanismos que atuaram como redutores do preço dos módulos não possibilitarão uma redução mais significativa, pois a queda abrupta nos preços dos módulos já foi ultrapassada. O crescimento da indústria fotovoltaica, com células de Si cristalino tem como concorrente a indústria de microeletrônica. Como esta última produz produtos de maior valor agregado e tem maior capacidade de absorver preços mais altos do insumo, aumenta o preço dos módulos solares e gera problemas de abastecimento. Neste ponto, o menor custo dos módulos de filme-fino é também benéfico aos consumidores que mais investiram e subsidiaram a instalação de módulos (BUNCE, 2007).

Os painéis de silício cristalino foram os primeiros a serem comercialmente fabricados e dominam a maior parte do mercado mundial de energia fotovoltaica. Estes painéis usam células fabricadas de pastilhas de silício de alta pureza, que adotam processos de fabricação semelhantes aos empregados na indústria microeletrônica, o que acarreta algumas desvantagens, tais como:

- a purificação do Si é um processo intensivo em energia;
- os painéis, mono ou poli cristalinos, empregam uma quantidade grande de Si, pois este possui um coeficiente de absorção da luz baixo e provoca a necessidade de células mais espessas;
- o uso de vidro diminui a eficiência dos painéis, tornando-os mais frágeis e caros e havendo necessidade de estrutura metálica para fixá-lo. (HOPWOOD, 2007).

Em nível mundial, o uso de painéis fotovoltaicos vem crescendo de 2003 para cá, na taxa de 40 a 60% ao ano (PUCRS-2011)

Em Julho de 2008 foram lançadas, pelo INMETRO, as normas para etiquetagem de painéis fotovoltaicos e seus componentes, incentivando as fábricas de painéis fotovoltaicos no Brasil.

Em 2007, entrou em funcionamento a Central Solar Fotovoltaica de Serpa (Portugal), com uma capacidade de 11 MW, suficiente para abastecer cerca de oito mil habitações.

Na Alemanha entrou em operação, em 2011, uma usina solar com 70.000 painéis fotovoltaicos, de 100 Wp cada um. O mais ambicioso projeto será implantado em Victoria, na Austrália, com capacidade de 154 MW, para atender cerca de 45.000 residências, que deverá entrar em operação em 2013. (AMBIENTEBRASIL, 2011).

3.4 Operação de painéis fotovoltaicos

Cada módulo ou painel solar é composto por um determinado número de células fotovoltaicas conectadas em arranjos, ligadas em série, produzindo tensão e corrente suficientes para a utilização da energia elétrica. Cada célula desenvolve uma tensão em torno de 0,3 volts, com uma corrente elétrica de aproximadamente 3,5 Ampères, desenvolvendo uma potência elétrica de mais ou menos 1,0 watts. Um painel de 50 células poderá produzir, com uma Radiação de Pico (1000 W/m^2), em torno de 50 Wp, com uma tensão elétrica em torno de 15 V. Os painéis podem ser conectados em Série ou em Paralelo, dependendo da tensão elétrica que se deseja. Ao longo do dia, o arranjo fotovoltaico poderá ser submetido a diferentes níveis de radiação, com o ponto de eficiência máxima oscilando dentro de uma faixa.

Para otimizar o ponto de operação e aumentar o rendimento de geração, pode ser utilizado um controle eletrônico de potência, denominado MPPT (*Maximum Power Point Tracker*), ou seguidor de ponto máximo de potência, que opera de modo a regular a tensão e a corrente, a fim de obter o máximo de potência.

Uma outra maneira de aumentar a captação da radiação solar diária e, conseqüentemente, aumentar o volume de água bombeado, é colocar junto aos painéis um dispositivo de Rastreamento Solar *Tracking Systems* (FRAIDENRAICH, VILELA 2003).

As características elétricas dos painéis fotovoltaicos são geralmente estimadas de acordo com sua máxima potência de saída sob condições de teste padrão “*STC-Standart Test Conditions*”, considerando uma radiação solar de 1000 W/m^2 , temperatura do painel de 25 graus e distribuição espectral $AM = 1,5$. Essa temperatura raramente é atingida em condições reais de operação, pois em dias de sol claro ela é tipicamente de 20 a 40 graus maiores do que a temperatura ambiente. Para completar estas informações de desempenho elétrico em STC, alguns fabricantes informam também suas características à temperatura nominal no painel “*NOTC- Nominal Operation Cell Temperature*”, definida com condições nominais de

operação a um nível de radiação solar na superfície do painel de 800 W/m^2 , temperatura de 20 graus, distribuição espectral $AM=1,5$ e velocidade do vento de 1 m/s . A incidência da radiação solar no painel que proporciona tensão a vazio (V_{oc}), com o circuito aberto (sem carga elétrica), aumenta em função logarítmica com a intensidade luminosa (Radiação Solar). Esta tensão V_{oc} pode ser medida com um voltímetro CC, conectado nos terminais positivo e negativo do painel. A corrente de curto circuito (I_{sc}), que depende linearmente da intensidade luminosa, pode ser medida com um amperímetro CC, desde que se ligue no painel um acessório, isto é, qualquer dispositivo que consome energia elétrica, comumente denominado de carga elétrica (CEPEL/CRESESB, 2000).

A eficiência de um sistema fotovoltaico depende do rendimento dos vários componentes que integram este sistema, da forma com que se interligam e se coordenam entre si, e do tipo de carga elétrica que é ligada ao sistema. Seu desempenho é altamente influenciado pelo calor. O rendimento do painel depende da radiação solar, da temperatura local, da tensão e da quantidade de sujeira depositada no painel. (OVERSTRATEA E MERTENS, 1996).

Cardona e Lopez (2010) avaliaram durante um ano o desempenho de um sistema fotovoltaico, conectado a rede elétrica convencional, instalado na Universidade de Málaga – Espanha, obtendo um rendimento médio mensal, medido no período de janeiro a dezembro de 1997, entre 8,8 a 10,3 %. Verificaram que a potência elétrica dos painéis (W_p) era 9,4% menor do que aquela fornecida pelo fabricante.

Os painéis fotovoltaicos podem ser conectados em Série ou em Paralelo, dependendo da tensão elétrica que se deseja. A fim de se obter o valor da potência do painel (W_p), solicitada pela carga, nos sistemas de bombeamento fotovoltaico, o processo de dimensionamento costuma acontecer em um ambiente de muita incerteza, tanto da demanda de água, quanto das características do poço (cisterna, açude, etc.) e da Radiação Solar. Um método simplificado propõe uma simples fórmula matemática que pode ser usada para determinar o valor aproximado da potência nominal (P_{nom}) do painel fotovoltaico, conforme a equação (1), cujo resultado é dado em W_p . (HAHN, 1995)

$$P(Nom)= 11,6. Ht.Q(dia) / I \quad (1)$$

Onde:

11,6 é uma constante empírica;

Ht é a altura manométrica em metros;

Q(dia) é a vazão diária em metros cúbicos por dia;
 I é a Radiação Solar média anual em KWh/ m²/ dia.

Na alimentação indireta, durante as horas de sol em que os raios solares incidirem no painel fotovoltaico (o número de horas de incidência depende da época do ano e da localização geográfica do painel), poder-se-á produzir eletricidade (Ah), suficiente para armazenar energia elétrica numa bateria do tipo chumbo-ácido, de 12 V, comumente usada em veículos automotores. Segundo dados do fabricante, um painel de 50 Wp poderá produzir, no verão (com uma Radiação Solar máxima de 1000W/m²), em torno de 20 A. por dia. Esta bateria, por sua vez, poderá alimentar um motor elétrico CC ou CA (com Inversor), que aciona uma bomba de água, usada para recalcar água de um poço, cisterna ou açude, para um reservatório elevado. A quantidade de água bombeada dependerá, além da Radiação Solar, da potência da bomba, da altura manométrica (mca) e do tempo em que a motobomba estiver operando.

A quantidade de energia elétrica gerada, por dia, por um painel solar é limitada e dada em Wh. Uma placa solar de aproximadamente 50 Wp gera (com uma Radiação Solar de 1000W/m²), energia elétrica suficiente para, por exemplo, manter acesa uma lâmpada fluorescente de 9 watts durante 12 horas ou alimentar uma TV (200 W/ 12 V) durante 6 horas ou acionar uma motobomba para abastecer, por dia, uma caixa d'água de aproximadamente 1000 litros (KYOCERA, 2010).

Também, de acordo com dados de fabricante, um painel fotovoltaico de 57,4 Wp, pode gerar:

- Corrente Contínua (CC) = 3,73 A.
- Tensão de Circuito Aberto (Voc) = 20,7 V.
- Tensão Máxima de pico (Vmp) = 16,5 V.
- Corrente máxima de pico (Imp) = 3,46 A.
- Eficiência (Rendimento) =12,64 %.

Segundo Overstraete e Mertens, (1996), a eficiência (%) de um painel fotovoltaico é dada pela equação (2);

$$\% = (I_{mp} \times V_{mp}) / (I_c \times A) \times 100 \quad (2)$$

Onde:

I_{mp} = Corrente máxima de pico (A).

V_{mp} = Tensão máxima de pico (V).

I_c = Radiação Solar em W/m^2

A = área do painel em m^2 .

3.5 Medição da Radiação Solar

Para a medição da Radiação Solar, normalmente são usados os seguintes aparelhos:

- Radiômetro – do tipo térmico absorve a energia solar e a converte em um sinal através de sensores de fótons (fotodiodo). Mede a Radiação Instantânea em W/m^2 ;
- Piranômetro - mede a Radiação Global utilizando uma célula fotovoltaica de Silício Monocristalino. Mede em $Wh/m^2/$ dia;
- Pireliômetro - mede a Radiação Direta (W/m^2). Utiliza uma pequena abertura para “visualizar” apenas o disco solar e a região do sol chamada de circunsolar. Segue o movimento do sol;
- Heliógrafo - registra a duração do brilho solar. Uma esfera de cristal sobre uma fita que, pela ação da radiação solar, é enegrecida, registrando nesta fita as horas de insolação;
- Actinógrafo - mede também a Radiação Global através de sensores baseados na expansão diferencial de um par bimetálico ligado a uma pena que registra o valor da radiação. Possui baixo rendimento, da ordem de 30%. É considerado de terceira categoria.

CAPÍTULO IV – PROCESSOS DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO

4.1 Introdução ao Bombeamento Fotovoltaico

Solomon Caux (1576-1626), engenheiro francês, descreveu que no ano de 1615 foi inventada uma máquina de bombear água utilizando a expansão de ar aquecido mediante energia solar. O século XIX foi prodígio em invenções de conversão de energia solar em energia mecânica, registra-se os nomes de C. Guntner, na Áustria, A Mouchot e A. Pifre , na França J. Ericson , nos Estados Unidos e W. Adans, na Índia. Cabe ainda, salientar um sistema de irrigação construído na localidade de Meadi (Egito) que utilizava um campo de concentradores cilíndricos parabólicos com 1200 m² de superfície, que era usado para a captação da energia solar (FRAINDEIRAICH, 2003).

Campana 1978, (citada por NOGUEIRA, 2009) na ilha de Córsega, dando continuidade a sua tese de doutorado, desenvolveu e instalou o primeiro sistema de bombeamento fotovoltaico de utilização a campo, com módulos fotovoltaicos e bomba com motor CC desenvolvida em conjunto com engenheiros franceses. Este sistema abastecia de água uma fazenda de criação de ovelhas e era constituído por motores elétricos de CC, de imã permanente, instalados na superfície dos poços e com as bombas submersas ligadas aos motores por um eixo vertical .

Segundo Fedrizzi e Sauer (2003) o padre Bernard Vespieren criou a entidade “*Mali Acqua Viva*”, visando aliviar os efeitos da seca que assolava vários países da África. Após inúmeras tentativas de abastecimento de água com bombas a Diesel, manual, a pedal, e até mesmo com um projeto piloto solar térmico, no final da década de 1970, a entidade conseguiu tornar viável a instalação das primeiras bombas fotovoltaicas no continente Africano. Entre 1977 e 1990 mais de 200 sistemas foram instalados em Mali, possibilitando inúmeros outros projetos em países vizinhos .

A evolução experimentada na década de 80 possibilitou a produção de equipamentos de tecnologia mais simples e confiável. Cerca de 10.000 sistemas de bombas fotovoltaicas foram instalados na década de 90, sendo de 30 a 40% deles em países em desenvolvimento (BARLOW, 1999).

Entre 1979 e 1981, o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (UNDP), com o apoio do Banco Mundial (WB) e participação do *Intermediate Technology Development Group* (ITDG), instalou um projeto piloto que incluía teste e avaliação do funcionamento de sistemas de bombeamento fotovoltaico a campo. O principal objetivo foi a demonstração e avaliação do uso de pequenos sistemas de bombeamento fotovoltaico (de 100 a 300 Wp) para serem utilizados na irrigação de pequenas áreas em propriedades rurais de Mali, Filipinas e Sudão, tendo em vistas aprimorar esta tecnologia para seu uso no campo. As conclusões do trabalho apontaram um grande potencial de utilização desta tecnologia no meio rural. Como resultado, foi recomendado, dentre outras coisas, uma melhora na confiabilidade dos equipamentos e a redução de preços (FEDRIZZI, e SAUER 2003).

Em 2002, foi criado o PROJETO MEDA (Programa de bombeamento fotovoltaico em Países Mediterrâneos), com 90 kWp de potência instalada, construído em comunidades rurais de baixa renda, tendo sido acompanhado pela Universidade Politécnica de Madrid (UPM). O governo de Andaluzia incentivou a aquisição dessa tecnologia para irrigação de oliveirais, arcando com 40% do investimento a fundo perdido, sendo o restante de 60% pagos pelo proprietário em cinco anos. (FEDRIZZI, e SAUER 2003).

Apesar de até pouco tempo não ter tido uma marcada importância na implantação de sistemas de bombeamento fotovoltaico, começa a tomar uma posição expressiva no cenário mundial, graças a projetos institucionais, com cerca de 3.260 sistemas e uma potência total de 1.7 MWp.

Os primeiros sistemas instalados no Brasil datam de 1981, e estima-se que até 1994 não foram instalados mais do que 150 unidades (Estimativa baseada em informação de profissionais da área que trabalharam no referido período). Nos últimos anos, este setor experimentou um considerável crescimento devido à atuação do Ministério de Minas e Energia com o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM). No âmbito deste programa foram adquiridos cerca de 2.500 sistemas, entre as fases I, II, III, emergencial e fase IV, com uma potência aproximada de 1,4 MWp (Prefeituras de Rio do Soto - TO e de Belém do Pará – PA). As demais iniciativas totalizam 806 sistemas, com cerca de 361 kWp de potência instalada (FEDRIZZI e SAUER, 2003).

O Programa Regional Solar representou um marco no que se refere a projetos desta natureza, mais especificamente no Projeto Eldorado, com a cooperação entre Brasil e Alemanha, tendo como exemplo o Projeto de Inajá, no sertão de Pernambuco, financiado pelo governo estadual através do PRODEEM, onde um sistema fotovoltaico, com motor CA trifásico, bombeia 17.000 litros de água por dia, recalçada de um poço com 60 metros de

profundidade. Infelizmente, quase duas décadas depois, mais de 60% destes sistemas foram desativados devido à implantação de redes elétricas, alto custo de manutenção e reposição difícil de peças importadas, por desinteresse da comunidade ou despreparo no manejo daquela nova tecnologia (SHR SOHIDRA, 2004).

Com a idéia de melhorar a vida no campo, a comunidade de Irapuá, no município de Pentecostes (CE) – que possuía, em 1990, 210 habitantes, distribuídos em 42 famílias, era carente e atendida pela Associação de Moradores de Cipó (Município vizinho de Irapuá), implantou, em outubro de 1991, com o projeto CHACON, um sistema de bombeamento solar constituído de uma motobomba de recalque, quatro reservatórios (num total de 5.000 litros de água potável), uma horta comunitária e uma lavanderia comunitária. Com a implantação desse projeto, a comunidade passou a ser organizada, gerando uma cooperativa de mulheres, que atuavam em uma fabrica de louças de barro (SOUSA e SUZERNY, 1994).

De acordo com Fedrizzi e Sauer (2003), a Fundação Nacional de Saúde (FUNASA) em seu Distrito Sanitário Especial Indígena, começou a utilizar sistemas de bombeamento fotovoltaico em 1995, em aldeias indígenas não atendidas pela rede elétrica convencional. Mas apesar dos anos passados, e da ampla atuação da FUNASA no território nacional, principalmente em localidades remotas que carecem de rede elétrica convencional, ainda são restritas as iniciativas de utilização da tecnologia de bombeamento fotovoltaico, pôde-se catalogar 39 sistemas. Os poucos projetos instalados em aldeias indígenas nos estados do Pará, Piauí, Tocantins, Mato Grosso, Bahia e Rondônia, através das informações que se tem através de seus responsáveis técnicos, de modo geral, encontram-se em bom estado de funcionamento. Mas apesar da confiabilidade técnica comprovada, e da grande vantagem de prescindir de combustível fóssil, que dificulta e encarece a prestação do serviço para a FUNASA, a falta de uma rede de assistência técnica regional, a qual recorrer em casos de avarias é o grande impedimento para a sua disseminação em larga escala nas aldeias indígenas não contempladas pela rede elétrica convencional.

O PRODEEN com o Ministério de Minas e Energia – (BR), em 1996, licitou 181 projetos para bombeamento, com volumes de até 27 mil litros de água por dia, em alturas manométricas de até 86 metros; e, em 1997, foram licitados 176 projetos, com volumes de água de até 26 mil litros por dia, com alturas de até 60 metros.

Na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) foram instalados dois conjuntos para bombeamento de água, um com oito painéis fotovoltaicos fixados no solo, e outro com oito painéis também fotovoltaicos acoplados a um dispositivo com rastreamento solar (“*Tracking Systems*” = faz com que os painéis acompanhem o movimento do sol). Com a adoção deste

dispositivo, foram conseguidos aumentos de 30% na coleta de Radiação Solar e 41% no bombeamento de água, passando de 6,29 m³/dia, para 9,53 m³/dia, no mês de outubro, quando ocorreu a máxima Radiação Solar. (FRAIDENRAICH e VILELA, 2003).

As figuras 6 e 7 apresentam um exemplo de bombeamento fotovoltaico, usando uma bomba centrífuga de superfície (flutuando numa bóia), posicionada dentro de um açude, alimentada por um painel fotovoltaico, bombeando água para uma caixa de água localizada na barragem do açude.



Figura 6 – Painel fotovoltaico e Caixa de água.

Fonte: Cresesb 2000.



Figura 7 – Motobomba de superfície em um flutuador e tubulação de recalque.

Fonte: Cresesb 2000.

Um dos fatores que contribuiu para a disseminação da opção de bombeamento fotovoltaico foi a redução dos preços de seus componentes. A evolução do preço do módulo fotovoltaico no mercado internacional foi de US\$ 20,00/Wp em 1970, para US\$ 3,50/Wp em 1998. No sistema de bombeamento fotovoltaico, como um todo (módulos, acondicionamento de potência e conjunto motobomba), passou de US\$ 50,00/Wp em 1970, para menos de US\$ 9,00/Wp, em 1998. Estes valores, à medida que aumenta a demanda, tendem a diminuir (BARLOW, R, e McNELIS, 1999).

No Brasil, (2009), estes valores estavam por volta de US\$ 6,00/Wp, para o módulo fotovoltaico, e de US\$ 18,00/Wp, para o sistema de bombeamento completo¹.

Outro fator decisivo foi a viabilização de projetos piloto implantados em condições reais de operação, proporcionando o aprimoramento tecnológico necessário para sua expansão em larga escala (FEDRIZZI e SAUER, 2003).

Segundo Alvarenga (2001), as projeções de declínios dos preços dos painéis fotovoltaicos, estão apresentadas na tabela 2

¹ Dólar cotado em R\$ 2,10 - 2009.

Tabela 2 – Custos diretos de fabricação de módulos (painéis) fotovoltaicos – US\$/Wp

Tecnologia	2000	2010²
Silício monocristalino	2,45	1,45
Silício policristalino	2,10	1,15
Silício amorfo	2,70	1,40
Telureto de cádmio	2,30	0,95
CIS	2,25	1,00

4.2 Configurações de Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico

Segundo Soares et al (2001), o conjunto dos equipamentos que formam um sistema de bombeamento fotovoltaico (painel, motobomba, bateria, inversor, e/ou controlador de carga, etc.), isolado, pode ter as seguintes configurações:

- sistema CC, sem armazenamento de energia: modo direto;
- sistema CC, com armazenamento de energia: modo indireto;
- sistema CA, sem armazenamento de energia: modo direto;
- sistema CA, com armazenamento de energia: modo indireto.

No sistema de bombeamento indireto, CC ou CA (figura 8), o uso da bateria possibilita que o sistema seja usado a qualquer hora do dia ou da noite, independentemente da intensidade da Radiação Solar e permite que o motor opere sempre dentro da tensão nominal, não havendo perigo de queima do mesmo, por subtensão (abaixo da nominal).

No sistema direto, CC ou CA, há necessidade de adicionar um dispositivo que só liga o motor quando a radiação solar atinge nível acima do nível crítico de radiação (quando o sol está surgindo ou se põe no horizonte ou quando o tempo está nublado), fornecendo ao motor uma tensão mínima para entrar em operação.

² Dólar cotado em R\$ 1,87 - 2010.

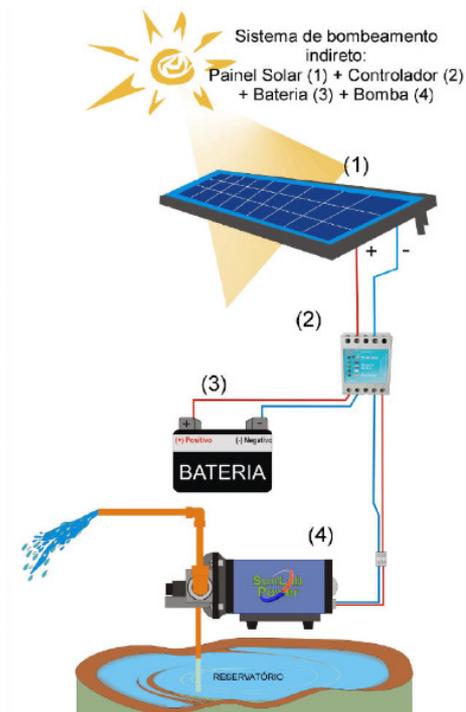


Figura 8 – Sistema de bombeamento CC isolado com armazenamento de energia (bateria) - Modo Indireto.

A figura 9 mostra um sistema de bombeamento fotovoltaico, com caixa de água elevada, instalado no Pontal do Paranapanema, no estado de São Paulo.



Figura 9 – Sistema de bombeamento fotovoltaico com caixa de água elevada.

Fonte: Prodeem (2001).

4.3 Tipos de Bomba de Recalque

Existem diversos tipos de bombas de recalque, usadas em sistemas de bombeamento fotovoltaico. Os tipos mais usados são as bombas volumétricas, que podem ser de pistão com contrapeso ou progressivas (bombas de parafuso). Ambas são usadas quando se necessitam vazões na faixa de 0,3 a 40 m³/dia e alturas manométricas de 10 a 500 metros. Também são usadas bombas vibratórias, centrífugas, de diafragma, podendo ser submersas ou de superfície. CRESESB (2000).

Uma indústria gaúcha, de motores elétricos, fabrica motobombas de circulação, centrífuga de superfície, de pequena potência elétrica (200/300 watts), que são usadas em máquinas de lavar pratos, máquinas de lavar peças, etc, acionadas por motores CA do tipo Pólos Sombreados (“*Shaded Pole*”).

O desempenho de uma destas motobombas, a de 300 W- 220 V, será posteriormente analisado neste trabalho.

4.3.1 Bomba de diafragma

Seu funcionamento se baseia na diminuição e aumento de pressão sobre uma membrana plástica, o que permite a aspiração e a saída de água. Pode operar normalmente mesmo quando sujeita a variação na tensão fornecida pelo painel.

4.3.2 Bomba centrífuga

Uma fonte externa (motor elétrico) causa o giro dos rotores dentro de seu corpo, criando uma força centrífuga que impulsiona a água. Indicada para maiores vazões de água e menores alturas manométricas

Na figura 10 é apresentada, com detalhes, uma motobomba centrífuga de superfície acionada por um motor CA monofásico, usada para circulação de líquidos.

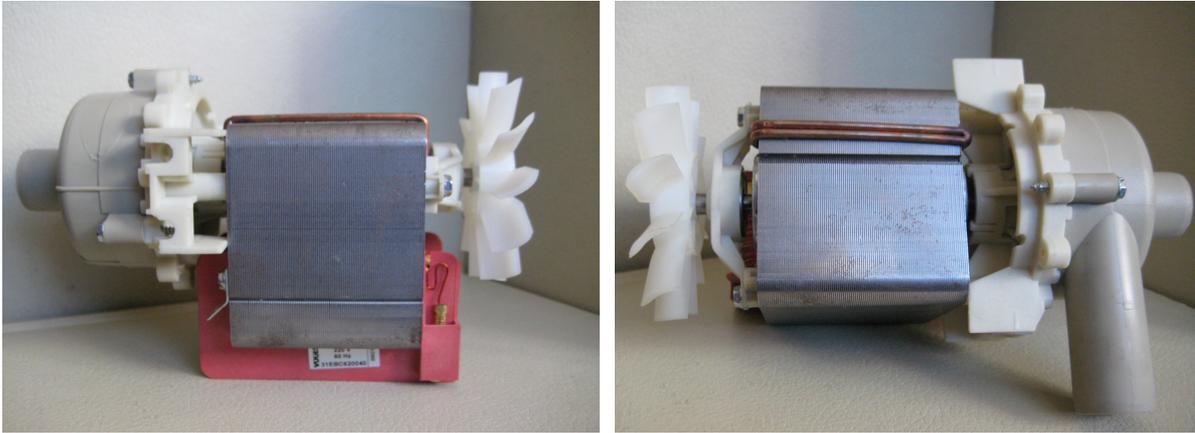


Figura 10 – Motobomba com motor CA – Dimensões: 21 x 10 cm.

Esta motobomba ou eletrobomba é constituída por um motor CA, monofásico, tipo indução gaiola de pólos fendidos (“*Shaded Pole*”) ao qual se encontram mecanicamente acoplados, de um lado, um pequeno ventilador responsável pela ventilação do motor e, do outro lado, uma bomba de circulação de líquidos, do tipo centrífuga de superfície, empregada para circulação de líquidos. Trata-se de uma motobomba, relativamente de baixo custo e de fabricação brasileira, facilmente encontrada no comércio de peças de reposição para eletrodomésticos. Embora não tenha placa de identificação contendo marca, modelo, tensões elétricas, correntes, etc, suas características são fornecidas por catálogos da fabrica.

As bombas centrífugas possuem um dispositivo rotatório dotado de pás, chamado rotor, o qual exerce força sobre o líquido a ser bombeado. A força centrífuga resultante de o movimento circular do rotor cria uma zona de maior pressão na periferia deste, como conseqüência, ocorre uma zona de baixa pressão na sua parte central, produzindo o deslocamento do líquido em direção aos canais do rotor. Este tipo de mecanismo (rotor) das bombas centrífugas requer uma corrente de partida (I_p), do motor elétrico, abaixo da corrente de funcionamento (I_n). É como se o motor partisse a vazio (sem carga). Esta característica é de fundamental importância para sistemas de bombeamentos fotovoltaicos, uma vez que o sistema não exige uma potência instalada muito acima do necessário para a motobomba entrar em operação.

4.3.3 Bomba vibratória

É acionada por motor CC ou CA (monofásico ou trifásico) e sempre submersa. A água é bombeada através de um diafragma que vibra com o auxílio do motor elétrico.

4.3.4 Potência hidráulica das bombas de recalque

A potência hidráulica $Ph(W)$ necessária para bombear água é uma função da altura manométrica total H_t (m), da vazão Q (m^3/h), da aceleração da gravidade g (m/s^2), da densidade da água, μ (kg/m^3), e de 2,725 (valor de ajuste) e dada pela equação 3.

$$Ph = 2,725 \cdot Q \cdot H_t \cdot g \cdot \mu \quad (\text{em watt}) \quad (3)$$

4.4 Motores Elétricos utilizados nos Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico

Deve-se escolher o conjunto motobomba para operar o mais próximo possível do ponto de máxima eficiência, levando-se em consideração a altura monométrica e a vazão necessária. Tanto a bomba centrífuga como a bomba volumétrica podem ser acionadas por motores de CC ou de CA.

Os motores de CC do tipo imã permanente apresentam um custo inicial mais alto, porém são considerados muito satisfatórios para acoplamento direto (sem bateria) no painel fotovoltaico. São caracterizados por uma carga constante, possuindo uma compatibilidade com a fonte de energia fotovoltaica. Quando usados motores CC sem escovas (Brushless), a confiabilidade é aumentada, é exigida pouca manutenção, mas seu acessório eletrônico, sensível e caro, aumenta o risco de falhas.

Os motores CA, do tipo Indução, monofásicos ou trifásicos, embora não necessitem manutenção e tenham alto desempenho e eficiência, necessitam de dispositivos (Inversores) que retifiquem a CC dos painéis fotovoltaicos ou das baterias, em CA para funcionarem.

Um motor CA trifásico de 400 watts pode bombear em torno de 17.000 litros de água por dia, com um recalque de 60 metros (Sistema de bombeamento fotovoltaico instalado em Inajá – PE. (FRAIDENRAICH, 2003).

Os motores de CC são os mais usados nos sistemas de bombeamentos fotovoltaicos. Porém, quase sempre requerem manutenção (troca de escovas), são importados, muito caros e difícil de serem encontrados para substituição em caso de desgaste ou pane. Isto representa uma das maiores razões para que 60% dos sistemas com CC , já instalados ou em operação, sejam descartados. (SRH SOHIDRA, 2004).

Os motores CA comumente usados nos sistemas de bombeamento fotovoltaicos são do tipo Indução Gaiola, monofásicos com capacitor, ou trifásicos. Para serem acionados necessitam de inversores CC-CA, que transformam a CC produzida pelos painéis fotovoltaicos e armazenada nas baterias, em CA. Além disso, necessitam de transformadores (às vezes já instalados nos Inversores) que elevam a tensão dos painéis (dependendo do número de painéis ligados em série ou paralelo) para 127V ou 220V.

O uso de um motor de CA Indução monofásico do tipo “*Shaded Pole*”, também denominado de Polo Fendido ou com Bobina de Sombra ou Pólo Ranhurado ou com Bobina de Arrasto, nestes sistemas de bombeamento, possui as vantagens de:

- não necessitar manutenção;
- ter grande durabilidade;
- ser de baixo custo;
- ser de fabricação brasileira (facilmente encontrado).

Neste motor, o Conjugado de Partida ou Par Motor é conseguido através de duas espiras elétricas (de fio grosso), ligadas em curto-circuito, embutidas em fendas (ranhuras) existentes em cada um dos polos (N e S), que, juntamente com a Bobina de Marcha, desenvolve o Campo Girante necessário para iniciar o giro do rotor. Embora tenha baixo par motor, o mesmo é suficiente para fazer girar uma pequena bomba de água ou ventilador com fração de CV (COYNE 1985 a).

De acordo com experimentos já realizados este motor opera normalmente com tensões abaixo de sua tensão nominal. No experimento foi usado uma motobomba acionada por um motor de indução monofásico, tipo *Shaded Pole* , de 300 W., com tensão nominal de 127 V (semelhante a que será testada no presente trabalho), cujos resultados obtidos nos ensaios, são apresentados na tabela 3. Não foi informada a altura de recalque (MACHADO, 2009).

Tabela 3 – Resultados parciais dos testes da motobomba CA, em operação.

Vn	Rot. Sem água.	In	Rot. Com água.	Vazão
(V)	(RPM)	(A)	(RPM)	(l/min)
90	3363	1,22	2770	16
100	3388	1,44	2918	17
127	3390	2,5	3092	18

Fonte: Machado, 2009.

Onde:

Vn = Tensão elétrica aplicada ao motor.

In = Corrente elétrica solicitada pelo motor.

Rot = Rotação.

Machado (2009) observou que, com uma tensão de 90 V (30% abaixo da tensão nominal- 127 V) a vazão foi de 16 l/min, somente 10% menor que a vazão final de 18 l/min, com a tensão em 127 V e que o motor elétrico funciona bem com esta tensão elétrica (90 V).

Apenas como dado comparativo, é interessante observar que uma motobomba com uma potência elétrica de 300 W, com motor CC, importada custa aproximadamente três vezes mais do que uma com motor CA Indução Gaiola monofásico, tipo *Shaded Pole*, fabricada no Brasil.

Na Figura 11 pode se visualizar no estator desse motor CA as duas bobinas de sombra (fio grosso) embutidas nas ranhuras (fendas) em cada uma das sapatas polares (pólos).

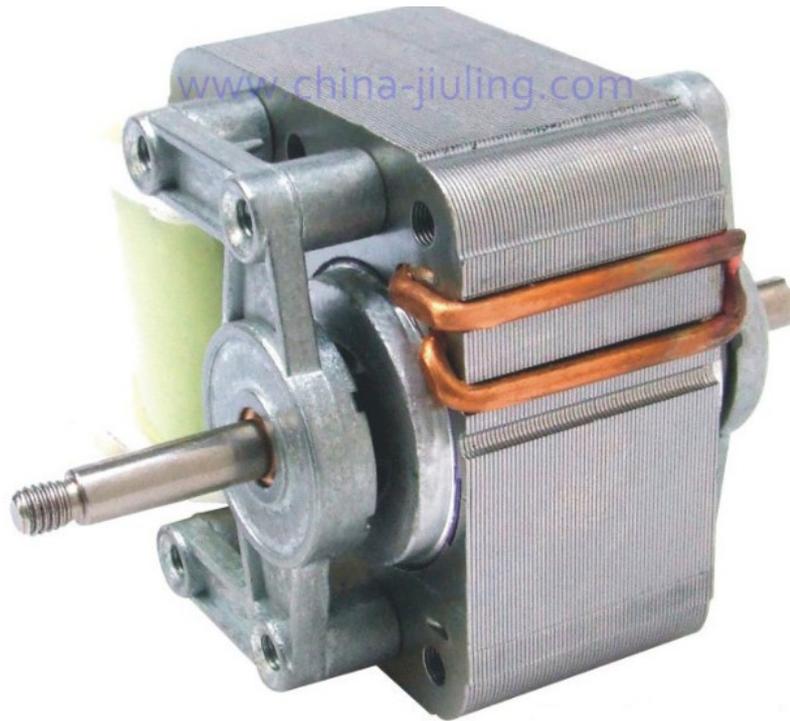


Figura 11 – Vista com detalhe do estator do Motor de CA indução Shaded Pole.

Fonte: EBERLE 2010.

4.5 Inversores CC-CA

A eletricidade produzida pelos painéis fotovoltaicos durante o processo de conversão da energia solar em energia elétrica é do tipo corrente contínua (CC), fato que limita, em muitos casos, o consumo de energia e os usos finais, pois o mercado de equipamentos alimentados com este tipo energia é ainda limitado. Nos casos em que se deseja usar aparelhos em corrente alternada (CA), o sistema necessitará de possuir um Inversor, que transforma a corrente contínua em alternada. Os inversores, também denominados de Conversores de Corrente, usados para energia fotovoltaica apresentam a estrutura básica de acordo com a Figura 12, onde o conversor CC eleva o nível CC (corrente contínua), que depois será convertida em CA através do chaveamento.

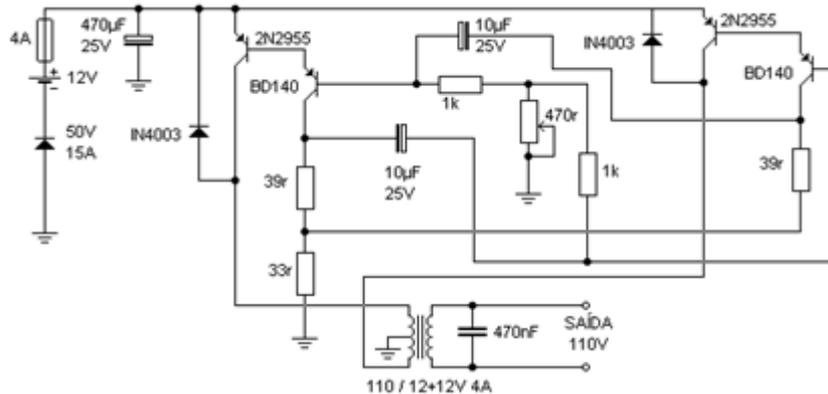


Figura 12 – Exemplo de configuração de um inversor CC-CA (12V-127V).

Fonte: Martins, 2005.

O inversor deverá garantir o fornecimento de energia elétrica com a qualidade necessária para que não se produza nenhuma degradação dos aparelhos ligados ao sistema ou prejudique os seus funcionamentos. O dimensionamento do inversor deve ser feito de acordo com a potência nominal, fator de demanda e característica de operação das diversas cargas.

Existem basicamente dois tipos de inversores atualmente no mercado: os que produzem onda senoidal modificada e os que produzem onda senoidal pura. A diferença entre eles é sutil, porém significativa quanto à forma de operar certas cargas. O inversor de onda senoidal modificada pode suprir de forma satisfatória a maioria dos equipamentos de iluminação e eletrodomésticos de uma residência. Tem um custo menor, porém, pode apresentar problemas com alguns tipos de equipamentos de precisão como impressora a laser, relógios digitais e carregadores de bateria para equipamentos sem fio. O inversor de onda senoidal pura é projetado para fornecer energia de qualidade igual ou superior à fornecida pela concessionária. Este equipamento auxiliar de acondicionamento de potência tem por objetivo converter a CC, desenvolvida pelo painel fotovoltaico e armazenada na bateria, em CA (com a tensão desejada, 127 ou 220 V), para movimentar o motor elétrico, que aciona a bomba de recalque. Certos tipos de inversores, além de realizarem a conversão de CC em CA, também protegem as baterias, aumentando sua vida útil, desligando-as automaticamente do sistema, quando estão muito descarregadas (abaixo de 10 V) ou quando a tensão do painel fica muito alta, acima de 15V (MARTINS, 2005).

4.6 Armazenamento de Energia

O armazenamento da energia elétrica não é um problema particular só dos geradores solares, mas também das centrais elétricas convencionais. As águas armazenadas nos reservatórios das usinas hidrelétricas são os sistemas convencionais de armazenamento mais importantes. Como os locais disponíveis são limitados, torna-se cada vez mais urgente fazer melhor uso das reservas existentes e explorar novos locais e métodos, como é o caso da Usina de Traição (Eletropaulo), no rio Pinheiro, em São Paulo, onde as águas são rebombadas para um nível mais elevado, quando há sobra de energia elétrica no período da madrugada, para serem novamente usadas na geração de energia, no período de maior demanda, durante o dia (Furnas – SP).

Existem vários métodos de armazenar energia, tais como:

- ar comprimido em cavernas (CAES);
- energia em magnetos supercondutores;
- volantes inerciais (*Flywheels*);
- hidrogênio.
- acumuladores eletroquímicos (baterias).

A utilização de CAES toma como base a existência de cavernas ou minas de carvão abandonadas para o armazenamento de ar comprimido, que se difere completamente do estudo proposto. O uso de supercondutores e *Flywheels* para armazenamento de energia elétrica é altamente custoso e requer uma significativa quantidade de energia a ser armazenada, de forma que justifique sua aplicação. O armazenamento de hidrogênio – via processo de eletrólise só é justificável – para a comercialização do mesmo ou para a alimentação de células de combustível (BARIN, 2007).

A partir destes argumentos, percebe-se que os acumuladores eletroquímicos, especialmente as baterias tipo Chumbo-ácido, são os mais apropriados para utilização nos conjuntos de painéis fotovoltaicos (BARIN, 2007).

4.7 Baterias

As baterias podem ser classificadas em duas categorias; primárias e secundárias. As baterias primárias não podem ser recarregadas, ou seja, uma vez esgotados os reagentes que produzem energia elétrica, devem ser descartadas.

As secundárias podem ser recarregadas através da aplicação de uma corrente elétrica em seus terminais. Uma bateria secundária é constituída por um conjunto de acumuladores eletroquímicos. Cada acumulador, **do tipo chumbo-ácido** (usados atualmente nos veículos automotores, nos sistemas de emergências, Nobreak, etc.), é formado por um conjunto de placas (grades) positivas e um conjunto de placas negativas, construídas de chumbo reforçadas com antimônio, sendo empastadas com óxido de chumbo e óxido de bário. As placas negativas ainda possuem um ingrediente denominado de Negro de Fumo (raspa de pneu), usado para diferenciá-las das placas positivas. As placas positivas e as placas negativas, que possuem a mesma área, são separadas por um isolante (separador) e mergulhadas dentro de um pequeno tanque (vaso) contendo uma solução (eletrólito) de ácido sulfúrico (H_2SO_4) com água destilada (H_2O) na proporção de 1:5 (COYNE, 1985 b).

Quando essas baterias estão montadas e ainda não receberam carga elétrica, tanto as placas positivas, como as placas negativas são de Sulfato de Chumbo. Após serem carregadas (receber energia elétrica), as placas positivas se transformam em Peróxido de Chumbo e as placas negativas voltam a ser Chumbo Puro. Além disso, surge uma tensão de 2 volts, entre o conjunto das placas positivas e o conjunto das placas negativas, por acumulador e a densidade do eletrólito passa de 1,13 para 1,28.

A quantidade de eletricidade acumulada em cada acumulador (vaso), dada em Ah (Ampère-hora), depende somente das placas positivas e é dada pela equação (4):

$$Ah = 2 A.PP.538/ 10000 \quad (COYNE, 1985 b) \quad (4)$$

Onde:

A = área da placa positiva, em cm^2 ;

PP = número de placas positivas;

538 = constante de ajuste;

10000 = transformação de m^2 para cm^2 .

As placas, tanto as positivas como as negativas, têm, comumente, em torno de 140 cm² e cada placa positiva possibilita acumular aproximadamente 15 Ah. Em cada vaso, sempre existe uma placa negativa a mais do que as placas positivas. Por exemplo, numa bateria de 9 placas (por acumulador) existem 4 placas positivas e 5 placas negativas, e pode acumular em torno de 60 Ah.

Comercialmente, existem no mercado três tipos de Baterias chumbo-ácida:

- selada, também chamadas *Freedon* (sem manutenção);
- semi-selada (com pouca manutenção);
- não selada ou comum (que necessitam de manutenção).

As baterias seladas (*Freedon*) possuem as placas mais reforçadas. Os isolantes (separadores) são feitos de envelopes de PVC, que envolvem cada uma das placas (positivas ou negativas), possibilitando que a bateria suporte melhor as sobre-cargas, que normalmente a danifica. Não há necessidade de manutenção, isto é, repor (H e O), que são liberados durante a carga ou descarga, pois possuem uma câmara de expansão, onde ficam os gases H e O, que posteriormente voltam ao eletrólito. Por estas vantagens, seu custo, em comparação aos outros tipos, é mais elevado.

As baterias semi-seladas não possuem tantas vantagens como as *Freedon*, pois suas placas não são reforçadas e o isolante (separador) é de papelão. Em caso de fuga de H e O, como também de S (enxofre), devido a uma sobrecarga, elas podem ser deslacradas por um técnico, para que estes elementos que foram liberados possam ser repostos. Também não necessitam manutenção periódica. Seu custo varia em torno de 70% de uma *Freedon*.

As baterias não seladas, denominadas de Comum, necessitam de manutenção. O separador também é de papelão. A cada 15 dias, há necessidade de repor H e O, liberados durante o funcionamento, completando o nível do eletrólito com água destilada (H₂O). Em último caso, é possível colocar água de torneira, mas não é recomendável, pois tudo que não for H e O, ficará depositado no fundo do acumulador (vaso) e com o tempo danificará a bateria. Seu custo varia em torno de 50% de uma *Freedon*.

Se a recarga for tipo lenta, (graduada em torno de 2 A), durante um período superior a 12 horas, com uma tensão não excedendo a 2,4 volts/vaso, e não for sujeita a sobrecarga, o tempo de vida de uma bateria poderá chegar a 10 anos. No uso para sistemas de bombeamento de água com painéis fotovoltaicos, a motobomba não provoca sobrecarga (exige baixa corrente elétrica) e a recarga realizada pelo painel fotovoltaico, por sua vez, será lenta, o que faz com que a bateria tenha longa durabilidade.

As baterias Chumbo-Ácido são as mais utilizadas para o armazenamento de eletricidade produzida por painéis fotovoltaicos. Embora tenham uma um tempo de vida normal (sem maiores cuidados) em torno de cinco anos, este poderá ser aumentado, com o uso de CCTM (Controladores de Carga de Tensão Máxima), que permite aplicar no máximo 2,4 V/vaso. Para se aumentar a durabilidade destas baterias, também, é preciso recarregá-las adequadamente, conforme as recomendações dos fabricantes, antes que sua descarga alcance níveis inferiores aos pré-estabelecidos para sua profundidade de descarga (ROSEMBACK, 2004) (BARIN, 2007).

Além das baterias chumbo-ácido, existem as baterias alcalinas, compostas por elementos tais como: níquel-ferro, cádmio-enxofre, lítio, etc. Embora tenham um tempo de vida maior do que as baterias chumbo-ácido, são caras e normalmente possuem materiais radioativos prejudiciais à saúde. São usadas mais em outras finalidades, tais como celulares, calculadoras, controles: de TV, de condicionadores de ar, de splits, etc.

As baterias de íons de Lítio, usadas em celulares e *Note-book*, possuem o eletrodo negativo, ou ânodo, constituído de uma material a base de Carbono, que é necessário para acomodar os íons de lítio que se desprendem na reação quando sai a corrente da bateria. Esses íons depois voltam à bateria durante o procedimento de recarga. De acordo com cientistas, se o ânodo fosse de Silício, seria possível acomodar dez vezes mais íons, do que o Carbono. O problema é que o Silício se esfarela quando ocorrer vários ciclos de carga e descarga, dando perda total à bateria (BATERIA DE LÍTIO, 2010).

4.8 Controladores de carga

Os controladores de carga são componentes indispensáveis para o sistema fotovoltaico, pois permitem controlar o limite de carga que as baterias podem receber dos painéis, evitando desta forma a sua queima por sobrecarga e conseqüente aumento do ciclo de vida destas. São especificados pela tensão elétrica e pela corrente elétrica de trabalho dos painéis. Sua capacidade deve superar a corrente total dos painéis a serem conectados. Caso a corrente supere o valor do controlador, deve ser considerada a possibilidade de divisão de instalação.

São compostos por um circuito de controle e outro de comutação. O circuito de controle monitora as grandezas do sistema, como tensão, corrente e temperatura na bateria,

processando essas informações e gerando sinais de controle que são utilizados para comandar o circuito de comutação. O circuito de comutação é formado por chaves semicondutoras que controlam a tensão e/ou a corrente de carga ou de descarga das baterias.

As principais funções atribuídas aos controladores de carga das baterias são:

- providenciar o carregamento da bateria;
- evitar sobrecarga na bateria;
- bloquear corrente reversa entre a bateria e o painel;
- prevenir descargas profundas (no caso de baterias chumbo-ácido).

Existem basicamente dois tipos de controladores, os que são conectados em paralelo e os que são conectados em série.

Os controladores conectados em paralelo são constituídos de transistores que dissipam a potência gerada em excesso, quando a tensão nos pólos da bateria atingir um valor determinado quando a temperatura for de 25°C. Neste caso, é conveniente instalar um diodo de bloqueio entre a bateria e o transistor para evitar dissipação da energia das baterias através dos transistores.

Os controladores conectados em série desconectam os painéis das baterias quando a tensão atinge um determinado valor pré-fixado. O interruptor utilizado pode ser um dispositivo eletromecânico, como um relé, ou estático, por exemplo, um transistor.

Para a proteção de sobrecarga, o controlador desconecta o gerador fotovoltaico (painel) da bateria quando a tensão em seus pólos atinge cerca de 2,45 V/vaso, voltando a conectá-la quando a tensão cair para 2,2 V. Para a proteção de sobredescarga, o controlador desconecta a carga da bateria quando a tensão em seus pólos atingir um valor determinado pela profundidade de descarga máxima estipulada para o subsistema de acumulação em questão. O controlador de carga volta a conectar a carga na bateria quando a tensão nos pólos desta atingir cerca de 2,1 V/vaso. Estes valores de tensão podem variar segundo o tipo e o regime de trabalho dos acumuladores.

CAPITULO V – APROVEITAMENTO DA ÁGUA BOMBEADA PELOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: METODOLOGIA E APLICAÇÃO PRÁTICA

5.1 Introdução

Dependendo do volume de água bombeada, pelo sistema fotovoltaico que esta sendo analisado, a mesma poderá ser usada para as seguintes finalidades:

- Consumo humano e/ou saneamento básico;
- Irrigação e /ou fertirrigação;
- Bebedouro para animais domésticos.

5.1.1 Consumo humano e/ou saneamento básico

De acordo com Filho (1996), o consumo de água para pessoas, no meio rural, é em média de 80 litros por dia, água usada para consumo, higiene pessoal, cozimento de alimentos, etc.

5.1.2 Irrigação ou Fertirrigação

De acordo com Filho (1996), a quantidade de água usada na irrigação de hortigranjeiros, em pequenas propriedades rurais, é em torno de 05 litros por metro quadrado, por dia.

A figura 13 mostra uma caixa de água instalada a aproximadamente dois metros de altura utilizada na Irrigação Localizada, no processo de Gotejamento ou Xique-xique. A altura da pessoa posicionada, ao lado da caixa, serve de comparação da altura da mesma.



Figura 13 – Caixa de água para irrigação por gotejamento.

Fonte: Santos, 2002.

No método de gotejamento, podem ser usados gotejadores com múltiplas saídas, conforme mostra a figura 14.



Figura 14 – Gotejador com múltiplas saídas.

Fonte: Santos, 2002.

Um método mais simplificado de gotejamento, usado no nordeste do Brasil, é o xique-xique (nome de um cacto muito comum na região), que consta de um pequeno furo aberto na mangueira, na ordem de 1 mm, coberto por uma capa (mangueira de maior diâmetro, com de 10 cm de comprimento) aberta longitudinalmente e aplicada sobre a mangueira de menor diâmetro. A vazão é regulada pela posicionamento da capa sobre a mangueira.

O sistema de gotejamento também poderá ser utilizado na fertirrigação, isto é, para a colocação de fertilizantes ou nutrientes nas plantas.

5.1.3 Bebedouros

Segundo Filho (1996), a quantidade aproximada de água, por dia, para consumo de animais domésticos é:

Gado	- 50 litros.
Suínos	- 12 litros.
Eqüinos	- 40 litros.

5.2 Procedimentos experimentais para a avaliação do sistema de bombeamento fotovoltaico

Um Painel Solar padrão com células fotovoltaicas de Silício Policristalino, que produz 68 Wp de potência elétrica (quando a radiação solar é de 1000 W/ m²) foi fixado no solo, ou colocado numa plataforma montada sobre um carrinho de mão, com a frente virada para o NORTE e com uma inclinação de 30 graus, com relação ao solo, num local sem sombras e com boa insolação.

Para proporcionar maior mobilidade, a caçamba do carrinho de mão, pode servir para transportar o restante dos equipamentos (motobomba, bateria, mangueira, inversor, etc), quando houver necessidade de deslocar o sistema.

O painel fotovoltaico deve produzir eletricidade suficiente para abastecer uma bateria estacionária ou de veículo automotor, do tipo Chumbo-ácido de 70 Ah-12 Volts.

A bateria alimentou um motor elétrico CA, que por sua vez acionou uma bomba de recalque (motobomba) de superfície, comercial e de fabricação brasileira.

O motor elétrico que acionou a bomba de recalque é de CA, monofásico, tipo *Shaded Pole*, com tensão nominal (V_n) de 220 volts.

A conversão da CC, fornecida pela bateria, proveniente do painel fotovoltaico, para alimentar o motor CA, foi feita por um Inversor CC-CA, comercial.

A tensão elétrica desenvolvida pelo painel foi monitorada por um Controlador de Carga Solar.

A determinação da vazão diária da bomba e do consumo (A) do motor elétrico da mesma foi realizada no Laboratório de Hidráulica do CT. A água bombeada foi fornecida, inicialmente, por um reservatório do laboratório. A eletricidade (A) diária, fornecida pelo painel solar à bateria, em função da carga instalada no painel, foi medida por um amperímetro CC, tipo analógico, instalado junto ao painel. A tensão elétrica foi mantida em 12 V (mesma tensão da bateria) e medida por um voltímetro CC analógico, também instalado junto ao painel.

A quantidade de horas (por dia) em que a motobomba pode funcionar, conseqüentemente quanto de água irá bombear, depende da eletricidade fornecida pelo painel fotovoltaico durante o dia.

O uso de um motor CA, do tipo *Shaded Pole*, acoplado à bomba, embora necessite de acessórios para a conversão de CC em CA (inversor, transformador), tem as vantagens de ser de baixo custo, não precisar de manutenção regular e de ser facilmente encontrado em lojas comerciais, o que não ocorre com as motobombas acionadas por motores CC, importadas, de alto custo (aproximadamente três vezes mais cara que uma motobomba de fabricação brasileira), normalmente utilizadas nos sistemas para bombeamento de água.

A manutenção dos painéis solares constituísse simplesmente na limpeza do vidro que protege as células fotovoltaicas. O caso mais grave que poderia ocorrer era a quebra do vidro por algum impacto acidental ou por queda de granizo.

5.3 Avaliação Experimental

5.3.1 Desempenho da motobomba

Os testes para a avaliação do desempenho da motobomba foram realizados no Laboratório de Hidráulica do Centro de Tecnologia, utilizando-se os seguintes equipamentos:

Uma motobomba com motor CA, tipo *Shaded Pole*, de 300W- 220 V- 1,40 A -3390 RPM, (Modelo 31EBC620040 de fabricação brasileira), tendo como acessórios uma válvula de pé (25 mm) acoplada numa curva de 90 graus (20 mm) na sucção e um registro (para drenagem da mangueira) instalado numa conexão T, na saída da bomba.

A motobomba foi fixada numa plataforma de madeira e posicionada sobre um flutuador, para ser colocada dentro de um tanque com água.

Detalhes da motobomba, com acessórios, posicionada num flutuador, dentro do tanque para captação de água estão mostrados na figura 15.



Figura 15 – Motobomba CA, monofásica com acessórios.

- Um variador de tensões elétricas (VARIAC), com regulagem de 0 a 240 volts.
- Um amperímetro CA (medidor de corrente alternada) digital.

Detalhes dos aparelhos elétricos usados nas medições elétricas do motor, com o amperímetro CA posicionado à esquerda, são apresentados na figura 16.



Figura 16 – Instrumentos de medições usados no motor CA da bomba.

- Um medidor de vazão (bambona de plástico), 20 litros, graduada de 5 em 5 litros.
- Uma mangueira de PVC, com 18 mm de diâmetro e 3 metros de comprimento.

5.3.1.1 Primeira simulação

Com os equipamentos acima relacionados foi montada uma instalação de bombeamento experimental, com detalhes mostrados na figura 17. A motobomba colocada

numa plataforma de madeira e posicionada num flutuador foi colocada dentro de um tanque com água. Uma mangueira de PVC, com 18 mm de diâmetro interno e 3 metros de comprimento, foi usada para levar a água, bombeada pela motobomba, a três diferentes alturas de recalque. A quantidade de água bombeada (volume) foi medida através da bombona. Foram aplicadas três diferentes tensões elétricas ao motor elétrico da motobomba, para verificar o seu comportamento, quando a tensão elétrica for diferente (menor) do que a sua tensão elétrica nominal ($V_n = 220 \text{ V}$).



Figura 17 – Instalação experimental do bombeamento fotovoltaico.

Com a montagem da estação foi realizada a primeira simulação considerando três diferentes alturas de recalque, sem alterar altura de sucção, pois a motobomba estava flutuando na superfície da água.

Nesta simulação foram medidos os seguintes valores registrados na tabela 4.

Tabela 4 – Primeira simulação. Resultado dos testes da motobomba CA.

Altura de recalque: 3,0 metros / Tensão no motor CA.	Ip (A)	In (A)	Vazão; litros/ minutos	Vazão; litros/ hora	Potência elétrica desenvolvida pelo motor (W)
220 V	0,46	1,40	15	900	300
190 V	0,64	1,25	12	720	240
160 V	0,78	1,03	8	480	170
Altura de recalque: 2,0 metros (V)	Ip (A)	In (A)	Vazão litros/ minutos	Vazão litros/ hora	Potência elétrica desenvolvida pelo motor (W)
220 V	0,46	1,40	21	1260	300
190 V	0,65	1,28	20	1200	240
160 V	0,75	1,07	15	900	170
Altura de recalque; 1,5 metros (V)	Ip (A)	In (A)	Vazão litros/ minutos	Vazão litros/ hora	Potência elétrica desenvolvida pelo motor (W)
220 V	0,46	1,40	24	1440	300
190 V	0,65	1,27	22	1320	241
160 V	0,60	1,10	18	1080	176

Local: Laboratório de Hidráulica – CT - UFSM.

Fonte: O autor

Ip (A) é corrente elétrica que o motor elétrico da motobomba solicita na partida.

In (A) é a corrente elétrica que o motor elétrico solicita quando atinge a potência elétrica máxima (300 W) e a rotação máxima (nominal) = 3390 RPM.

As tensões elétricas diferentes de 220 V, (160 e 190 V), foram aplicadas ao motor elétrico, através de um variador de tensões elétricas (VARIAC), para verificar o seu

comportamento, isto é, se haveria perigo de queimar e como seria a sua partida com a tensão elétrica reduzida.

5.3.1.2 Segunda simulação

Para diminuir as perdas de carga no sistema de bombeamento, foram retirados, no sistema de recalque (saída da bomba), a curva de 90 graus, o registro e as reduções de diâmetro. A mangueira de PVC foi trocada por outra de 25 mm de diâmetro, com 3,5 metros de comprimento. Também foi reposicionada a motobomba na plataforma de madeira, de tal maneira que a saída (recalque) ficasse virada para cima. Foram mantidas na motobomba, a curva de 90 graus e a válvula de pé, para que o usuário possa usá-la quando for recalcar água de um poço, cisterna ou açude. Detalhes são mostrados na figura 18.



Figura 18 – Motobomba, sem acessórios na saída, reposicionada na plataforma.

O reposicionamento foi realizado para evitar cavitação na bomba quando esta entrar em operação.

Com esta nova situação foram medidas as vazões da motobomba considerando quatro diferentes alturas de recalque: 1,5; 2,0; 3,0 e 3,5 metros, com suas respectivas perdas de carga.

A mangueira foi mantida com o mesmo comprimento e diâmetro para que o usuário pudesse usá-la nas diferentes situações de recalque.

A tensão elétrica aplicada no motor elétrico da bomba foi mantida sempre em 220 V.

A perda de carga na curva de 90 graus (20 mm ou 3/4") é de 0,5 mca e na válvula de pé (25 mm ou 1") é de 5,3 mca, resultando na sucção uma perda de carga total de 5,8 mca.

O cálculo da perda de carga unitária J, na mangueira de PVC (25 mm de diâmetro interno), foi efetuado de acordo com a equação (5). (Fair-Whipple-Hsiao).

$$J = 8,74 \cdot 10^{-4} \cdot Q^{1,75} / D^{4,75} \quad (\text{m/m}). \quad (5)$$

onde:

Q é a vazão em metros cúbicos por segundo. (m³/s).

D é o diâmetro interno da mangueira em metros.(m).

Aplicando os diferentes valores de recalque, vazões medidas e perdas de carga, na equação (5), foram obtidos os seguintes resultados:

Recalque de 1,5 metros. Vazão medida na simulação: 1920 l/h

Altura manométrica total = 7,3 mca.

Recalque de 2.0 metros. Vazão medida na simulação: 1620 l/h

Altura manométrica total = 7,8 mca.

Recalque de 3,0 metros. Vazão medida na simulação: 1080 l/h

Altura manométrica total = 8,8 mca.

Recalque de 3,5 metros. Vazão medida na simulação: 660 l/h

Altura manométrica total = 9,3 mca.

5.3.1.3 Terceira Simulação

Além das medidas de vazões apresentadas na segunda simulação, foi realizada uma terceira simulação, onde foram retirados os acessórios que provocavam as perdas no recalque (saída da motobomba), mas mantidas a curva de 90 graus, a válvula de pé e a mangueira de 18 mm com 3,0 metros de comprimento.

Foi realizada somente uma medição, em uma altura de recalque de 2,0 metros, obtendo-se uma vazão de 23 l/min ou 1380 l/h, sendo proporcionado um acréscimo de 120 l/h, com relação ao valor medido na Primeira Simulação (tabela 4), com um acréscimo em torno de aproximadamente 10%.

5.3.1.4 Traçado da curva vazão X altura manométrica

A motobomba mostrou melhor desempenho de vazões, na segunda simulação, quando foram retiradas a curva de 90 graus, a conexão T com o registro e trocada a mangueira de 18 mm para 25 mm de diâmetro interno, isto é, foram reduzidas as perdas de carga na saída da bomba.

Como se procurou determinar o desempenho máximo da motobomba, os resultados das outras simulações (primeira e terceira) foram desprezados.

Na segunda simulação, com os valores medidos das vazões e com as alturas manométricas calculadas, para diferentes alturas de recalque, definiu-se a curva da motobomba usada neste sistema de bombeamento (gráfico na figura 19).

A curva desta motobomba, para fins comparativos de desempenho, definida pelo fabricante, esta apresentada na figura 21, desta dissertação. (Catálogo do Fabricante).

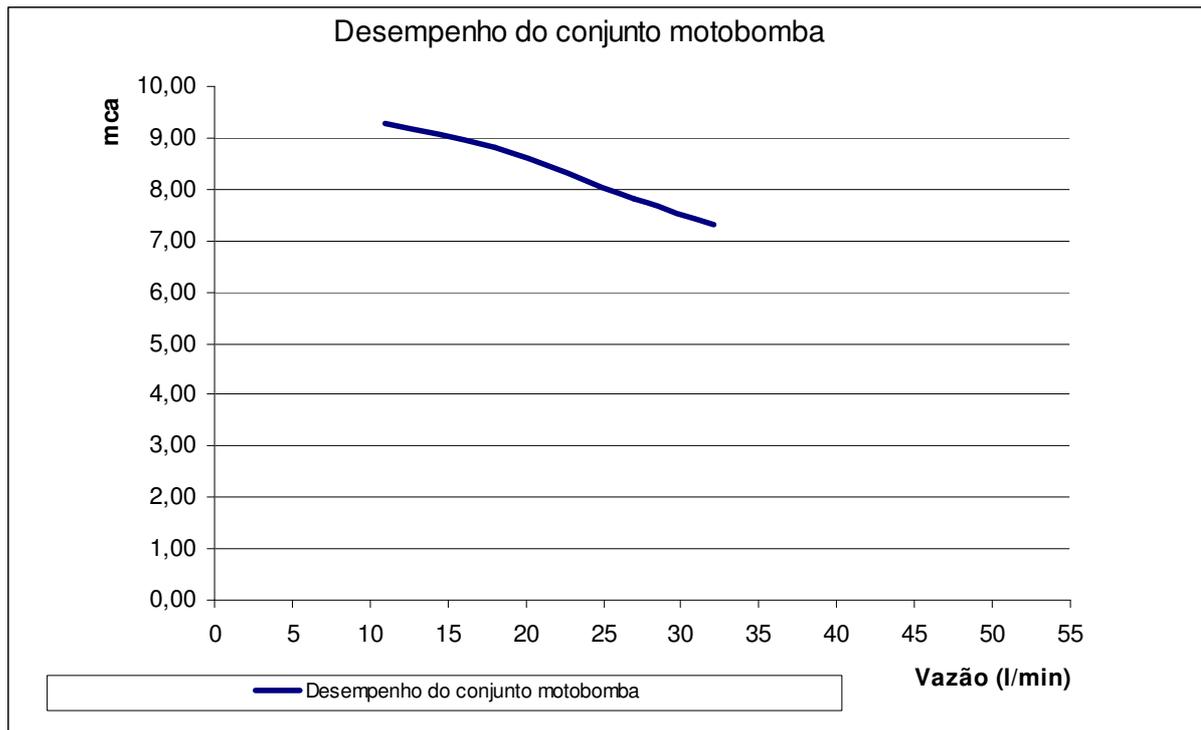


Figura 19 – Gráfico com a curva da motobomba com dados obtidos na segunda simulação.

As variações de tensões aplicadas ao motor CA, na primeira simulação (tab. 4), conseguidas através do variador de tensões (VARIAC), foram realizadas para verificar o comportamento do motor (perigo de pane), quando a bateria não estiver com a carga total, ou quando a Radiação Solar estiver baixa devido à estação do ano ou quando o céu estiver nublado. Como se pode observar, com a altura de recalque de 3,0 metros, por exemplo, a motobomba em condições nominais (220 V) bombeou 900 litros/hora (100%), com 190 V (86% de 220 V) bombeou 720 litros/hora (80% de 900 l/h) e com a tensão de 160 V (53% de 220 V) bombeou 480 litros/h (72% de 900 l/h). Isto comprova que o motor, embora com menor desempenho, pode operar com tensões abaixo da nominal (220 V) sem o perigo de pane (queima).

O que também se pode observar é a pequena corrente de partida (I_p) do motor da bomba, que com a tensão elétrica nominal de 220 V, foi de 0,46 A (33% da corrente nominal de 1,4 A), enquanto que normalmente nos motores de CA com partida a vazio, (como é o caso de motobombas), a I_p é de 300 a 500 % da corrente nominal (I_n). O motor elétrico partiu sem problemas com as tensões elétricas reduzidas, isto possibilita ao motor dar partida com a bateria com carga reduzida e logicamente bombear uma menor vazão (COYNE, 1985 a).

Se a tensão elétrica for maior do que a nominal, quando a Radiação Solar for acima de 1000 W/ m^2 , não haverá possibilidade de pane no motor elétrico devido à sobretensão, porque tanto o Inversor, como o Controlador de Carga Solar não permitem que a tensão elétrica ultrapasse de 220 V.

Quando a tensão elétrica da bateria for muito baixa (subtensão) o Controlador de Carga desliga o circuito.

5.3.2 Desempenho do painel fotovoltaico

Num local com boa insolação e sem sombra, foram realizados os testes do desempenho do painel fotovoltaico, utilizando-se os seguintes equipamentos:

- Um painel fotovoltaico com células de Silício Policristalino, de 68 Wp (quando a radiação solar é de 1000 W/ m^2) e que desenvolve $V_{oc} = 20,6 \text{ V}$;
- Um amperímetro CC, tipo analógico, com escalas de 1, 5 e 10 A;
- Um voltímetro CC, tipo analógico, com escalas de 30, 75 e 150 V;
- Cinco lâmpadas automotivas de 12 V, com potências elétricas de 5, 21 ou 26 W conectadas ao painel como cargas elétricas.

O circuito elétrico, com os equipamentos acima mencionados, foi montado num lugar com boa insolação, com o painel posicionado num ângulo de 30 graus com relação ao solo e com a frente voltada para o Norte, conforme detalhes mostrados na figura 20.

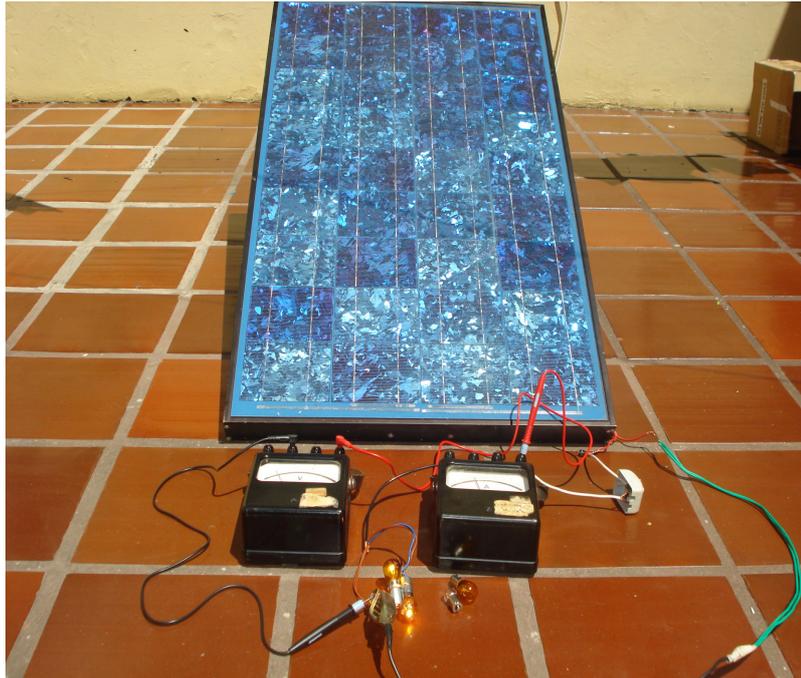


Figura 20 – Medição do desempenho do painel fotovoltaico com o circuito montado.

As lâmpadas foram associadas em circuitos em série ou paralelo, com o objetivo de proporcionar diferentes cargas elétricas, fazendo com que a tensão elétrica (V) fornecida pelo painel, permanecesse constante em 12 volts. A cada hora do dia (com diferente Radiação Solar) a carga aplicada ao painel (lâmpadas) era alterada e a corrente elétrica fornecida pelo mesmo era medida no amperímetro.

Quando o painel foi ligado ao circuito, sem carga (com as lâmpadas desligadas), a tensão elétrica (V_{oc}) foi medida em 17,5 V.

Além das medidas realizadas com o painel fixo, foram realizadas medidas com rastreamento solar do painel (realizado manualmente).

As medidas foram realizadas durante o dia 01 de novembro de 2011 e estão apresentadas na tabela 5.

Tabela 5 – Resultado dos testes do Painel fotovoltaico. 68 Wp. (Dia 01/11/2011).

Hora do dia	Tensão elétrica do painel (V) com carga	Cor.Elétrica fornecida pelo painel fixo (A)	Cor. Elétrica do painel c/rastreamento(A)	Potência Elét. do painel (W) - Fixo-	Rad.solar. W/m ² (*)
08:00	12	1,9	2,6	23,5	570
09:00	12	2,4	2,8	26,5	770
10:00	12	3,5	3,6	42,0	910
11:00	12	3,6	3,6	43,5	990
12:00	12	3,7	3,7	44,5	1010
13:00	12	3,6	3,6	43,5	980
14:00	12	3,5	3,6	42,0	870
15:00	12	2,8	3,3	33,5	710
16:00	12	2,4	3,0	26,5	615
Totais	12 V.	Imáx: 3,7 A. Imin: 1,9 A. Iméd: 3,04 A. Itotal: 27,4 A	Itotal:29,8 A (+ 10 %)	Pmáx: 44,5 W Pmín: 22,8 W Pméd: 36,4 W	Total: 7415. Wh/m ² Média Diária: 825. (W/m ²)

(*) Radiação Solar diária. Fonte: INMET - Estações automáticas - Santa Maria, RS.

A corrente elétrica fornecida pelo painel fixo, durante o dia (01/11/2011), das 08 às 16h (pois às 17h a tensão elétrica caiu para 10 volts), foi de 27,4 A.

Considerando o painel com Rastreamento Solar, a corrente elétrica diária fornecida pelo painel, subiu para 29,8 A (Incremento de 10 %).

A potência elétrica máxima produzida pelo painel, foi de 44,5 Wp (às 12:00 h do dia 01/11/2011), com uma corrente máxima de 3,7 A e com radiação solar de 1010 W/m².

No dia 04 de dezembro 2011, às 12:00 h, foi novamente medida a corrente elétrica fornecida pelo painel, com a tensão elétrica de 12 V, ficando em 3,58 A, desenvolvendo uma potência elétrica de 43,5 W, com uma Radiação Solar de 1000 W/m² (Dado fornecido pelo INMET).

Não foram realizadas medições em outros dias do ano, porque com uma só medição (durante um dia no ano) pode-se determinar o desempenho do painel, isto é, a potência elétrica máxima (Wp) fornecida pelo mesmo.

5.3.3 Radiação Solar

Considerando a posição geográfica do município de Santa Maria localizado na latitude de 29°, 40' e 58" S, a radiação global média mensal emitida pelo sol durante o ano de 2008, com valores de Wh/m²/dia, é dada pela tabela 6,

Tabela 6 – Média anual mensal de Radiação Solar em Santa Maria. – Ano 2008.

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.
Valor	5970	5610	4860	4030	3140	2500
Mês	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Valor	2810	3440	4190	5670	6610	6970
				Média do	Ano :	4650

Média anual mensal – Ano 2008 = 4650 Wh/m²/dia. Fonte: NOGUEIRA, (2009).

A radiação solar global diária e média mensal (Wh/m²), do mês de janeiro de 2011 em Santa Maria – RS estão apresentadas na tabela 7, para demonstrar como é calculada a média diária mensal de cada mês do ano.

Tabela 7 – Valores diários dados em Wh/m², em Santa Maria. – Janeiro de 2011.

01- 4973	02- 2900	03- 6380	04- 6870	05- 5406	06- 8013	07- 7630
08- 5902	09- 6660	10- 5190	11- 7706	12- 6063	13- 6371	14- 6540
15- 7942	16- 7910	17- 4412	18- 6219	19- 7895	20- 4800	21- 6760
22- 7620	23- 6430	24- 6960	25- 7015	26- 3470	27- 6220	28- 6475
29- 7530	30- 7612	31- 5266			Média=	6205

Média diária mensal = 6205 Wh/m²/ dia.

As médias dos valores da Radiação Solar do ano de 2011 (tabelas 7 e 8), foram determinadas, pelo autor, em Wh/m², através de dados da Radiação Solar, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET - Estações Automáticas, com valores em kJ/m².

Fator de Conversão: $1 \text{ kJ/m}^2 = 0,277 \text{ Wh/m}^2$.

Tabela 8 – Média mensal e anual de Radiação Solar Global em Santa Maria. – Ano 2011.

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.
Valor	6205	5635	5040	3790	3220	2690
Mês	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
	2930	3750	4680	5370	6655	6724

Média anual mensal: $4.724 \text{ Wh/m}^2/\text{dia}$.

CAPITULO VI – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS E ORÇAMENTOS

6.1 Comparação de Resultados

Machado (2009) testou uma motobomba com motor CA *Shaded Pole*, marca EBERLE (300 W-127 V), simulando diferentes tensões elétricas aplicadas ao motor (cujos resultados estão apresentados na tabela 3 – página 45) e verificou que o motor elétrico desta motobomba pode operar sem maiores problemas (possibilidade de queima) com a tensão elétrica menor do que a tensão nominal (127 V), embora desenvolva menor potência elétrica.

O fabricante do painel fotovoltaico de (68 Wp) indica na placa de identificação que o mesmo poderá fornecer à bateria (12 V- 70Ah), em torno de 30 A por dia ($I_{máx} = 4,17$ A), com uma Radiação Solar Horizontal de 1000 W/m².

O fabricante da motobomba EBERLE usada neste sistema de bombeamento indica, no catálogo, que a mesmo poderá fornecer, com uma altura manométrica de 2,0 metros, em torno de 2400 l/h.

O motor CA da motobomba, com a tensão elétrica de 220 V, solicita uma corrente elétrica de 1,4 A (220 V), e com a tensão elétrica de 12 V, da bateria, exige uma corrente elétrica de 25 A.

6.1.1 Motobomba

O desempenho, curva vazão x pressão, da motobomba (cód.31EBC620040) usada neste sistema de bombeamento, esta representado na figura 21, que foi reproduzida do catálogo do fabricante.

CARACTERÍSTICAS	DESEMPENHO				MECÂNICA			APLICAÇÃO
	CÓDIGO	TENSÃO (V)	FREQ.(Hz)	CORRENTE NOM. (A)	VAZÃO(*) (L/MIN)	A	B	
31EBD250076	120	60	2,0	27	25,2	140	1	Circulação de Líquidos
31EBD250084	220	60	1,1	27	25,2	140	1	Circulação de Líquidos
31EBD250113	120	60	2,0	27	25,2	140	2	Circulação de Líquidos
31EBD250121	220	60	1,1	27	25,2	140	2	Circulação de Líquidos
31EBD250156	120	60	2,0	27	25,2	140	1	Lava Peças
31EBD250164	220	60	1,1	27	25,2	140	1	Lava Peças
31EBC620015	120	60	2,7	50	62,4	175	2	Lava Louça
31EBC620023	220	60	1,4	50	62,4	175	2	Lava Louça
31EBC620031	120	60	2,7	50	62,4	175	1	Circulação de Líquidos
31EBC620040	220	60	1,4	50	62,4	175	1	Circulação de Líquidos

OBS.:1- (*) Vazão a 1,0 mca (metro coluna de água).
2-Para modelos com corpo de 1 saída, eliminar saída $\phi 17$.
3-Modelos com vedação (selo mecânico) em borracha epiclorigidrina: 31EBD250156 e 31EBD250164, demais modelos em borracha EPDM.
4-Fixação através 2 porcas com rosca M5, conforme desenho acima.



Figura 21 – Dados da motobomba CA.

Fonte: EBERLE .2010.

Na segunda simulação (melhor desempenho da motobomba), com as medições realizadas no laboratório de Hidráulica do CT, o valor da vazão encontrado, com a tensão elétrica de 220 V no motor, altura de recalque de 2,0 metros e com a altura manométrica total de 7,8 mca, foi de 27 l/min (1620 l/h). Nesta situação o motor elétrico estava solicitando uma corrente elétrica de 1,40 A (com 220 V fornecido pelo Inversor) ou 25,0 A (com 12 V fornecido pela bateria).

Pela curva (vazão x pressão) do catálogo do fabricante (fig. 21) esta motobomba com altura manométrica de 2,0 mca, fornece 40 l/min.

Se fosse possível retirar os acessórios acima citados, no sistema de bombeamento proposto, provavelmente a motobomba poderia alcançar também os 40 l/min.

6.1.2 Pannel fotovoltaico

De acordo com dados de placa do pannel fotovoltaico usado neste sistema de bombeamento, figura 22, com uma radiação de 1000 W/m^2 , o pannel deveria desenvolver uma potência máxima ($P_{\text{máx}}$) de 68 Wp , uma tensão elétrica máxima a vazio (quando não há carga elétrica ligada) de $V_{\text{oc}} = 20,6 \text{ V}$ e uma corrente máxima de $4,17 \text{ A}$.

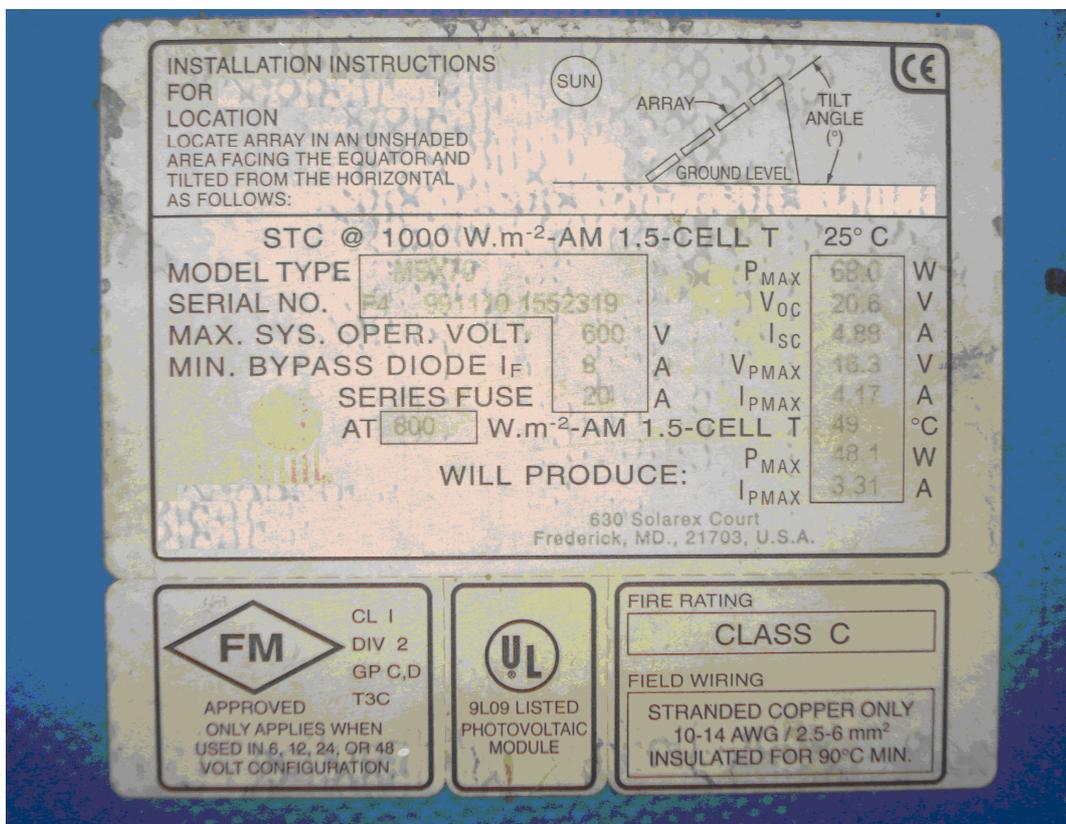


Figura 22 – Foto da Placa de Identificação com dados do pannel fotovoltaico usado no sistema de bombeamento.

Nas medições realizadas, a Potência Máxima ($P_{\text{máx}}$) desenvolvida pelo pannel ocorreu às 12h (01/11/2011), sendo de $44,5 \text{ Wp}$ (tab.5), menor que a potência elétrica máxima de placa de $68,0 \text{ W}$. Diferença de 35 %.

A tensão elétrica máxima medida, com o pannel sem carga, (V_{oc}) ficou em $17,5 \text{ V}$, menor que a tensão elétrica de placa de $20,6 \text{ V}$.

A corrente máxima fornecida pelo painel, também ocorreu às 12 h, medida em 3,7 A menor que a corrente máxima de placa de 4,17 A.

A Radiação Solar às 12 h era de 1010 W/m² (Tab.5). Dados do INMET para o dia 01/11/2011.

A corrente elétrica diária, fornecida pelo painel, ficou em 27,4 A/ dia, com o painel fixo, e 29,8 A/ dia usando o painel com rastreamento solar.

Esta diferença na potência máxima encontrada (35% menor) indica que o fabricante extrapolou no apresentar o desempenho do mesmo, pois esta diferença normalmente não ultrapassa a 10 %.

6.1.3 Aproveitamento da água bombeada

Na segunda simulação (melhor desempenho da motobomba CA), se o usuário optar por usar a água bombeada para consumo humano e/ou saneamento básico, onde a altura de recalque deve ser em torno de 3,0 a 3,5 metros, ele terá condições de bombear durante uma hora por dia, cerca de 660 litros de água (3,5 m) ou 1080 litros com 3,0 metros.

Se optar por usar a água bombeada para irrigação, onde a altura de recalque deve ser em torno de 2,0 metros (irrigação por gotejamento ou xique-xique), ele terá condições de bombear, durante uma hora por dia, cerca de 1.620 litros de água.

E se optar por usar a água bombeada para consumo de animais (bebedouro), recalcando água a uma altura de 1,50 metros, terá condições de bombear durante uma hora/dia, em torno de 1.920 litros de água.

6.1.4 Orçamento

Os valores, em reais, dos equipamentos usados no sistema de bombeamento fotovoltaico, deste trabalho, foram fornecidos por lojas comerciais brasileiras especializadas em bombeamento solar.

01 Painel fotovoltaico com potência de 68 Wp. R\$ 950,00

01 Inversor 12/220 V de 300 W.	R\$ 250,00
01 Bateria veicular de 12V-70 Ah.	R\$ 280,00
01 Motobomba 220 V – 300 W.	R\$ 165,00
01 Válvula de pé – 25 mm.	R\$ 25,00
01 Controlador de carga solar 12 V-10 A.	R\$ 250,00
Total.....	R\$ 1.920,00

Além dos equipamentos acima relacionados, deverão ser adicionadas as despesas dos acessórios: condutores elétricos (fios para a alimentação da bateria e da motobomba) e mangueira de PVC de 25 mm, com 3,5 metros, usada no recalque.

O sistema convencional, com motobomba CC, (importada -12 V), onde o painel é ligado direto na bateria (sem inversor), custa:

01 Painel fotovoltaico com potência de 68 Wp.	R\$ 950,00
01 Bateria veicular de 12 V- 70 Ah.	R\$ 280,00
01 Motobomba c/ Motor CC – 12 V.....	R\$ 450,00
01 Controlador de carga solar 12 V-10 A.	R\$ 250,00
Total.....	R\$ 1930,00

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com relação à implantação do sistema proposto e avaliado com motobomba monofásica CA, se comparado com o sistema convencional com motobomba CC, embora ambos apresentem relativamente o mesmo custo, a maior vantagem do sistema com motobomba acionada por motor CA *Shaded Pole*, é que essa tecnologia é de fabricação brasileira, podendo ser encontrada em qualquer loja de reposição para aparelhos eletrodomésticos. Ainda, deve-se considerar que, esses sistemas de bombeamento com motor CA monofásico, praticamente não necessitam manutenção e possuem grande durabilidade.

Em se tratando dos resultados alcançados de vazões obtidos na segunda simulação, o desempenho do sistema avaliado (com motobomba CA) mostrou-se satisfatório, considerando as diferentes vazões e opções do aproveitamento da água bombeada em cada dia:

- saneamento básico (recalque de 3,5 m) com cerca de 660 litros ou 1080 litros (com 3,0 m de recalque).
- irrigação (recalque de 2,0 m) com cerca de 1.620 litros.
- bebedouros (recalque de 1,5 m) com 1.920 litros.

Para se aproveitar o máximo da potência do motor e, conseqüentemente aumentar a vazão da bomba, poder-se-ia usar, além do Inversor CC-CA, um Controle Eletrônico de Potência, denominado MPPT (*Maximum Power Point Tracker*), que possui um seguidor de ponto máximo de potência, operando de modo a regular a tensão e a corrente do painel, a fim de obter o máximo de potência.

Um outro procedimento para aumentar a captação da radiação solar diária e, conseqüentemente, a vazão da água bombeada, seria de colocar junto aos painéis um dispositivo de Rastreamento Solar (*Tracking Systems*), que gira o painel fazendo com que esse acompanhe o movimento do sol. Esse procedimento também pode ser realizado manualmente.

Por outro lado, deve-se observar que a inclusão destes novos acessórios eletrônicos, além de diminuir a vida útil do sistema, pois no de rastreamento solar e no MPPT, existem componentes que requerem substituições, oneraria muito o custo final do sistema, também lembrando que a idéia é de tornar o custo menor possível, a fim de ser viável sua aplicação numa pequena propriedade rural ou assentamento rural.

A geração de energia elétrica, na própria localidade, através da tecnologia fotovoltaica, no meio rural e em áreas isoladas é uma importante alternativa, visto que além de ser uma solução vantajosa, é econômica quando relacionada com os custos de extensão da rede elétrica convencional, trifásica 13.8 kV, (US\$ 15.000 / km), além de não proporcionar impactos ambientais e considerar que o combustível (Radiação Solar) é grátis.

Para garantir a sustentabilidade dos projetos de implantação de sistemas fotovoltaicos em comunidades isoladas, para geração de energia elétrica e/ou para bombeamento de água, faz-se necessária uma participação efetiva do usuário na compreensão, capacitação e nas práticas de manutenções destas tecnologias.

O grande potencial energético solar brasileiro associado ao avanço tecnológico, com a conseqüente redução dos custos, indica, para um futuro próximo, boas perspectivas de ampliação da utilização de sistemas fotovoltaicos no país. Entretanto tais perspectivas, bem como os projetos já em desenvolvimento, dependem fundamentalmente de programas de incentivo dos governos, que possibilitem linhas de financiamento para populações carentes e que promovam uma forte disseminação desta tecnologia, permitindo assim uma melhor qualidade de vida para os que vivem no meio rural ou em assentamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica** - 3ª Edição 2011. Disponível em: «<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/download.htm>.» Acesso em: 15 abr. 2011.

ALVARENGA, C. A. **Energia Solar**, Lavras, MG, 2001. Disponível em: «http://www.solenerg.com.br/monografia_joseluiz». Acesso em: 26 ago. 2010.

AMBIENTEBRASIL-2011. Disponível em : «<http://www.ambientebrasil.com.br/energia>». Acesso em: 15 set. 2011.

AUSTRALIAN, CRC for Renewable Energy Ltd. Encyclopedia of Australian Science, 2004

BARIN, A. **Geração Distribuída com Fontes Alternativas**, Dissertação de Mestrado, -CT-UFSM, 2007.

BARLOW, R, McNELIS, B. **Solar pumping an introduction and update on the technology performance costs and economics**. World Bank, 1999.

BARLOW, R. **Status and experience of solar PV pumping in developing countries**. Lisboa, Portugal, 1999.

BATERIA DE LÍTIO, 2010. Disponível em: www.comprafacil.blog.br/vantagens-e-desvantagen-da-bateria-de-litio. Acesso em: 15 abr. 2010.

BENEDUCE, F, C, A. **Energia solar sem mistérios**. Fortaleza, CE, 1999. Rev. Banco do Nordeste 1999. 78 p.

BUNCE, J, M. (2007). **Cost implication for pv modules - crystalline**. **Renewable Energy Focus**, page 25.

CAMPANA, D. Tese de Doutorado da engenheira Dominique Campana. Ilha de Córsega – França. 1978. Citada por: NOGUEIRA, C. 2009.

CARDONA E LÓPEZ . IV Conferência Latino Americana de Energia Solar e XVII Simpósio Peruano de Energia Solar. Cusco. Peru. 2010.

CEPEL-CRESESB – 2000- Centro de pesquisas em energia elétrica. **Fontes alternativas de energia:** Disponível em: «<http://www.cepel.br/per/fontes.htm>.» Acesso em: 15 abr. 2010.

CIER – Congresso Internacional de Energia Renovável – Recife –Agosto de 2003. Disponível em: «<http://www.agg.ufba.br/cier-solar-fotovoltaico>». Acesso em: 15 abr. 2010.

COYNE, ELETRICIDAD PRACTICA APLICADA. **Motores de CA**, Tomo III- Union Tipografia Editorial Hispano Americana - México, 1985 a . pg. 106- 126.

COYNE, ELETRICIDAD PRACTICA APLICADA. **Acumuladores Eletroquímicos**. Tomo V- Union Tipografia Editorial Hispano Americana - México, 1985 b. pg. 183 – 225.

CRESESB. – **Potencial solar e eólico do Brasil. 2000.** Disponível em: «<http://www.cresesb.com.br> ». Acesso em: 15 abr. 2010.

CRUZ, J, A, S – **Comportamento da energia solar e eólica de pequeno porte, para eletrificação rural.** 2004. Disponível em: «<http://www.cjas.com.br/energia-alternativa-eolica-solar>». Acesso em: 12 abr. 2010.

DIEGUES, F. Luz no fim do túnel. **Revista Superinteressante**. n. 6, p. 16 e 17, São Paulo, 2005.

EBERLE. Fábrica de Motores Elétricos. Caxias do Sul. RS. 2010.

EDINGER, R., SANJAY, K. **Renowable Resources for Electric Power**. Quorum Books, 2009.

FEDRIZZI, M, C, e SAUER, I, L, Bombeamento Solar Fotovoltaico – Histórico, características e projeto. USP. 2003.

FILHO, C, F. Consumo de água no meio rural. Dados do Manual de energização rural mediante energia fotovoltaica- **Apostila do Curso de Energia Solar**. FUPAI, 1996.

FRAIDENRAICH, N. Energia Solar: fundamentos e tecnologia de conversão heliotermoelétrica e fotovoltaica. Recife. Universitária. UFPE, 2003. Disponível em: «<http://www.energiasolar.com.br/den/ufpe>.» Acesso em: 16 jul. 2010.

FRAIDENRAICH, N. VILELA, O. Photovoltaic pumping systems driven by tracking collectors. **Revista Solar Energy**. 74 (2003) p. 45-52.

GALDINO, M.A.E., LIMA, J.H.G. Aspectos Técnicos do Programa PRODEEM para Eletrificação Rural Baseada em Energia Solar Fotovoltaica. 4º Encontro Luso-Afro-Brasileiro de Planejamento e Exploração de Redes de Energia, **Anais**, Rio de Janeiro. 2003.

GALDINO, M.A.E. **Perguntas mais freqüentes sobre energia solar**. 2003. Disponível em: «<http://www.crecesb.com.br>». Acesso em: 16 jul. 2008.

GASTAL, M.A.E. Proposta metodológica de transformação de tecnologia para promover desenvolvimento. **Revista Atualidade**. Campinas. SP. 1997. T III.

GOETZBERGER, P. Células fotovoltaicas. 2003. **Revista Materials Science and Engineering** .R. 40 (2003) p. 1-46.

GOETZBERGER, P.- Previsão de Eficiência de Células Fotovoltaicas em Laboratório. 2002. **Revista Energy Material Sol Cells** – número 74 (2002) – p. 1-11.

GREEN, M, A. – **Photovoltaic technology overview**. Energy Policy, v.28, p. 989-998, 2005.

HAHN, A. Technical maturity and reliability of photovoltaic pumping systems. In: **13th European Photovoltaic Solar Energy Conference**, Nice, França. pp. 1783-1786. 1995.

HOPWOOD, D. **Refocus gets the inside track on the solar market in Germany and beyond** - Refocus, 2007 – Elsevier

IDER. Instituto de Desenvolvimento Sustentável de Energia Renovável. Disponível em: «<http://www.solarbrasil.br>». 2003. Acesso em:16 jul. 2010.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Estações Automáticas. 2011.

KAZAY, H, F, e LEGEY, F, L, (2003). “Fontes alternativas de energia: o que o Brasil tem feito?” Revista Brasil Sempre, ano 3- nº. 10, Abril/Maio/Junho de 2002.

KYOCERA. Especificação Técnica. Catálogo de painéis fotovoltaicos, 2010.

LORENZO, E. **Aproximación a una Metodología para Abordar Proyectos de Electrificación Rural Fotovoltaica.** Instituto de Energía Solar, Madri, 1999.

MACHADO, L. A. **Energia solar para aquecimento de água.** Dissertação de Mestrado, CT/UFSM. 2003.

MACHADO, T, L, S. **Variación de vazão com motor de indução pólo fendido.** Projeto de diplomação defendido no Curso de Graduação de Engenharia Elétrica. UFRGS. 2009.

MARTINS, D. C, BARBI, I.; **Introdução ao Estudo dos Conversores CC-CA,** INEP 2005.

MAYCOCK, P. D. **World Solar PV Market Countries Explosive Growth,** Refocus, v.6, n 5, p. 18-22. EUA. 2005.

MESSENGER, R. A., VENTRE, J. **Photovoltaic Systems Engineering,** 2 ed. CRC Press LC, 2004.

MOSCKOWICZ, M. **Sistemas híbridos; energia solar/eólica/diesel.** UFPB, Campina Grande, PB, 1996.

MOURA BEZERRA. 2008. Arnaldo-Moura-Bezerra. **Aplicações Práticas da Energia Solar.** Disponível em: «<http://www.estantevirtual.com.br>». Acesso em: 20 ago. 2010.

NREL . *National Renewable Energy Laboratory.*

NIPE – UNICAMP. SP. 2011. Núcleo Interdisciplinar de Planejamento energético. Evento: Seminário de Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede elétrica . 24/11/2011.

NOGUEIRA, C. **Utilização de Sistemas Solar e Eólico no bombeamento de água para uso de irrigação** Dissertação de Mestrado. CT/UFSM, 2009.

OVERTRAETEA. N e MERTENS. *Phisycs technology and use of photovoltaic.* **Modern Energy Studies.** Londres. 1996.

PRODEEM, **Energia das pequenas comunidades.** Programa de Desenvolvimento Energético Estadual e Municipal, Ministério de Minas e Energia, 2001.

PUCRS-2011. Disponível em: «<http://www.pucrs.br/boletim/anteriores.htm>». Acesso em: 15 set. 2011.

ROEDERN, B., ULLAL, H. S. The role of polycrystalline thin-film PV technologies in competitive PV module markets. **Photovoltaic Specialists Conference**, 2008. IEEE PVSC'08, pp. 1 - 4. 11-16. May, 2008.

ROSEMBACK, R.H. **Conversor CC-CC bidirecional buck-boost atuando como controlador de carga de baterias em um sistema fotovoltaico**. vol. Master. Juiz de Fora-MG: 2004.

SACHS, I. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. 2. ed. Rio de Janeiro: Garamond, 2007. 95 p.

SANTOS, E.C, **Módulos de irrigação de baixo custo**. EMEPA, PB, 2002. Doc. 36.

SCHEER H. **O imperativo energético**. Munique, 2010. Citado por EDINGER 2009.

SIEMER. T. Finance & Economics module price Index. **Revista Photovoltaic**, número 3- pg. 96. 2009.

SOARES, GEORGE A.; GALDINO, MARCO A.; LIMA, JORGE H.; DE MEDEIROS, MARCUS B.; **Otimização de Sistemas de Bombeamento Solar**; XVI SNPTEE – Simpósio Nacional de Produção e Transmissão de energia Elétrica; Campinas- SP; 21-26 de outubro de 2001.

SOUSA, S.H. / SUZERNY, S. **Análise do processo de evolução das comunidades onde foi implantado o bombeamento fotovoltaico**. 1994. Fortaleza – CE. Março 94. 180 pgs.

SRH SOHIDRA. **Relatório de Instalações de Painéis Fotovoltaico**, 2004. Disponível em: «<http://www.srh.ce.gov.br>». Acesso em: 15 ago. 2010.

SUNLAB. **Bombas a energia solar**. 2011. Disponível em: «http://www.sunlab.com.br/Bombeamento_direto.htm». Acesso em: 11 set. 2011.