

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA, ÊNFASE ELETROTÉCNICA.

LEANDRO DINIZ ZANIRATO
LEANDRO CÉSAR DE MOURA
THIAGO ROBERTO NUNES CORDEIRO

**TÉCNICAS DE BOMBEAMENTO DE FLUÍDOS APLICANDO
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2011

LEANDRO DINIZ ZANIRATO
LEANDRO CESAR DE MOURA
THIAGO ROBERTO NUNES CORDEIRO

**TÉCNICAS DE BOMBEAMENTO DE FLUÍDOS UTILIZANDO
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

Trabalho de Conclusão de Curso do
Curso de Engenharia Industrial Elétrica,
ênfase Eletrotécnica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.
Orientador: Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior

CURITIBA

2011

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Definições de sistemas fotovoltaicos.	16
Figura 2 - Configuração básica de um sistema fotovoltaico isolado.....	16
Figura 3 - Exemplo de um sistema isolado.	17
Figura 4 - Configuração básica de um sistema híbrido.	17
Figura 5 - Exemplo de um sistema híbrido.....	17
Figura 6 - Configuração básica de um sistema conectado à Rede.	18
Figura 7 -Exemplo de um sistema conectado a rede.	18
Figura 8 - Algumas tecnologias fotovoltaicas disponíveis.	20
Figura 9 - Divisão de bombas hidráulicas.	21
Figura 10 - Vista em corte de uma bomba centrífuga	22
Figura 11 - Bomba centrífuga modelo Solarjack SCS	23
Figura 12 - Esquema de uma bomba volumétrica com indicação de fluxo	24
Figura 13 - Bomba Modelo SolarJack SDS.....	24
Figura 14 - Diagrama de blocos de um conversor de frequência.....	28
Figura 15 - Aplicação em sistemas de bombeamento.....	29
Figura 16 - Baterias especiais para sistemas fotovoltaicos.....	30
Figura 17 - Sistema de bombeamento isolado sem baterias: acumula-se diretamente a água.	31
Figura 18 - Sistema isolado com carga CC sem armazenamento.	32
Figura 19 - Sistema isolado com carga CC sem armazenamento e seguidor do ponto de máxima potência.	32
Figura 20 - Sistema isolado com carga CC com armazenamento.	33
Figura 22 - Sistema isolado com carga CA com armazenamento.....	35
Figura 21 - Sistema isolado com carga CA sem armazenamento.....	34
Figura 23 - Exemplo de aplicação residencial, carga CA com armazenamento.	35
Figura 24 - Gráfico para a seleção de bombas.	39
Figura 25 - Curva da carga pela vazão.	41
Figura 26 - Curva de Potência x vazão bombeada	41
Figura 27 - Curva de Rendimento x vazão bombeada.	42
Figura 28 - Bomba Solarjack na bancada.	45
Figura 29 - Modelo da bomba.	45
Figura 30 - Bomba Solarjack SCS instalada em campo.....	45

Figura 31 - Módulo fotovoltaico: dados de placa.	46
Figura 32 - Módulo fotovoltaico sendo posicionado sobre o perfil de alumínio.	46
Figura 33 - Ajuste da inclinação do módulo.....	46
Figura 34 - Posicionamento do segundo módulo fotovoltaico.	46
Figura 35 - Módulos fotovoltaicos instalados	47
Figura 36 - Conexão em série dos módulos fotovoltaicos.	47
Figura 37 - Controlador, esquema das ligações.....	47
Figura 38 – Conexão das ligações do sistema fotovoltaico.....	48
Figura 39 - Posição do controlador, na estrutura de alumínio.	48
Figura 40 – Caixa de água para armazenamento.	48
Figura 41 - Montagem da bomba na caixa de água inferior.	49
Figura 42 - Caixa de água inferior em que a bomba foi instalada.	49
Figura 43 – Vista da edificação onde está instalado o sistema de bombeamento	50
Figura 44 – Hidrômetro instalado próximo a caixa de água superior	50
Figura 45 - Inversor e motor conectados sobre bancada de teste.	52
Figura 46- Tela inicial do software RADIASOL.....	53
Figura 47- Tela principal do RADIASOL a 0°.	54
Figura 48 - Tela principal do RADIASOL a 42°.	55
Figura 49 - Tela do software RADIASOL 2.....	56
Figura 50 - Gráfico da irradiância de um dia perfeito, Agosto de 2011.	58
Figura 51 - Volume de água acumulado durante um dia perfeito de Agosto de 2011.	59
Figura 52 - Gráfico de irradiância de um dia ruim de Agosto de 2011.	59
Figura 53 - Volume de água acumulado em um dia ruim de Agosto de 2011.....	60
Figura 54 - Gráfico de irradiância em um dia intermediário de Agosto de 2011.....	60
Figura 55 - Volume de água acumulado em um dia intermediário de Agosto.	61
Figura 56 - Gráfico de irradiância em um dia ruim de Setembro de 2011.....	61
Figura 57 - Volume de água acumulado em um dia ruim de Setembro de 2011.	62
Figura 58 - Gráfico de irradiância em um dia intermediário de Setembro de 2011. ..	62
Figura 59 - Volume acumulado em um dia intermediário de Setembro de 2011.....	63
Figura 60 - Gráfico de irradiância em um dia perfeito de Setembro.....	63
Figura 61 - Volume acumulado em um dia perfeito de Setembro.	64
Figura 62 - Tela do Software RADIASOL 2 para Curitiba.	66

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	38
Equação 2	38
Equação 3	38
Equação 4	38
Equação 5	39
Equação 6	43
Equação 7	43
Equação 8	43
Equação 9	57

LISTA DE SIGLAS

AMT	Altura Manométrica Total
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
IGBT	Transistor Bipolar de Gatilho Isolado (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)
HSP	Horas de Sol Pleno
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
LABSOLAR	Laboratório de energia solar
SC	Santa Catarina
SCS	<i>Solar powered Centrifugal Submersible</i>
PRODEEM	Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios.
MME	Ministério de Minas e Energia.
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica de Salvo Brito
MPP	seguidor de ponto de máxima potência.
m-Si	Silício monocristalino
p-Si	Silício policristalino
c-Si	Silício cristalino
a-Si	Silício amorfo hidrogenado
CdTe	Telureto de Cádmio.
Wp	Watt pico

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Irradiação em Florianópolis no plano horizontal.....	53
Tabela 2- Valores de irradiação em Florianópolis a 42°.....	55
Tabela 3 – Irradiação típica de um dia em Florianópolis no plano horizontal (0°).	65
Tabela 4 - Dados históricos de irradiação em Curitiba a 0°.....	66
Tabela 5 – Dados históricos de irradiação em Florianópolis a 0°.....	67
Tabela 6 - Irradiação estimada para o ângulo de aplicação de 40°, Curitiba.	67
Tabela 7 - Irradiação estimada para o ângulo de aplicação de 42°, Florianópolis. ...	67
Tabela 8 - Volumes diários estimados para Curitiba.....	68
Tabela 9 - Volumes diários estimados para Florianópolis.....	68
Tabela 10 - Acumulado mensal em Curitiba.....	68
Tabela 11 - Acumulado mensal em Florianópolis.....	69

RESUMO

A presente monografia aborda a avaliação de um sistema de bombeamento de fluídos com a aplicação de energia solar fotovoltaica. O sistema foi montado, pelos autores desta monografia, nas dependências da UFSC em Florianópolis. Compreende em uma configuração com equipamentos dedicados à tecnologia fotovoltaica composta por: módulos fotovoltaicos, controlador e bomba centrífuga com acionamento em corrente contínua. Foram realizadas medições da irradiância solar nessa região ao longo dos meses de Agosto e Setembro de 2011. As medições coletadas foram comparadas com os valores históricos de irradiação da região. Essa comparação demonstrou-se eficaz somente em um dos meses analisados, devido a uma frequência atípica de chuvas. No trabalho também foi analisada a irradiação de três dias de cada mês, sendo eles: dia com irradiação mínima (dia chuvoso), dia com irradiação intermediária (grande variação da irradiância no dia), dia com irradiação máxima (dia limpo, sem nuvens). O trabalho também apresenta equações para o dimensionamento de um sistema de bombeamento utilizando energia solar fotovoltaica. Para cada dia proposto foi estimado um volume bombeado para o dia. A referência utilizada foi um dia de irradiação máxima em que foi realizado um teste de performance no sistema de bombeamento e que obteve um bom volume de água bombeada. A comparação realizada com a equação proposta e o valor coletado no dia de referência mostrou-se verdadeira e satisfatória. Também foi verificado que a altura manométrica total é significativa no cálculo do volume final e tem grande influência no valor total e na eficiência do sistema.

Palavras-chave: Sistemas fotovoltaicos. Técnicas de bombeamento. Dimensionamento.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
1.1.	TEMA	11
1.1.1.	DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	11
1.2.	PROBLEMA E PREMISSAS	11
1.2.1.	O PROBLEMA EM QUESTÃO.....	12
1.3.	JUSTIFICATIVA	12
1.4.	OBJETIVOS	12
1.4.1.	OBJETIVO GERAL	12
1.4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.5.	MÉTODO DE PESQUISA	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1.	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	14
2.1.1.	HISTÓRICO E ESTADO DA ARTE.....	14
2.1.2.	DEFINIÇÕES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	15
2.1.3.	MODULO SOLAR FOTOVOLTAICO	18
2.1.3.1.	PRINCÍPIOS.....	18
2.1.3.2.	TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS DISPONÍVEIS.....	19
2.2.	SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE FLUÍDOS.....	20
2.2.1.	TIPOS DE BOMBAS HIDRÁULICAS	21
2.2.1.1.	BOMBAS CENTRÍGUFAS OU TURBO BOMBAS	21
2.2.1.2.	VOLUMÉTRICAS OU DE DESLOCAMENTO POSITIVO.....	23
2.2.2.	MÁQUINAS ELÉTRICAS, CC E CA.....	25
2.2.3.	ELEMENTOS DE POTÊNCIA.....	26
2.3.	ALTERNATIVAS DOS SISTEMAS	29
2.3.2.	CARGA CC SEM ARMAZENAMENTO.....	32
2.3.3.	CARGA CC COM ARMAZENAMENTO	33

2.3.4.	CARGA CA SEM ARMAZENAMENTO.....	34
2.3.5.	CARGA CA COM ARMAZENAMENTO	34
2.4.	PRINCIPAIS APLICAÇÕES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM BOMBEAMENTO DE FLUÍDOS.....	35
3.	PRINCÍPIOS DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA.....	37
3.1.	SISTEMA DE BOMBEAMENTO	37
3.1.1.	COMO SELECIONAR UMA BOMBA	37
3.1.2.	CURVAS DE DESEMPENHO DAS BOMBAS	40
3.2.	SISTEMA FOTOVOLTAICO	42
3.2.1.	DIMENSIONAMENTO PELO SOL PLENO (CONVENCIONAL).....	42
3.2.2.	DIMENSIONAMENTO DE BANCO DE BATERIAS	43
4.	ACOMPANHAMENTO E ENSAIOS DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO APLICANDO ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	44
4.1.	MONTAGEM DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO.....	44
4.1.1.	SISTEMA COM CARGA CC, SEM ARMAZENAMENTO (UFSC-LABSOLAR).....	44
4.1.2.	SISTEMA COM CARGA CA, SEM ARMAZENAMENTO (UFSC – ILHA DE RATONES).....	51
4.2.	ENSAIOS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	52
4.3.	ENSAIOS DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO (UFSC - LABSOLAR)	56
4.3.1.	MÊS DE AGOSTO DE 2011	57
4.3.2.	MÊS DE SETEMBRO DE 2011	61
4.4.	ANÁLISE DE IRRADIAÇÃO.....	64
4.5.	SIMULAÇÃO DE SISTEMAS (CURITIBA E FLORIANÓPOLIS).....	65
5.	CONCLUSÕES	70
6.	REFERÊNCIAS.....	72
	ANEXOS	77
	ANEXO A	77

ANEXO B78

ANEXO C79

ANEXO D80

ANEXO E81

ANEXO F.....82

1. INTRODUÇÃO

As fontes alternativas de energia têm sido cada vez mais estudadas e aperfeiçoadas ao longo das últimas décadas. Moreira (2008) afirma que o seu uso é muito incentivado pela necessidade de mudança da matriz energética mundial. E que essa mudança se deve ao estoque limitado de reservas de combustíveis não renováveis e as constantes exigências na redução da emissão de poluentes.

Uma das alternativas a ser analisada nesse trabalho é a conversão de energia solar em energia elétrica utilizando módulos fotovoltaicos, pois Ruther (2004) salienta que diariamente incide sobre a superfície da terra mais energia vinda do sol do que a demanda anual total de todos os habitantes do nosso planeta. A conversão de energia solar em energia elétrica utilizando o princípio do elemento fotovoltaico é uma das formas mais promissoras de energia alternativa.

O uso da energia fotovoltaica em sistemas isolados é interessante quando a instalação de uma rede elétrica convencional é relativamente muito cara. Podem-se citar exemplos como poços de petróleo, poços artesianos e comunidades rurais.

O bombeamento de fluídos, utilizando energia fotovoltaica, iniciou-se na década de 70, na África, Ásia e América do Sul. Esses sistemas utilizavam bombas para a movimentação de água potável de poços até o reservatório principal. No Brasil as primeiras experiências com sistema de bombeamento utilizando energia solar fotovoltaica datam do início da década de 80 (ANDRADE, 2008). Segundo Costa (2006) após a Conferência ambiental ECO92, o Brasil, principalmente o Nordeste foi alvo de vários projetos que incentivavam a utilização da energia fotovoltaica.

Existem diversas configurações que utilizam a energia fotovoltaica para o bombeamento de fluídos, principalmente a água. Costa (2006) considera que existe uma configuração otimizada para cada sistema de bombeamento.

1.1. TEMA

A temática estudada neste trabalho de conclusão de curso se refere à interação entre técnicas de bombeamento de fluídos e a utilização eficiente da energia solar fotovoltaica.

1.1.1. DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente trabalho é conduzido com base nos seguintes tópicos:

- Pesquisa aplicada à energia solar fotovoltaica;
- Integração de sistemas de bombeamento com energia solar fotovoltaica;
- Montagem e ensaio de sistemas de bombeamento no LABSOLAR na UFSC de Florianópolis;
- Simulação de sistemas fotovoltaicos em outras localidades.

1.2. PROBLEMA E PREMISSAS

O uso da energia fotovoltaica para bombeamento nas décadas de 80 e 90 foi promissor. Estudos previam um crescimento de até 150.000 sistemas até o ano de 2010 (BRITO 2006). Ocorreram vários problemas que inviabilizaram o sucesso desses sistemas. Pode-se compreender que grande parte dos problemas não ocorre com o equipamento estritamente solar como o gerador fotovoltaico, mas com outros elementos do sistema de abastecimento de água. Esses elementos que tem maior ocorrência de falha são os equipamentos mecânicos como o grupo de moto bombas, os equipamentos de potência como os conversores de energia e uma pequena parcela se deu aos módulos fotovoltaicos. Além desses problemas, existem ainda outros importantes, relacionados à forma de armazenamento da energia, utilizando banco de baterias.

1.2.1. O PROBLEMA EM QUESTÃO

A falta de conhecimento e de parâmetros de mapeamento das eficiências de sistemas solares fotovoltaicos pode gerar super dimensionamento nos sistemas de bombeamento.

1.3. JUSTIFICATIVA

“Evitar excessos é um fator de grande importância a ser considerado no dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos isto é, o uso dos equipamentos elétricos ou eletrônicos deve ser bem projetado, bem como, apresentar baixo consumo de energia” (LEVA 2004). Pelo maior custo de construção do sistema estar na aquisição dos módulos fotovoltaicos, esses devem ser projetados de forma eficiente. Assim, uma correta análise de eficiência e perdas de energia nos demais equipamentos se faz necessária. O mapeamento das eficiências em diferentes topologias também pode justificar o uso de uma ou outra para determinada situação.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GERAL

Caracterizar as diversas técnicas de bombeamento de fluídos aplicadas a sistemas de energia isolados que utilizam energia solar fotovoltaica, identificar algumas topologias e os fatores que influenciam na eficiência energética dessas. Realizar a montagem, medições e simulação de um sistema de bombeamento.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar o Gerador Fotovoltaico;
- Analisar em banco de dados os valores de irradiação solar em uma região de aplicação;

- Obter os níveis de irradiação no plano do módulo fotovoltaico na região aplicada;
- Estudar as formas de uso da energia fotovoltaica em sistemas isolados;
- Conhecer as principais técnicas de bombeamento de fluídos, utilizando sistemas fotovoltaicos;
- Identificar o uso de motores elétricos CC e CA para bombeamento de fluídos;
- Descrever as configurações de uso de motores elétricos em sistemas fotovoltaicos;
- Montar um sistema de bombeamento utilizando energia solar fotovoltaica.
- Comparar métodos de dimensionamento e valores históricos com dados coletados em campo.

1.5. MÉTODO DE PESQUISA

O método de pesquisa será de caráter teórico e experimental de umas das técnicas, visando reunir conhecimentos aplicáveis ao estudo, utilizando para tal: livros, revistas, artigos, internet, catálogos de fabricantes, dentre outros.

Agregado a isto será feito um estudo de análises da irradiação solar das áreas de aplicação. Também serão realizados estudos em um protótipo de sistemas de bombeamento e, por fim o levantamento e análise do desempenho energético do protótipo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

2.1.1. HISTÓRICO E ESTADO DA ARTE

A Energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico). O efeito fotovoltaico, relatado por Edmond Becquerel, em 1839, é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. A célula fotovoltaica é a unidade fundamental do processo de conversão. (CRESEB, 2004)

Inicialmente o desenvolvimento da tecnologia apoiou-se na busca, por empresas do setor de telecomunicações, de fontes de energia para sistemas instalados em localidades remotas. O segundo agente impulsionador foi a “corrida espacial” conforme CRESEB (2004), pois a célula continua sendo, o meio mais adequado (menor custo e peso) para fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos de permanência no espaço.

Chuco (2007), na linha do tempo a seguir mostra o avanço e as principais aplicações das células fotovoltaicas:

- Ano 1839 – O Francês Edmundo Becquerel descobriu o Efeito Fotovoltaico quando efetuava testes com pilha eletrolítica de dois eletrodos imersos em substâncias eletrolíticas;
- Ano 1873 – Willoughby Smith descobriu a fotocondutividade do Selênio. Esta propriedade faz variar a condutividade deste elemento em função da intensidade luminosa que recebe;
- Ano 1905 – Albert Einstein propôs a idéia do “Quantum de Luz” (os atuais fótons) e mostrou como é que poderia ser utilizado para explicar fenômenos como o efeito fotoelétrico. Em 1921, recebeu o premio Nobel pelo seu trabalho sobre o efeito fotoelétrico;
- Ano 1941 – Foi construído um dispositivo que pode ser denominado “Célula Solar”, o qual foi fabricado de Selênio e tinha uma eficiência de 1%;
- Ano 1955 – A Companhia Western Electric foi a primeira a comercializar as células solares com uma eficiência de 4,5%;

- Ano 1958 – foi lançado ao espaço o primeiro satélite Vanguard I, que utilizava células fotovoltaicas com apenas $0,1\text{W}/100\text{cm}^2$;
- Ano 1960 – Hoffman Electronics conseguia fabricar uma célula com 14% de eficiência;

A crise energética de 1973 renovou e ampliou o interesse em aplicações terrestres. Porém, para tornar economicamente viável essa forma de conversão de energia, seria necessário, naquele momento, reduzir em até 100 vezes o custo de produção das células solares em relação ao daquelas células usadas em explorações espaciais. Modificou-se, também, o perfil das empresas envolvidas no setor. Nos Estados Unidos, as empresas de petróleo resolveram diversificar seus investimentos, englobando a produção de energia a partir da radiação solar. (CRESESB, 2004)

A produção de células fotovoltaicas atingiu grandes marcas no decorrer dos anos, sendo o Silício quase absoluto no “ranking” dos materiais utilizados. O Silício, segundo elemento mais abundante no globo terrestre, tem sido explorado sob diversas formas: mono cristalino, poli cristalino e amorfo. Nos estudos apontados por CRESESB (2004), a busca de materiais alternativos é contínua e intensa e concentra-se na área de filmes finos, onde o silício amorfo é abundantemente aplicado. Segundo a referência citada, as células de filmes finos, além de utilizarem menor quantidade de material do que as que apresentam estruturas cristalinas requerem uma menor quantidade de energia no seu processo de fabricação.

2.1.2. DEFINIÇÕES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados, conforme CRESESB (2004), em três categorias principais visualizadas na Figura 1. O uso de cada um desses sistemas dependerá da aplicação e dos recursos energéticos existentes no local.



Figura 1 - Definições de sistemas fotovoltaicos.

Fonte: Modificado de Urbanetz (2010)

- Sistema isolado: é quando o sistema atende uma carga utilizando somente energia fotovoltaica. Nesse tipo de sistema, geralmente, necessita-se alguma forma de armazenamento, conforme Figura 2 e Figura 3. O armazenamento de energia pode ser na forma de baterias, para o acionamento dos equipamentos elétricos nos períodos que não há geração fotovoltaica. Há também sistemas relatados por CRESESB (2004) em que a energia é armazenada em tanques de água elevados, na forma de energia potencial gravitacional.

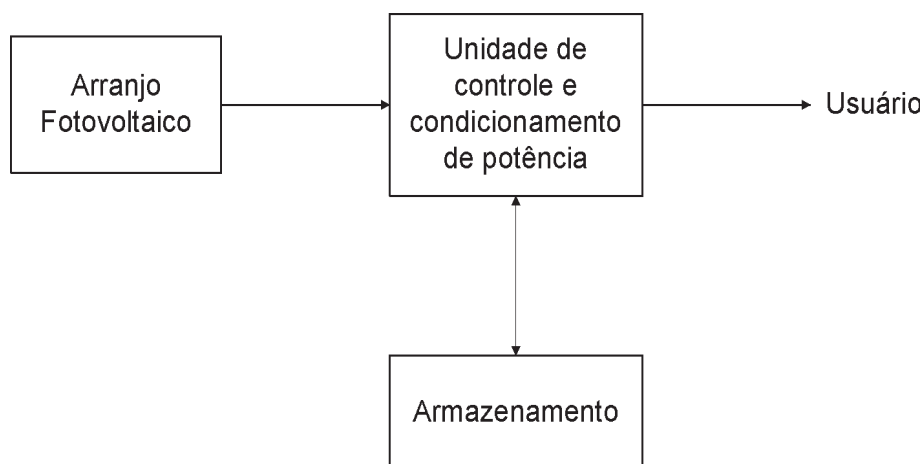


Figura 2 - Configuração básica de um sistema fotovoltaico isolado.

Fonte: CRESESB (2004)

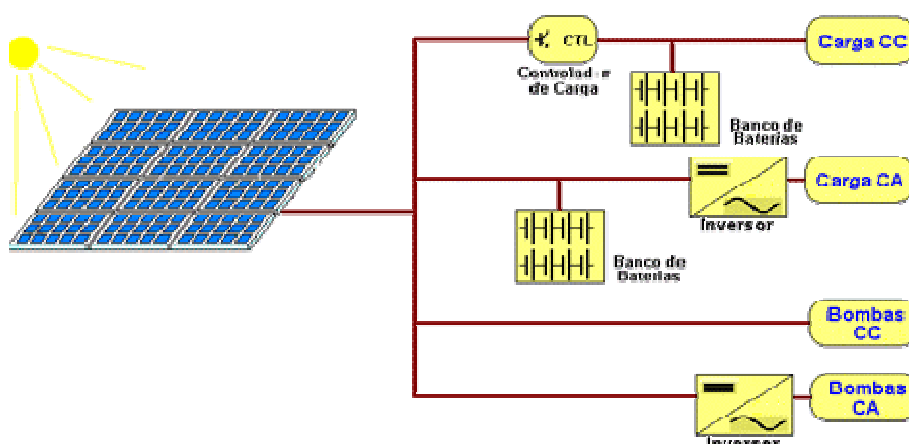


Figura 3 - Exemplo de um sistema isolado.

Fonte: CRESESB (2011)

- **Sistema híbrido:** é aquele, que quando desconectado da rede elétrica, faz uso de mais de uma forma de geração de energia, como energia eólica, diesel e energia fotovoltaica. Tais características levam CRESESB (2004) a apontar que esses sistemas são mais complexos e necessitam de algum tipo de controle capaz de integrar os vários geradores, de forma a otimizar a operação para o usuário. Na Figura 4 e Figura 5 observa-se um exemplo de um sistema híbrido.

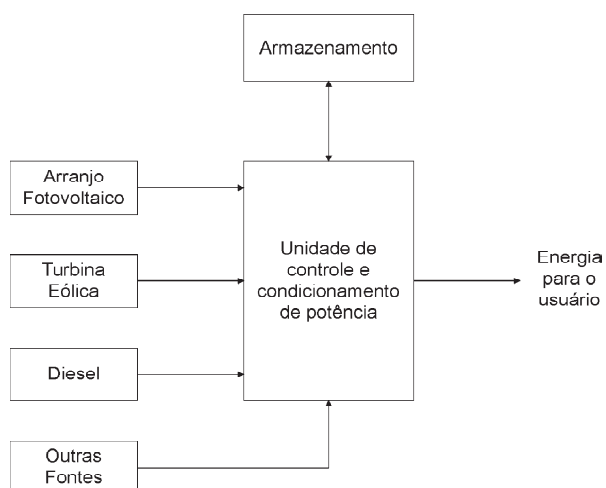


Figura 4 - Configuração básica de um sistema híbrido.

Fonte: CRESESB (2011)



Figura 5 - Exemplo de um sistema híbrido.

Fonte: CRESESB (2011)

- Sistema conectado à rede: esse tipo de sistema é aquele que a energia fotovoltaica se apresenta como uma fonte complementar a geração convencional, conforme Figura 6 e Figura 7. Esse sistema geralmente não utiliza armazenamento, já que toda a potência gerada é entregue a rede elétrica.

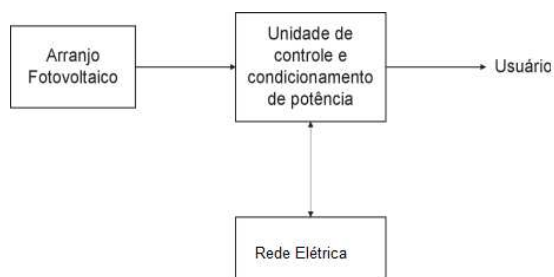


Figura 6 - Configuração básica de um sistema conectado à Rede.

Fonte: Modificado de CRESESB (2004)

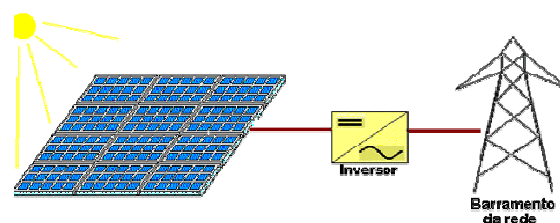


Figura 7 - Exemplo de um sistema conectado a rede.

Fonte: Modificado de CRESESB (2004)

2.1.3. MODULO SOLAR FOTOVOLTAICO

2.1.3.1. PRINCÍPIOS

A conversão de energia solar em elétrica se dá por meio de células fotovoltaicas, constituídas por semicondutores. Esses arranjos de semicondutores são sensíveis à luz, criando um potencial elétrico quando excitados. “Uma célula fornece pouca energia quando exposta a uma radiação solar de 1 kW/m^2 (cerca de 0,6 Volts e uma densidade de corrente de curto-circuito da ordem de 150 mA/cm^2)” (KRENZINGER et al, 2002).

Para se conseguir a tensão e corrente suficientes para alimentar um determinado sistema, se faz necessário o agrupamento dessas células em arranjos. Conforme Ruther (2004), a quantidade de células fotovoltaicas conectados em série determina a tensão do sistema, já a corrente é definida pela conexão em paralelo dessas células.

O desempenho dos módulos fotovoltaicos é influenciado, principalmente, pela intensidade luminosa na localização dos módulos e temperatura das células.

“Com o aumento da temperatura ou diminuição da intensidade luminosa, observa-se uma redução da eficiência das células” (CABRAL et. al.2004).

Os módulos fotovoltaicos estão disponíveis em diversos níveis de tensão. A principal característica fornecida é a potência nominal da célula fotovoltaica que é medida em Watt-pico (Wp). Segundo Moreira (2009), esta potência está disponível quando a célula é exposta a condições padrão de teste de irradiância solar de 1000 W/m², massa de ar de 1,5 e a uma temperatura de célula de 25 °C.

2.1.3.2. TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS DISPONÍVEIS

Existem diversos tipos de células fotovoltaicas, cada uma com sua particularidade de eficiência e de construção. Dentre as atualmente usadas em aplicações semelhantes ao objetivo deste trabalho podem ser citadas o Silício Cristalino (c-Si); o silício Amorfo Hidrogenado (a-Si) e Telureto de Cádmio (CdTe) (RUTHER, 2004).

A tecnologia de c-Si é a mais tradicional e a única entre as citadas que utiliza lâminas cristalinas espessas, o que representa nos estudos de Ruther (2004) uma maior limitação na redução dos custos de produção, mas essa se mostra ser bastante robusta e confiável. A célula de Silício Cristalino possui duas formas, a monocristalino (m-Si) e a policristalino (p-Si) cuja diferença é o método de fabricação. Na primeira forma usa-se um monocristal que é crescido a partir de um banho de silício de alta pureza. Esse crescimento é bastante lento e utiliza altas temperaturas e atmosfera controlada, tornando o processo mais caro. Já o segundo processo de fabricação funde-se vários grãos e cristais de silício em uma única etapa, o que resulta em um bloco com as imperfeições dos contornos desses grãos e cristais, levando assim a uma menor eficiência segundo Ruther, 2004. A obra desse mesmo autor diz que a utilização do a-Si no início dos anos 80 era vista como única tecnologia fotovoltaica em filmes finos. Por esse motivo foi bastante usado em calculadoras, relógios e outros aparelhos em que o consumo elétrico é baixo. Pela facilidade de manuseio e aparência estética, a tecnologia do a-Si é comumente encontrada em aplicações arquitetônicas. O seu custo de produção também é baixo já que o processo de fabricação não exige altas temperaturas. Ruther (2004) também aponta como uma principal vantagem da tecnologia é a não redução da

eficiência com o aumento da temperatura de operação. O CdTe vem competindo com a utilização do c-Si e a-Si nas aplicações modernas, e também é encontrado em filmes finos. O seu “custo de produção em larga escala é extremamente baixo e sua eficiência é maior comparada aos módulos de a-Si” (RUTHER, 2004). O grande inconveniente de sua utilização é a alta toxicidade dos elementos e a baixa abundância dos mesmos. Na Figura 8 é possível visualizar os três tipos de cristais de silício.

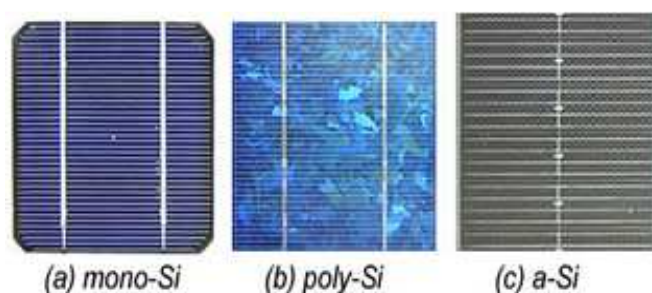


Figura 8 - Algumas tecnologias fotovoltaicas disponíveis.

Fonte: CRESESB (2011)

2.2. SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE FLUÍDOS

Na perspectiva de Macintyre (1997), bombas são máquinas geratrizes cuja finalidade é realizar o deslocamento de um líquido por escoamento. Sendo uma máquina geratriz, ela transforma o trabalho mecânico que recebe para seu funcionamento em energia, que é comunicada ao líquido sob as formas de energia de pressão e cinética. O trabalho mecânico, geralmente fornecido por uma máquina motriz (motor de indução ou motor CC, no caso do bombeamento fotovoltaico).

Fedrizzi (2003) afirma que o bombeamento de água remonta aos primórdios da história da humanidade, com a utilização de métodos manuais ou tração animal. Entretanto, as bombas manuais encontram seu campo de aplicação nas pequenas capacidades características dos poços e a pequenas alturas de bombeamento.

2.2.1. TIPOS DE BOMBAS HIDRÁULICAS

Em Macintyre (1997), o modo pelo qual é feita a transformação do trabalho e o recurso para cedê-la ao líquido aumentando sua pressão e/ou sua velocidade permitem classificar as bombas em deslocamento positivo, centrífugas e bombas especiais, sendo as duas primeiras as mais aplicadas em sistemas fotovoltaicos, e as únicas a serem abordadas neste trabalho. Na Figura 9 encontram-se os principais tipos de bombas.

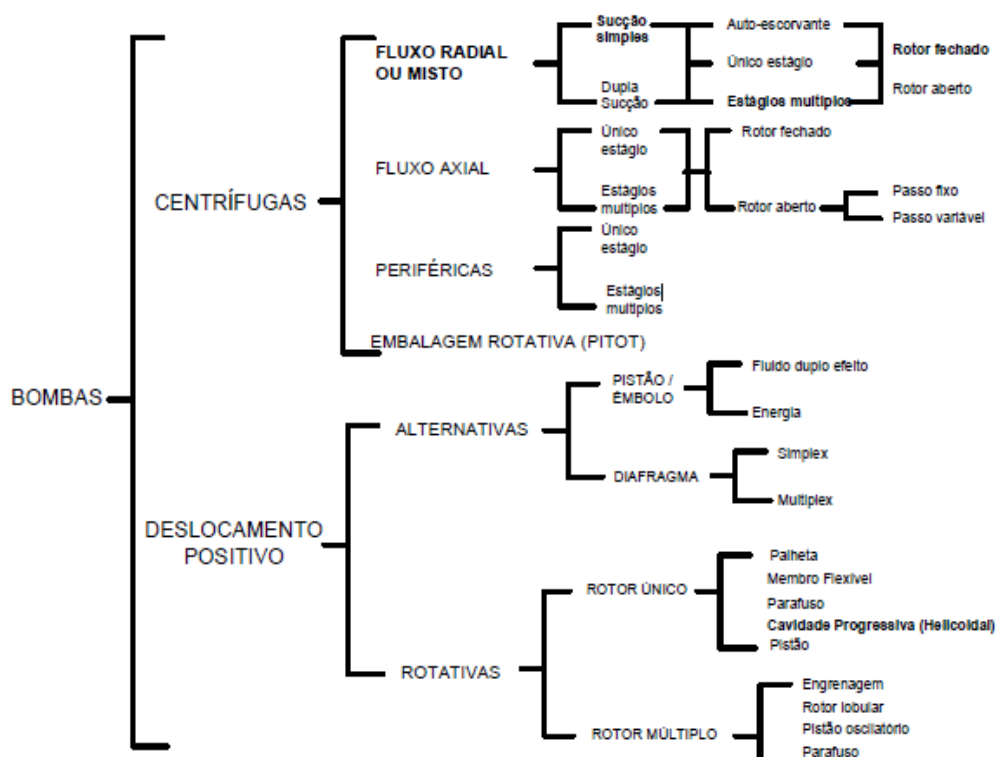


Figura 9 - Divisão de bombas hidráulicas.

Fonte: Adaptado de MELENDEZ (2009)

2.2.1.1. BOMBAS CENTRÍGUFAS OU TURBO BOMBAS

A Figura 9 divide as bombas em centrífugas e deslocamento positivo, em que as bombas centrífugas representam as turbo bombas. Segundo Macintyre (1997), as turbo bombas “são caracterizadas por possuírem um componente giratório dotado de pás, chamado rotor, que exerce sobre o líquido forças que

resultam da aceleração que lhe imprime. Essa aceleração, ao contrário do que se verifica nas bombas de deslocamento positivo, não possui a mesma direção e o mesmo sentido do movimento do líquido em contato com as pás”. Já Fedrizzi (2003) explica o fenômeno por meio do princípio de Bernoulli, que cria uma zona de maior pressão na periferia e, como consequência, ocorre uma zona de baixa pressão na região central (entrada), produzindo o deslocamento do líquido em direção à saída dos canais do rotor. Macintyre (1997, p.45 a 47) classifica as turbo bombas, segundo a trajetória do líquido no rotor, em: de fluxo misto, axial ou periférica. No trabalho de Fedrizzi (2003) as bombas centrífugas são indicadas para grandes vazões e pequenas alturas manométricas. Em Medeiros (2011) explica-se que a carcaça é a parte da bomba onde, no seu interior, a energia de velocidade é transformada em energia de pressão, o que possibilita o líquido alcançar o ponto final do recalque. É no seu interior que está instalado o conjunto girante (eixo-rotor) que torna possível o impulsionamento do líquido. Na Figura 10 apresenta-se uma bomba centrífuga em formato caracol.

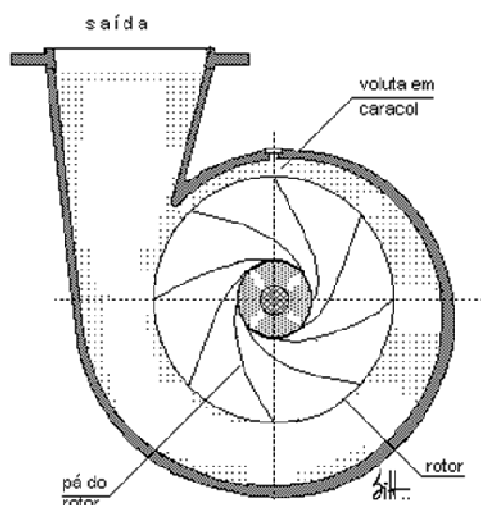


Figura 10 - Vista em corte de uma bomba centrífuga

Fonte: Medeiros (2011)

Em sistemas fotovoltaicos de bombeamento, Fedrizzi (2003) infere que as bombas centrífugas são amplamente utilizadas visto que estas requerem potência de partida do motor próximo do funcionamento normal da bomba. Desta forma as bombas centrífugas não exigem uma potência instalada muito acima do necessário para o funcionamento normal. Um exemplo de bombas centrífuga para aplicações

solares é a SolarJack SCS, mostrada na Figura 11. Está descrito em SUNPUMPS 1 (2011) que essas são bombas submersíveis que operam em tensões de 40 a 180 Vcc em potência de 140 a 2000 w. Podem ser instaladas abaixo do nível da água, seja em lagos, cisternas ou rio.



Figura 11 - Bomba centrífuga modelo Solarjack SCS

Fonte: SUNPUMPS 1(2011)

2.2.1.2. VOLUMÉTRICAS OU DE DESLOCAMENTO POSITIVO

O trabalho de Macintyre (1997) entende que a característica principal desta classe de bombas é que uma partícula líquida em contato com o órgão que comunica a energia tem aproximadamente a mesma trajetória que a do ponto do órgão com o qual está em contato. O termo volumétrica deve-se ao fato de que o fluido ocupa e desocupa totalmente o espaço interior da bomba, como se pode visualizar na Figura 12. São classificadas em Rotativas e Alternativas ou Embolo,

conforme ilustrado na Figura 9, sendo que as mais utilizadas em sistemas de bombeamento são as de Diafragma, Pistão e ainda as Helicoidais.

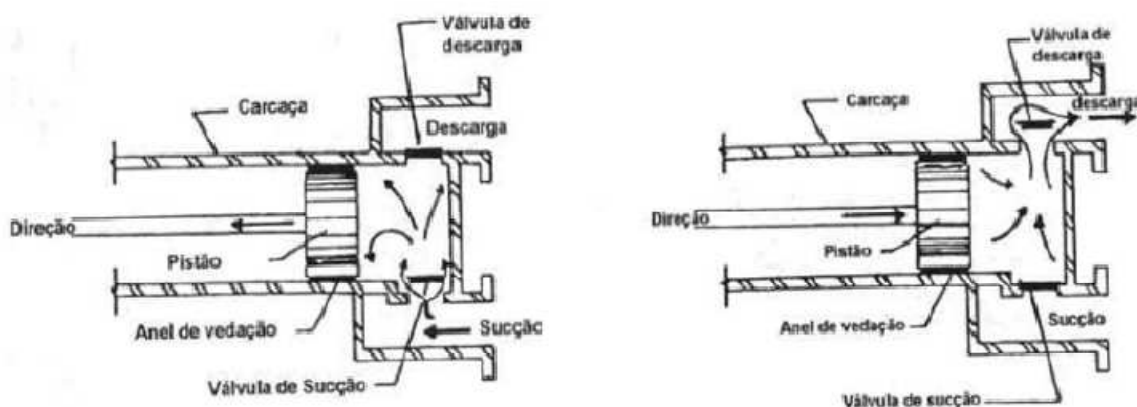


Figura 12 - Esquema de uma bomba volumétrica com indicação de fluxo

Fonte: Moreira (2009)

Meléndez (2009) afirma que “as bombas de deslocamento positivo (por exemplo, as bombas de diafragma, êmbolo e/ou helicoidal) são comercialmente menos acessíveis que as centrífugas e geralmente são sensíveis ao lodo ou areia presentes na água.” Um exemplo de bombas de deslocamento positivo com diafragma é a SolarJack SDS é mostrada na Figura 13. Caracterizado por SUNPUMPS 2 (2001) a SolarJack SDS é uma bomba submersível de deslocamento positivo, que opera de 12 a 30 Vcc com potência requerida de 35 w.



Figura 13 - Bomba Modelo SolarJack SDS

Fonte: SUNPUMPS 2 (2011)

2.2.2. MÁQUINAS ELÉTRICAS, CC E CA.

Para as aplicações que requeram bombeamento de fluídos, podem ser usados tanto os motores CC (Corrente Contínua), como os Motores CA (Corrente Alternada):

- Motores CC: As características desse equipamento são amplamente conhecidas e descritas por vários autores, entre eles pode-se citar o seguinte trecho:

“As máquinas CC caracterizam-se por sua versatilidade. Por meio das diversas combinações de enrolamentos de campo, excitados em derivações, série ou independente, elas podem ser projetadas de modo a apresentar uma ampla variedade de característica de tensão *versus* corrente ou de velocidade *versus* conjugado, para operações dinâmicas e em regime permanente. Devido à facilidade com que podem ser controlados, sistemas de máquinas CC tem sido usados frequentemente em aplicações que exigem uma ampla faixa de velocidades ou de controle preciso da saída do motor. Em anos recentes, a tecnologia de estado sólido que é usada nos sistemas de acionamento CA desenvolveu-se o suficiente para que esses sistemas estejam substituindo as máquinas CC. Entretanto, a versatilidade da máquina CC, em combinação com a relativa simplicidade dos seus sistemas de acionamento, irá assegurar o seu uso continuado em uma ampla variedade de aplicações”. (FITZGERALD, 2006, p185-187)

Os motores de corrente contínua em termos de manutenção e peças, são bastante complexos. Eles exigem conhecimento, habilidade e um programa de manutenção eficiente. Sua aplicação em sistemas de controle de velocidade em que o torque é um item importantíssimo, em alguns casos, ainda não encontrou substituto tão eficiente. Conforme Carvalho (2007), a eficiência tem um preço: os sistemas eletrônicos de controle de velocidade e o próprio motor CC devem ter um plano de manutenção específico, pois o desgaste e a saturação de componentes eletrônicos, elétricos e mecânicos é evidente e proporcional à utilização dos sistemas.

- Motores CA: Seguindo os princípios encontrados em Fitzgerald (2006), as máquinas CA classificam-se em duas categorias: *síncronas e de indução*. Nas máquinas síncronas, as correntes do enrolamento do rotor são fornecidas através de contatos rotativos fixados diretamente na parte estacionária do motor. Nas máquinas de indução, as correntes são induzidas nos enrolamentos do rotor por meio da combinação da variação, no tempo, de

correntes no estator e do movimento do rotor em relação ao estator. Os motores CA são bastante utilizados na indústria por possuírem as vantagens de serem baratos, e terem uma manutenção menos custosa em comparação aos motores CC. Os motores com rotor tipo “gaiola” são os mais usados nas aplicações industriais. Para tanto, as desvantagens apontadas por CRESESB (2004), são que um sistema de bombeamento a partir de uma fonte CC adiciona complexidade ao sistema, pois exigem a inclusão de um inversor para transformar a corrente contínua, gerada pelo arranjo fotovoltaico, em corrente alternada.

- Máquinas síncronas: Uma descrição preliminar do desempenho de uma máquina síncrona pode ser obtida discutindo a tensão induzida na armadura do gerador síncrono CA de pólos salientes. O enrolamento de campo dessa máquina produz apenas um par de pólos magnéticos (como os de uma barra imantada), e por essa razão essa máquina é referida como máquina de dois pólos.
- Máquinas de indução: Um segundo tipo de máquina CA é a máquina de indução. Fitzgerald (2006) explica que como na máquina síncrona, o enrolamento do estator de uma máquina de indução é excitado com correntes alternadas. Contrastando com uma máquina síncrona, onde o enrolamento de campo do rotor é excitado com corrente CC, correntes alternadas fluem nos enrolamentos do rotor de uma máquina de indução. Nas máquinas de indução, as correntes alternadas são aplicadas diretamente aos enrolamentos do estator e, então, correntes no rotor são produzidas por indução, isto é, por ação do transformador.

2.2.3. ELEMENTOS DE POTÊNCIA

Para o acionamento dos motores utilizando módulos fotovoltaicos, geralmente é necessária a instalação de um equipamento condicionador de potência. Esse equipamento adequa a energia disponibilizada pelos módulos em uma forma útil para o acionamento dos motores. Geralmente esses equipamentos são os Conversores CC/CC e CC/CA.

2.2.3.1. CONVERSORES CC/CC

Esse modelo se faz necessário quando a fonte de energia é em corrente contínua e a carga exige uma corrente contínua em um valor de tensão diferente. O uso deste tipo de conversor é favorável, já que este pequeno dispositivo eletrônico absorve a potência do arranjo fotovoltaico a uma tensão fixa, e se comporta como um gerador de corrente, de maneira que aciona o motor elétrico acoplado à bomba.

Basicamente existem os conversores que aumentam a tensão de saída (tipo *Boost*) e os conversores que diminuem a tensão saída (tipo *Buck*), em relação ao valor da alimentação na entrada. Em geral, conforme CRESESB (2004) estes conversores utilizam o armazenamento de energia em indutores ou transformadores para obter o valor de tensão desejado na saída. Usando elementos semicondutores, a transferência de energia é realizada pelo controle do período de chaveamento.

No lado da entrada, a tensão pode ser escolhida perto do ponto de máxima potência e aproveitar a máxima irradiância disponível. Grande parte dos dispositivos comerciais (CC/CC) pode ter uma tensão de entrada ajustada por *hardware*. O desempenho do dispositivo está relacionado somente ao arranjo fotovoltaico e às condições meteorológicas do lugar, não dependendo da configuração da moto bomba. No lado de saída, a potência é transmitida ao motor em um ponto ótimo de corrente e tensão, que corresponde à potência disponível.

Atualmente, a eficiência desses conversores, apontado por Mermoud (2004) é da ordem de 95%. Contudo, a eficiência dos mesmos, segundo Melendez (2009) pode cair quando o fornecimento de potência é baixo (baixa irradiância).

2.2.3.2. CONVERSORES CC/CA

Os estudos de Alonso (2003) e Brito (2006) apontam que em alguns países, são utilizadas configurações alternativas, baseadas no uso de conversores de frequência acoplados a bombas centrífugas submersíveis, ambos de uso comercial. Isso permite escolher qualquer moto bomba não dedicada ao uso solar, pois o mercado desses equipamentos é maior do que o mercado solar, resultando em uma redução de custos e ampliação da faixa de potência para sistemas fotovoltaicos de bombeamento.

Nos trabalhos de Gurgel (2006) e Matheus (2007) há referências que desde meados da década de 1960, o conversor de frequência tem passado por várias e rápidas mudanças, principalmente pelo desenvolvimento da tecnologia de microprocessadores e semicondutores e pela redução de seus custos. Entretanto, os princípios básicos dos conversores de frequência continuam os mesmos. A Figura 14 mostra um diagrama de blocos de um conversor de frequência da WEG.

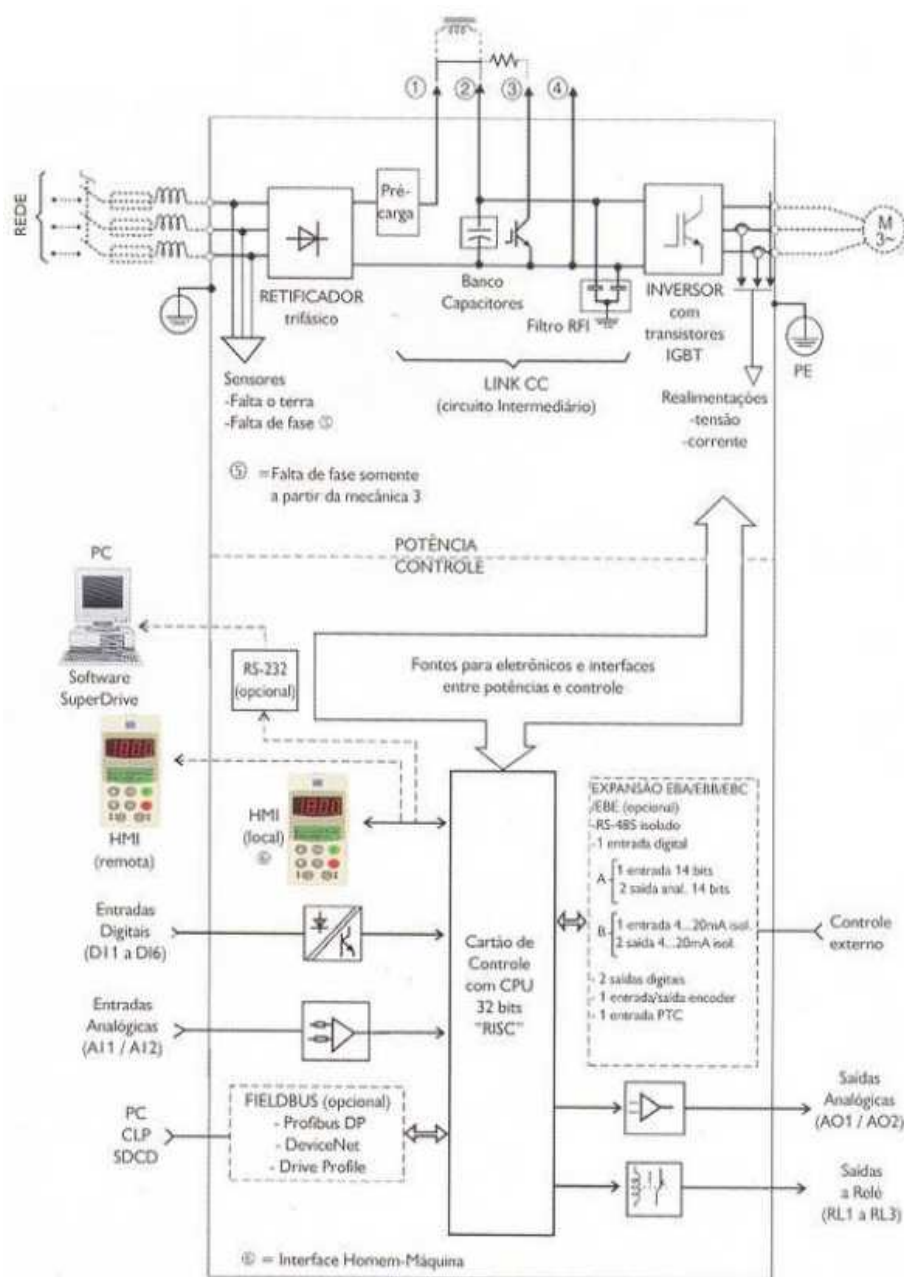


Figura 14 - Diagrama de blocos de um conversor de frequência.

Fonte: WEG (2005)

O conversor de frequência é um equipamento elétrico capaz de produzir variação dos valores da frequência elétrica que alimenta o motor, produzindo uma variação de sua rotação.

Segundo Alonso (2003), os conversores de frequência geralmente atingem eficiências na faixa de 94% a 96%, pois o comportamento da curva eficiência *versus* potência é quase uma linha horizontal. Outros autores como Klumper et. al (2002) afirmam que graças às reduzidas perdas dos transistores bipolares de gatilho isolado (IGBT), a eficiência do conversor de frequência pode ser ainda maior.

2.3. ALTERNATIVAS DOS SISTEMAS

Nos sistemas de bombeamento fotovoltaicos isolados encontram-se quatro principais formas de aplicação, variando-se pelo acionamento em CC ou CA, e se existirá alguma forma de armazenamento ou não.

A Figura 15 mostra as principais formas de aplicação dos sistemas de bombeamento, sendo que as topologias mais utilizadas nos sistemas de bombeamento estão reforçadas em linha azul.

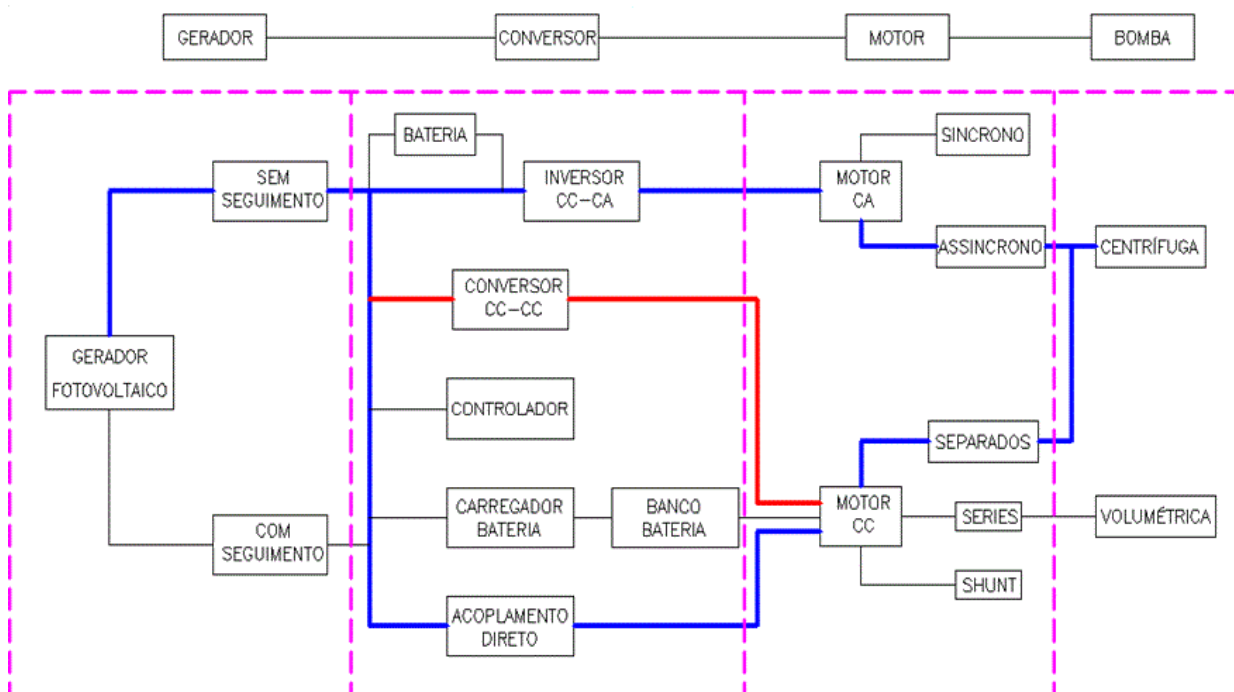


Figura 15 - Aplicação em sistemas de bombeamento.

Fonte: COMISSIÓN EUROPEA DG XII (1996)

2.3.1. ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Fedrizzi (2003, p.20) afirma que quando há maior índice de irradiação pode-se realizar armazenamento desta energia em baterias eletrolíticas, possibilitando o uso posterior desta energia armazenada. Este aproveitamento de energia captada é amplamente utilizado em sistemas domiciliares de geração autônoma.

As baterias proporcionam grandes vantagens no armazenamento da energia solar, porém apresentam algumas desvantagens econômicas, quando se compara com o sistema com carga ligada diretamente ao painel fotovoltaico. Fedrizzi (2003, p.32 e 33) diz que o armazenamento em si é realizado em baterias, porém existe a necessidade de utilizar um controlador de carga, para evitar uma sobrecarga ou sobre descarga da bateria, sendo que a não utilização deste pode gerar danos irreversíveis à bateria. Da mesma forma os diodos de bloqueio devem ser instalados para impedir que a bateria se descarregue sobre o painel fotovoltaico quando da ausência de luz solar. A Figura 16 demonstra uma bateria usada exclusivamente para aplicações fotovoltaicas.



Figura 16 - Baterias especiais para sistemas fotovoltaicos.

Fonte: Deka (2011)

As vantagens dos acumuladores de energia elétrica (baterias) convergem para a qualidade da energia enviada para a carga. Segundo Fedrizzi (2003), as baterias proporcionam uma potência instantânea superior a que o painel fotovoltaico

pode gerar, mesmo em momentos mais favoráveis, o que é importante na partida dos motores. Mantém o nível de tensão estável, uma vez que a tensão saída dos painéis varia com a intensidade da radiação incidente.

Em Fedrizzi (2003), a autora diz que o conversor CC-CC pode substituir a bateria nos sistemas de bombeamento. Sua função nesse caso é adaptar o funcionamento do motor ao do gerador fotovoltaico.

Outra opção amplamente utilizada para armazenar a energia gerada pelo painel fotovoltaico são os tanques de armazenamento de água, conforme representado na Figura 17. De acordo com Meléndez (2009), o armazenamento da água em tanques é mais econômico que armazenar energia elétrica em baterias devido à baixa vida útil das baterias. Mas, este custo se justifica quando é necessário realizar o bombeamento da água durante a noite ou quando o rendimento do poço é insuficiente para suprir as necessidades diárias de água.

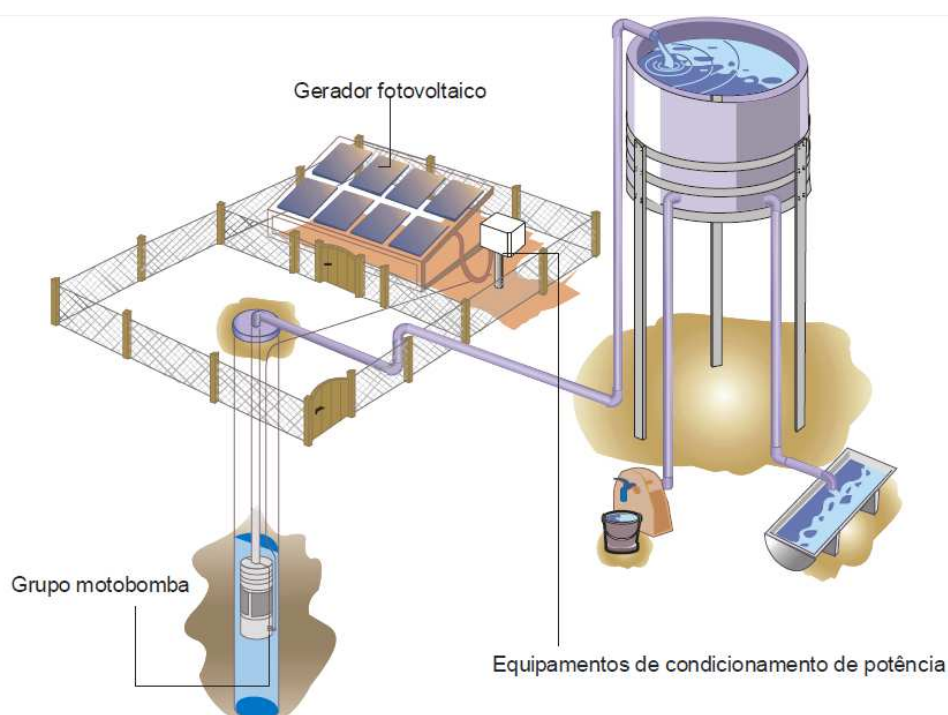


Figura 17 - Sistema de bombeamento isolado sem baterias: acumula-se diretamente a água.

Fonte: Fedrizzi (2004)

2.3.2. CARGA CC SEM ARMAZENAMENTO

Nesta topologia, a energia gerada no painel fotovoltaico é transportada diretamente para as cargas que operam em corrente contínua, motores CC no caso dos sistemas de bombeamento. A Figura 18 representa a topologia mais simples de um sistema fotovoltaico.

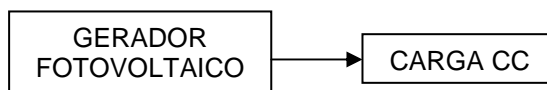


Figura 18 - Sistema isolado com carga CC sem armazenamento.

Em alguns casos, o sistema pode incorporar um conversor CC-CC. O uso dos conversores CC-CC é favorável, pois fornece uma tensão fixa ao motor, assemelhando-se a um gerador de corrente, o que é de importância muito grande visto que o gerador fotovoltaico fornece uma tensão variável devido à variação de irradiação solar. O desempenho do dispositivo relatado tanto por Melendez (2009) e CRESESB (2004) está relacionado somente ao arranjo fotovoltaico e às condições meteorológicas, não se relacionando com a configuração do sistema moto bomba. Existe ainda o conversor CC-CC com seguidor do ponto de máxima potência (MPP), que se diferencia do conversor anteriormente citado pela existência de um circuito eletrônico que ajusta a tensão de entrada no ponto máximo do “joelho” da curva I/V do gerador fotovoltaico. Este dispositivo permite uma variada gama de níveis de irradiância, de altura manométrica e de demanda de água, como também podem eliminar o problema da potência necessária para a partida dos motores. A Figura 19 mostra seu diagrama de blocos.

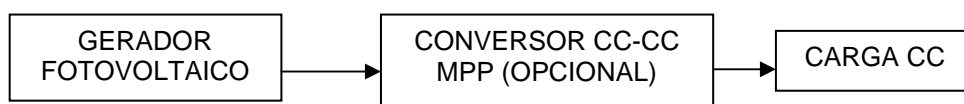


Figura 19 - Sistema isolado com carga CC sem armazenamento e seguidor do ponto de máxima potência.

Meléndez (2009) afirma que em sistemas de baixa potência (até 400Wp) é comum a utilização de um motor CC acionando uma bomba de deslocamento positivo com diafragma, com o uso de um conversor CC-CC para otimizar o acoplamento. Exemplos deste tipo são o SolarJack SDS ou Shurflo 9300. Já para sistemas de média potência (400Wp a 1500 Wp), pode-se utilizar um motor CC sem escovas (maior rendimento nesta faixa de potência) operando com bomba de deslocamento positivo helicoidal.

2.3.3. CARGA CC COM ARMAZENAMENTO

Em cargas CC com armazenamento é necessário um controlador de carga entre o gerador fotovoltaico, bateria e a carga. O controlador de carga aumenta a vida útil da bateria, monitorando o seu estado atual e impede que essa se descarregue totalmente ou que sua tensão aumente pelo carregamento excessivo. A bateria é o principal inconveniente dessa aplicação por ser um item de manutenção custosa e que necessita de descarte apropriado. Existem sistemas de armazenamento exclusivos para aplicações solares, mas o uso de baterias estacionárias, como por exemplo, as utilizadas em sistemas de *no-break*, se tornou comum. Essa topologia tem a principal vantagem de fornecer uma energia constante necessária para a carga, mesmo com a diminuição ou falta de incidência solar. A Figura 20 ilustra por meio das setas o sentido da energia

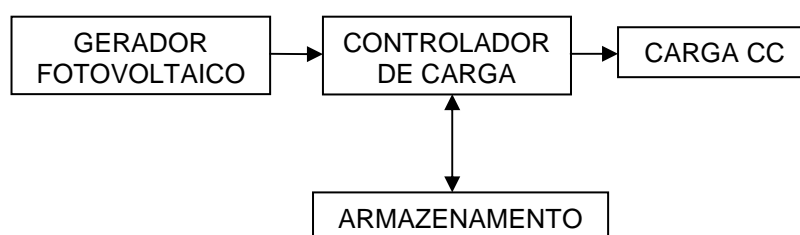


Figura 20 - Sistema isolado com carga CC com armazenamento.

2.3.4. CARGA CA SEM ARMAZENAMENTO

Em casos em que a carga é CA, sendo os motores de indução a carga mais abundante utilizada em sistemas de bombeamento, se faz necessário o uso de um inversor. Dependendo do tipo de motor CA utilizado, o inversor deverá ser monofásico ou trifásico. No caso de inversores trifásicos, algumas aplicações de bombeamento já utilizam os inversores de frequência comercialmente disponíveis, sendo que os mesmos são alimentados diretamente em CC (Brito et al, 2006.) Estes equipamentos proporcionam o controle da frequência, desta forma é possível controlar também a velocidade de rotação do motor.

Os motores de corrente alternada, conforme Melendez (2006), são mais utilizados que os de corrente contínua, por serem mais robustos, terem preços mais acessíveis e apresentarem maior vida útil. Porém possuem desvantagens referentes ao menor rendimento devido às perdas no inversor de frequência. A Figura 21 mostra o diagrama simplificado dessas topologia



Figura 21 - Sistema isolado com carga CA sem armazenamento.

2.3.5. CARGA CA COM ARMAZENAMENTO

Para casos em que exige-se um fornecimento de energia constante, utiliza-se juntamente com o inversor um grupo de baterias. Nesse caso, quando a incidência solar é insuficiente, o grupo de baterias fornece a energia para o sistema. Esse fornecimento tem um tempo limitado pela capacidade do grupo de baterias. Esse tempo deve ser suficiente para que o sistema não pare de funcionar até a fonte principal ser estabelecida. Com o estabelecimento da incidência solar, o controlador de carga passa a transferir novamente energia para a bateria. Um caso típico apresentado por CRESESB (2004) de aplicação destes sistemas é no atendimento de residências isoladas que façam uso de eletrodomésticos convencionais. A Figura

22 mostra um sistema com carga CA com armazenamento. A Figura 23 mostra uma aplicação residencial desse sistema.

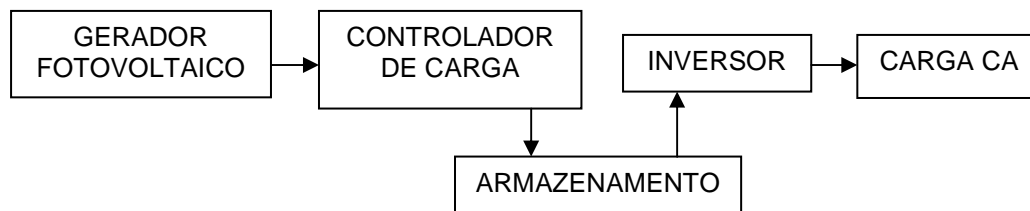


Figura 22 - Sistema isolado com carga CA com armazenamento.



Figura 23 - Exemplo de aplicação residencial, carga CA com armazenamento.

Fonte: (Zilles, 2010)

2.4. PRINCIPAIS APLICAÇÕES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM BOMBEAMENTO DE FLUÍDOS

Um dos fluídos essenciais para a formação de vida na terra e a sustentação da mesma é sem dúvida a água. O ser humano e animais tanto precisam consumir essa na sua forma pura, como utilizam água também para a produção de alimentos. Por esse motivo, segundo Costa (2006), sua utilização deve ser otimizada. Diversas vezes a água é encontrada em quantidade limitada e nem sempre está disponível no solo, sendo necessária a sua retirada de poços, cisternas e outras fontes

subterrâneas.

Um dos elementos que viabiliza o fornecimento de água é a energia elétrica, porém a rede de distribuição convencional não fornece energia para muitos locais remotos.

A primeira aplicação comercial de energia solar fotovoltaica para bombeamento de fluídos foi, conforme Fedrizzi (2003) em 1978. Nessa data na Ilha Córsega, a Engenheira Dominique Campana desenvolveu e instalou um sistema de abastecimento de água para uma fazenda de ovelhas. Nessa aplicação pioneira, utilizaram-se módulos fotovoltaicos da Empresa Philips e uma bomba de corrente contínua desenvolvida em conjunto com a empresa Guinard. Já em 2001 e 2002, Nogueira (2009) relata mais dois grandes projetos utilizando bombeamento fotovoltaico. Um deles realizado nas Filipinas, em que seriam instalados inicialmente 122 sistemas em comunidades rurais do Programa de Reforma Agrária Local. Já o segundo projeto beneficiaria alguns países do Norte da África, como Marrocos, Argélia e Tunísia e que seriam instalados pelo menos 90 kWp em comunidades rurais de baixa renda.

Da perspectiva de Costa (2006), a posição geográfica do Brasil, principalmente a região Nordeste contendo altos índices de irradiação, torna viável a aplicação de projetos utilizando a energia fotovoltaica. Fedrizzi (2003) cita que os primeiros sistemas de bombeamento instalados no País datam de 1984, e até 1994 estima-se que tenham sido instalados cerca de 150 unidades. Nos anos seguintes até 2003, o setor experimentou um crescimento bastante notável devido à atuação do Ministério de Minas e Energia (MME) com o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM). Durante a vigência desse programa, segundo a mesma autora, foram adquiridos 2500 sistemas, representando uma potência aproximada de 1,2 MWp. Outro programa de âmbito nacional relatado por Fraidenaich e Vilela (1999), foi uma colaboração Brasil e Alemanha denominado programa Eldorado. Esse programa foi realizado no interior do estado de Pernambuco ao longo de 1997 e que implantou 15 sistemas de bombeamento de água utilizando energia solar fotovoltaica.

3. PRINCÍPIOS DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

O sistema de bombeamento possui diversas topologias, tendo com isso várias possibilidades de arquiteturas de bombeamento. Monaschesi (2005) diz que para o dimensionamento eficaz de um sistema, devem-se considerar fatores primordiais para aplicar na melhor forma possível e obter um maior rendimento. A altura de recalque, a altura de sucção, a complexidade da instalação do sistema, a possibilidade de construção (ou disponibilidade) de reservatório de água, a capacidade deste, a regularidade demandada do fornecimento e a necessidade diária de água são algumas das características que definem qual bomba, motor e fonte de energia deverão ser utilizados. O fator de radiação solar na região de aplicação também influi bastante no dimensionamento dos geradores fotovoltaicos. Esses exigem uma dedicação especial, pois “o painel fotovoltaico é o componente mais confiável e tem previsões de vida em torno de 20 a 25 anos”. Fadrenraich e Vilela (1999). Pela quantidade de fatores enumerados é importante um estudo criterioso anterior à aquisição e instalação do sistema. Vários autores já realizaram estudos procurando estabelecer uma metodologia para este fim, entre eles Argaw (2004), Cuadros et al. (2004) e Glasnovic e Margeta (2007). Este é um ponto fundamental não só para o atendimento das necessidades da aplicação, mas também para o sucesso e avanço da energia fotovoltaica como alternativa limpa e confiável. Cuadros et al. (2004) destacam que o correto dimensionamento é importante para que os custos da instalação sejam pagos no menor tempo possível e Short e Thompson (2003) alertam que projetos errados podem frustrar expectativas a respeito do uso da tecnologia fotovoltaica neste tipo de aplicação.

3.1. SISTEMA DE BOMBEAMENTO

3.1.1. COMO SELECIONAR UMA BOMBA

Para que a escolha da bomba seja correta deve-se:

- Determine a vazão e a altura manométrica total requerida.
- Com os dados anteriores em mãos, escolher o melhor tipo de bomba hidráulica disponível, conforme exemplificado na Figura 24.

• : Procurar a bomba de menor potência que satisfaça esses valores, ou seja, a bomba mais eficiente, de melhor rendimento. Monachesi (2005) salienta que para determinar a potência aproximada da bomba, calcula-se utilizando um rendimento de 50%, pois só coincidentemente você encontrará uma bomba comercial exatamente adequada às necessidades do projeto.

Baseado em Fedrizzi (2003), as equações empregadas para o dimensionamento são as seguintes:

$$E_H = 2,725 \cdot Q_d \cdot AMT$$

Equação 1

Em que E_H é a energia hidráulica diária, Wh/dia; Q_d é o volume diário projetado, m³/dia; AMT é a altura manométrica total, m ou m.c.a.; e o valor 2,725 representa a constante hidráulica (C_h); o cálculo do valor da constante hidráulica é realizado pela Equação 2. Em que: ρ é a densidade da água, kg/m³; g é a aceleração da gravidade, m/s²; e 3.600 é o número de segundos por hora;

$$C_h = \frac{\rho \cdot g}{3.600}$$

Equação 2

Para o cálculo da altura manométrica total do sistema, Fedrizzi (1997), utiliza a Equação 3.

$$AMT = H_v + H_f + H_e$$

Equação 3

O coeficiente H_v , representa a altura vertical da instalação que é mostrada na Figura 43.

O coeficiente H_f e H_e , conforme Fedrizzi (1997) determinam as perdas de carga ao longo da tubulação. Esses fatores podem ser obtidos através de ábacos fornecidos pelas empresas fabricantes dos materiais em questão (ver Anexo A), a qual apresenta as perdas de carga para vários tipos de tubulações.

O coeficiente H_e , simula as perdas de carga em pontos singulares da instalação (juntas, curvas e válvulas).

$$H_e = K \cdot \frac{V^2}{2g}$$

Equação 4

O índice K , representa o coeficiente para o cálculo das perdas singulares e é demonstrada no Anexo B. V é a velocidade médio do fluido (m/s) e g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s²).

A etapa final é a obtenção da carga diária do sistema que é calculado pela Equação 5. Em que: L é a carga diária do sistema, Wh/dia; $\eta_{motobomba}$ é o rendimento estimado do conjunto moto bomba.

$$L = \frac{E_H}{\eta_{motobomba}} \quad \text{Equação 5}$$

Além da realização dos cálculos para a estimativa da energia elétrica total necessária, também é importante escolher o tipo de bomba que será instalado ao sistema. Com os dados de altura manométrica total e a vazão requerida do projeto é possível escolher o tipo de bomba ideal para o sistema. A Figura 24 mostra um diagrama que facilita a escolha entre os tipos de bombas relatadas no item 2.2.1.

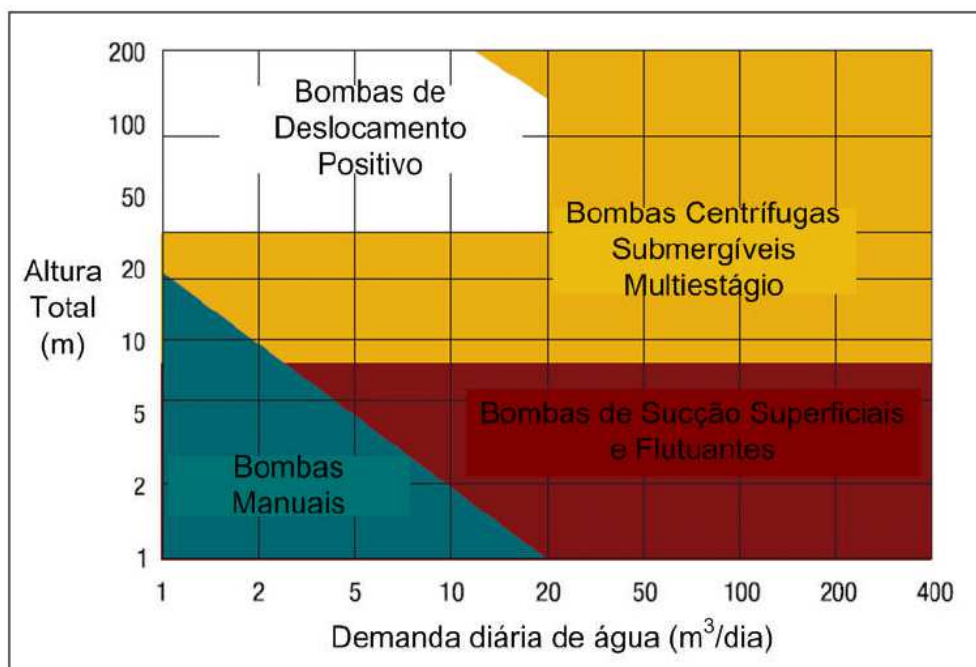


Figura 24 - Gráfico para a seleção de bombas.

Fonte: Melendez (2009).

3.1.2. CURVAS DE DESEMPENHO DAS BOMBAS

As características de desempenho das bombas são representadas por curvas fornecidas pelos fabricantes. Elas traduzem o desempenho esperado de cada bomba. As curvas são estimadas na etapa de projeto da bomba, principalmente em casos especiais de bombas de grandes dimensões e para a utilização de outros tipos de fluídos.

“O usual é a utilização das bombas, cujas curvas características são levantadas no laboratório do fabricante e disponibilizadas em catálogos técnicos, alguns deles disponíveis na *internet*; outros, nos respectivos representantes” Monachesi (2005).

São, basicamente, três as curvas características tradicionais:

- Curva: altura x vazão

Segundo Monachesi (2005), esta curva é obtida a partir dos ensaios de pressão e vazão da bomba. Embora seja, teoricamente, uma parábola, devem-se descontar os efeitos do atrito, que mudam a curva teórica. Nos modelos de simuladores, essa costuma ser interpolada por uma curva do segundo grau (parábola), conforme pode ser observado na Figura 25.

. Desde que se considerem apenas os pontos próximos ao ponto de funcionamento, essa aproximação não traz maiores problemas. Não deve, contudo, ser utilizada para toda a faixa de funcionamento fornecida pelo catálogo. Além disso, a curva representa também a relação entre a vazão que a bomba é capaz de recalcar e a altura manométrica total (AMT) “contra” a qual essa vazão pode ser recalçada. O ponto de funcionamento dessa bomba em um determinado sistema é dado pelo cruzamento da curva do sistema com a curva da bomba. Lembrando que a curva da bomba nada tem a ver com a curva do sistema. Ela é uma característica da bomba, assim como a curva do sistema nada tem a ver com a curva da bomba. É uma característica hidráulica do sistema de tubulações, reservatórios e cotas dos níveis de água de onde e para onde se quer recalcar.

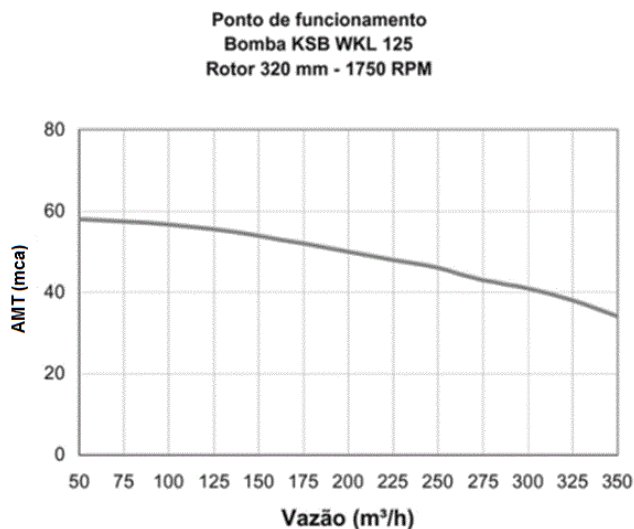


Figura 25 - Curva da carga pela vazão.

Fonte: Monachesi (2005)

- Curva: potência x vazão

Representa a relação entre a vazão bombeada e a potência necessária para tal. A potência hidráulica absorvida pela bomba é a potência que o motor deve fornecer ao eixo da bomba. Não é a potência que é demandada da concessionária de energia elétrica. Essa é o resultado da divisão da potência dada pelo catálogo no fabricante, pelo rendimento do motor e pelo fator de potência da instalação Monachesi (2005). A Figura 26 apresenta a curva de potência por vazão bombeada.

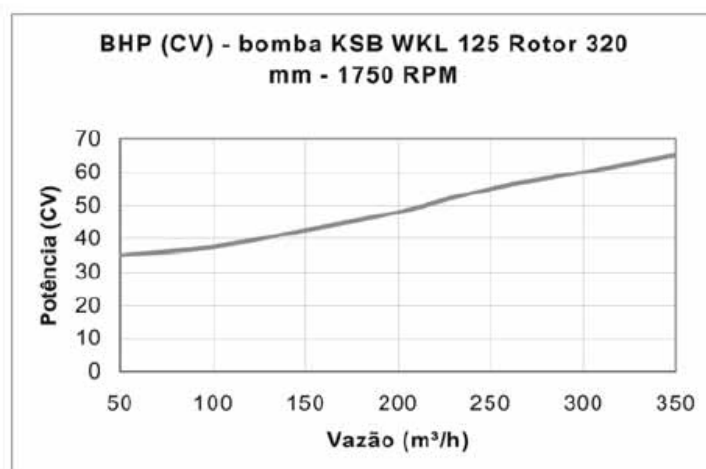


Figura 26 - Curva de Potência x vazão bombeada

Fonte: Monachesi (2005).

- Curva: rendimento x vazão

Monachesi (2005) diz que é a curva que mostra a “região” do intervalo de vazões possível para a bomba, onde se dá o melhor rendimento (máximo da curva) e seu valor. Pode-se visualizar a sua curva na Figura 27.

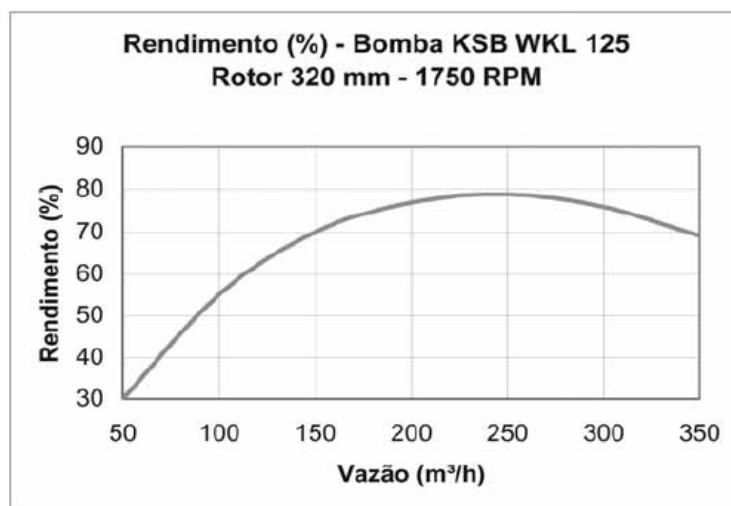


Figura 27 - Curva de Rendimento x vazão bombeada.

Fonte: Monachesi (2005)

3.2. SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para o dimensionamento dos módulos fotovoltaicos são apresentadas as seguintes metodologias:

3.2.1. DIMENSIONAMENTO PELO SOL PLENO (CONVENCIONAL)

Conforme, Melendez (2009), o tamanho do gerador fotovoltaico é calculado levando em conta o número de horas de sol pleno (HSP). Esse método, conforme Alvim et al (2002), considera apenas o consumo médio de água e não leva em conta o efeito da temperatura. Então se calcula o número de horas de sol diárias a uma irradiância solar de 1000 W/m² e que equivale à energia total diária que é incidente sobre a superfície do gerador fotovoltaico.

Equação 6

$$P_{(Wp)} = 1,25 \cdot \frac{L}{HSP}$$

em que: $P_{(Wp)}$ é a potência-pico da instalação, Wp.

- L = Energia total requerida do conjunto moto-bomba (Wh/dia);
- HSP = Horas de sol pleno.

3.2.2. DIMENSIONAMENTO DE BANCO DE BATERIAS

Em sistemas fotovoltaicos isolados com armazenamento de energia em baterias, Leva et al (2004), descrevem que é necessário conhecer a capacidade de armazenamento e amplitude de descarga das mesmas.

Equação 7

$$Bat = \frac{L \cdot D}{AmpDesc \cdot \eta_{conversor}}$$

Onde:

- Bat = Reserva de baterias (Wh);
- D = Número de dias independentes;
- $AmpDesc$ = Amplitude de descarga (%);
- $\eta_{conversor}$ = Eficiência do conversor.
- L = Energia total requerida do conjunto moto-bomba (Wh/dia);

Para ter o valor das baterias em Ah basta aplicar a seguinte equação:

Equação 8

$$Bat(Ah) = \frac{Bat \cdot 100}{Vn}$$

Onde:

$Bat(Ah)$ = Reserva da bateria em Ah;

Vn = Tensão nominal da bateria.

4. ACOMPANHAMENTO E ENSAIOS DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO APLICANDO ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Neste capítulo através de caráter exploratório experimental, são apresentados os ensaios de duas topologias, sendo elas: carga CC sem armazenamento de energia e carga CA sem armazenamento de energia utilizando inversor de frequência. Na topologia de carga CC serão ensaiados os níveis de irradiação solar nas regiões de aplicações, estes níveis são um fator muito importante para o desempenho dos sistemas. O local de ensaios para cargas CC e CA sem armazenamento de energia foi o Laboratório de energia solar (LABSOLAR) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) na cidade de Florianópolis-SC. Apenas na topologia com carga CC, será acompanhado o comportamento da energia fotovoltaica, os rendimentos do sistema, eficiência energética e a vazão bombeada para a topologia.

Os valores de irradiação coletados, tanto com instrumentos ou pelo ATLAS solarimétrico, são valores com sensores a uma inclinação de 0° . A inclinação dos painéis fotovoltaicos é otimizada para os dias de inverno. Isso implica que a inclinação será da latitude local adicionada de 15° . Para a conversão dos valores de irradiação para a inclinação desejada foi necessário a utilização do programa RADIASOL.

4.1. MONTAGEM DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO

4.1.1. SISTEMA COM CARGA CC, SEM ARMAZENAMENTO (UFSC-LABSOLAR).

Este sistema foi montado no topo do bloco do departamento de engenharia mecânica da UFSC, em Florianópolis. O sistema é composto de:

- Bomba Solarjack;
- Painel fotovoltaico;
- Controlador;
- Hidrômetro;
- Reservatórios de água.

A bomba hidráulica usada na montagem do sistema, foi uma bomba Solarjack

modelo SCS-14-160. As siglas desse modelo exemplificam que essa é uma bomba de uso Solar, Centrífuga e Submersível. O equipamento tem uma vazão média de 14 galões por minuto (53 litros) e pode bombear o fluido até uma altura manométrica total de 160 pés (48,8 metros). O equipamento também possui uma tensão de operação entre 60 e 105 Volts e potência máxima de 955W. Demais informações sobre esse modelo e diversos outros são mostrados no Anexo D, Anexo E e Anexo F. A Figura 28 e a Figura 29 mostram a bomba antes de ela ser instalada. Já a Figura 30, mostra o equipamento instalado em campo, submersa em água dentro de um reservatório que está simulando um poço ou cisterna.



Figura 28 - Bomba Solarjack na bancada.



Figura 29 - Modelo da bomba.



Figura 30 - Bomba Solarjack SCS instalada em campo.

Os sistema fotovoltaico montado é composto de dois módulos fotovoltaicos de silício monocristalino, fabricante Sunpower Modelo SPR-230-WHT-U. Cada módulo possui uma potência máxima de 230 Wp e uma tensão de operação de 41 Volts, conforme pode ser visto na Figura 31. Os dois módulos foram ligados em série,

demonstrado na Figura 36, para se obter uma tensão de operação maior para o acionamento da bomba. A tensão total do sistema foi de 82 Volts com potência máxima de 460 Wp. Cada módulo foi instalado sobre um perfil de alumínio com uma inclinação de 42° , conforme Figuras 32 , 33, 34 e 35. Os dois módulos fotovoltaicos possuem as mesmas características elétricas, diferenciando apenas o seu acabamento estético.



Figura 31 - Módulo fotovoltaico: dados de placa.



Figura 32 - Módulo fotovoltaico sendo posicionado sobre o perfil de alumínio.



Figura 33 - Ajuste da inclinação do módulo.



Figura 34 - Posicionamento do segundo módulo fotovoltaico.



Figura 35 - Módulos fotovoltaicos instalados



Figura 36 - Conexão em série dos módulos fotovoltaicos.

Para o acionamento do conjunto motobomba SunPuns, foi fornecido juntamente o Controlador Solarjack Modelo PCB8-90C. Esse controlador, específico para esse tipo de bomba, tem a função de conectar a bomba com o módulo fotovoltaico e aciona-lá somente com um valor mínimo de tensão do sistema. Isso evita que a bomba seja danificada por subtensão. A Figura 37, mostra o diagrama de ligação entre o módulo fotovoltaico, bomba Solarjack e uma chave bóia. Esse controlador protege o circuito do conjunto através de fusíveis, caso haja uma sobre tensão ou curto circuito. As Figuras 38 e 39 mostram as conexões realizadas entre o controlador e os demais equipamentos. Esse sistema foi fixado na mesma estrutura de alumínio que sustenta os módulos fotovoltaicos inclinados.

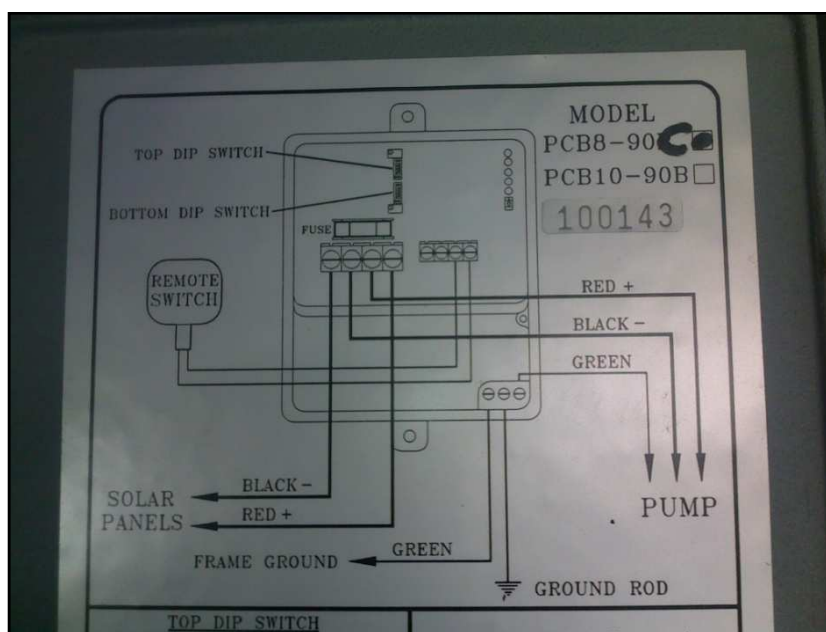


Figura 37 - Controlador, esquema das ligações.



Figura 38 – Conexão das ligações do sistema fotovoltaico.



Figura 39 - Posição do controlador, na estrutura de alumínio.

O sistema possui uma caixa de água com capacidade de 360 Litros para o armazenamento da água durante o bombeamento, mostrada na Figura 40. Essa caixa de água está instalada próximo aos módulos fotovoltaicos, no terraço do departamento de engenharia mecânica da UFSC. No interior dessa caixa de água, há uma chave bóia conectada ao controlador. Com isso, essa chave é responsável pelo desligamento da bomba para que não haja transbordamento.



Figura 40 – Caixa de água para armazenamento.

No térreo está localizada a caixa de água inferior, com capacidade igual a caixa de água superior, mostrada nas Figuras 41 e 42. Essa caixa simula uma cisterna ou poço. A bomba está localizada dentro dessa caixa de água. Assim como a superior essa também possui uma chave bóia, porém essa está ligada em série com a bomba, garantindo que a bomba desligue em um nível mínimo de água. Essa ação impedirá que a bomba trabalhe a vazio.



Figura 41 - Montagem da bomba na caixa de água inferior.



Figura 42 - Caixa de água inferior em que a bomba foi instalada.

Todo o sistema de bombeamento está instalado como um circuito em malha fechada. O líquido é bombeado para a caixa superior através de uma tubulação de PVC com diâmetro de $\frac{3}{4}$ de polegada. Esse líquido retorna para a caixa de água inferior através de uma tubulação de PVC com diâmetro de 2 polegadas. O diâmetro da tubulação de retorno deve ser maior para que se mantenha vazão semelhante de entrada e saída. A altura física do sistema é de 15 metros, como pode ser visto na Figura 43.



Figura 43 – Vista da edificação onde está instalado o sistema de bombeamento

Para a medição do volume de água bombeado, foi instalado um hidrômetro convencional na tubulação de entrada da caixa superior. As medições são coletadas as 20h00min de cada dia. Com a diferença dos valores coletados entre um dia e outro é possível saber o volume total bombeado no dia.



Figura 44 – Hidrômetro instalado próximo a caixa de água superior

4.1.2. SISTEMA COM CARGA CA, SEM ARMAZENAMENTO (UFSC – ILHA DE RATONES).

Este sistema será instalado na Ilha de Ratonés em Florianópolis. Nessa localidade já existe um sistema fotovoltaico isolado responsável pelo abastecimento de energia elétrica na Ilha. Existe também, atualmente, um sistema fotovoltaico de bombeamento utilizando motor CC e sem armazenamento em baterias. A nova topologia, sistema com carga CA sem armazenamento, tem o objetivo de testar uma configuração capaz de atender maiores demandas de consumo de água, para isso a potência do motor CA e conseqüentemente do painel fotovoltaico também será maior.

Parte do arranjo fotovoltaico já existente na Ilha foi reservada para este novo sistema de bombeamento, consiste de um painel com 20 módulos da marca SOLAREX MSX-77, de 77Wp cada, totalizando 1.540Wp. Os módulos serão interligados em série para obter a tensão necessária para acionar o inversor WEG CFW 10.

Essa configuração se baseará na instalação de um motor de indução CA de 3 CV, juntamente com um inversor comercial CFW 10, ambos do fabricante WEG. A figura 45 mostra o sistema ensaiado sobre a bancada. O inversor será acionado diretamente pelos módulos fotovoltaicos.

Esse sistema proposto foi apenas ensaiado no laboratório da UFSC (LABSOLAR), com o objetivo de se obter a tensão mínima necessária no barramento CC para o acionamento do inversor e do motor ainda a vazio. Baseados nas informações do manual do inversor, obteve-se a faixa de tensão (200 e 410 Vcc) necessários no barramento CC interno do inversor para permitir seu funcionamento. Esses valores foram inseridos diretamente em CC nas entradas (L/L1 e N/L2) do inversor, como a entrada deste dispositivo é composta por uma ponte retificadora trifásica não controlada, essa energia passa pelos diodos do retificador e alimenta o barramento CC interno do inversor. Foi utilizada uma fonte CC variável (0 a 600Vcc) com corrente controlada para este ensaio, e o acionamento do motor de indução trifásico foi realizado a contento.

A montagem e conseqüentemente o ensaio em campo, não foi possível de ser realizada em tempo hábil para incluir os resultados nesta monografia, devido a falta da bomba que será acoplada ao motor, e também a infraestrutura de

tubulações hidráulicas necessárias. Portanto, os ensaios de vazão em m^3 de água para cada W_p instalado, serão objeto de estudo futuro.



Figura 45 - Inversor e motor conectados sobre bancada de teste.

4.2. ENSAIOS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Foram colhidos dados de irradiância solar (W/m^2) dos meses de Agosto e Setembro de 2011, através de sensores instalados no plano horizontal. A medição é registrada a cada 5 minutos, 24 horas por dia. Esses dados foram obtidos através de um acesso remoto ao um *DataLogger* de irradiância do sensor horizontal do sistema fotovoltaico conectado a rede, presente no prédio do LABSOLAR. O arquivo gerado dessas medições é um formato que pode ser aberto em qualquer software de planilhas, no caso foi utilizado o software Excel.

Para a obtenção dos valores de irradiação (kWh/m^2), foi feita a somatória de todos os valores de a irradiância no dia e esse valor foi dividido pela quantidade de amostras em uma hora. Nesse caso, o valor foi dividido por 12 (doze), pois 1 hora contém então 12 intervalos de 5 minutos.

No entanto para demonstrar a variação dos resultados obtidos, serão mostrados somente os resultados finais de irradiação de três dias ao mês, sendo eles: dia com irradiação mínima (dia chuvoso), dia com irradiação intermediária (grande variação da irradiância no dia), dia com irradiação máxima (dia limpo, sem nuvens).

Data	08/ago	28/ago	31/ago
Irradiação (kWh/m ²) inclinação de 0°	0,11	2,73	5,30
Data	08/set	21/set	29/set
Irradiação (kWh/m ²) inclinação de 0°	0,28	5,15	6,25

Tabela 1 - Irradiação em Florianópolis no plano horizontal

Devido aos sensores de irradiância, estarem instalados na horizontal (0°) e os módulos fotovoltaicos estarem em um plano inclinado (42°), necessita-se converter os valores obtidos para o ângulo da aplicação. Para isso, utilizou-se dos softwares didáticos RADIASOL e RADIASOL 2, os quais podem converter a irradiação para qualquer ângulo de aplicação.

A Figura 46 mostra a tela inicial do software, em que se pode entrar com valores de irradiação e localização do mês desejado. Nesta figura foi inserido o valor do dia 31 de Agosto para a conversão. Esse processo foi replicado para todos os dias desejados dos meses de Agosto e Setembro. Assim os valores dos outros meses são desconsiderados.



Figura 46- Tela inicial do software RADIASOL.

A Figura 47 mostra a tela principal do software com o ângulo a 0° , nela pode-se variar o ângulo para a inclinação desejada. Pelo método de cálculo e arredondamento usado pelo software o valor do dia 31/ago/2011 foi modificado de 5.300 kWh/m^2 para 5.262 kWh/m^2 , pois ele decompõe a energia total ao longo das horas do dia.

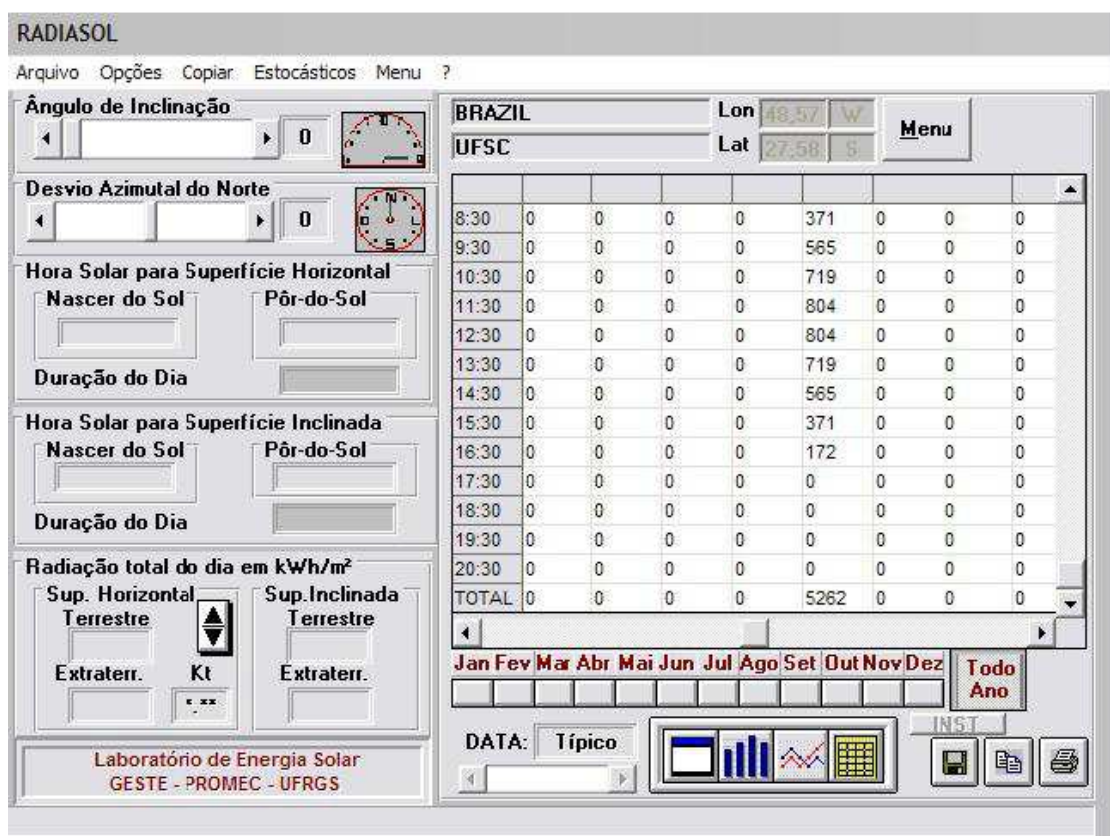


Figura 47- Tela principal do RADIASOL a 0° .

Após a alteração do ângulo de inclinação, o software apresenta o valor aproximado de irradiação captada pelos módulos fotovoltaicos. A irradiação medida no plano horizontal (0°), que foi de $5,300 \text{ kWh/m}^2$, corresponde a uma irradiação no plano dos módulos (42°) de $7,206 \text{ kWh/m}^2$, conforme observado na Figura 48

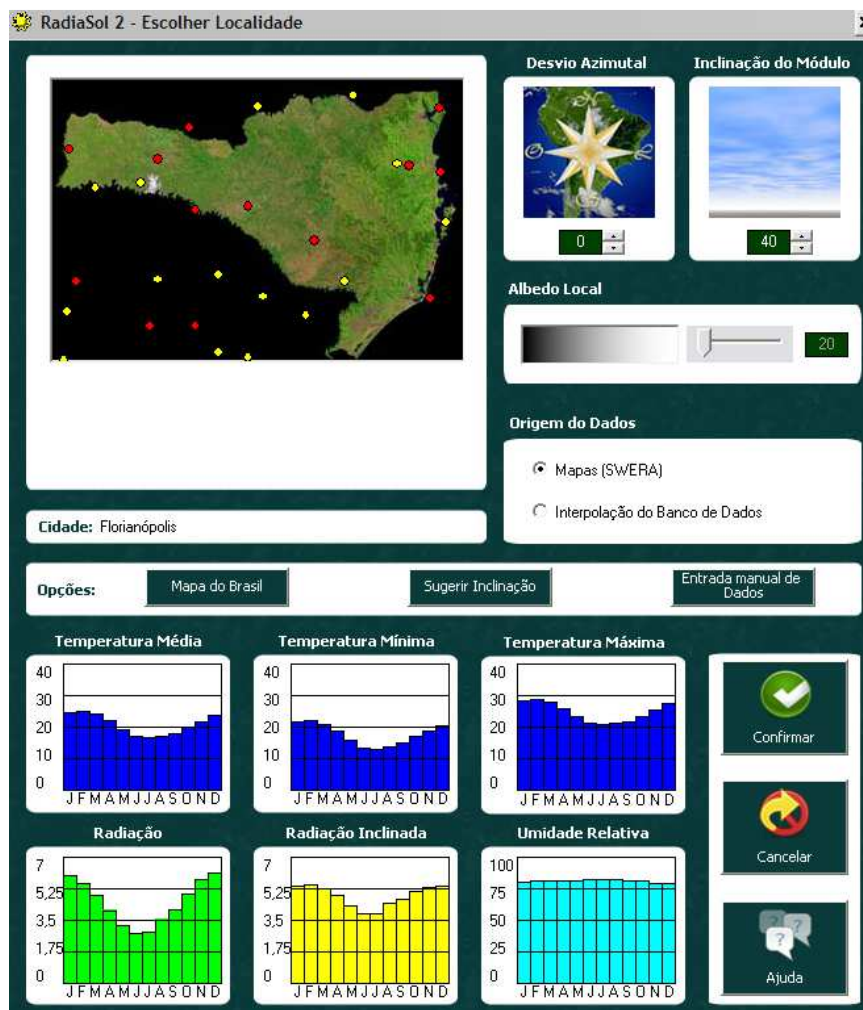


Figura 49 - Tela do software RADIASOL 2.

4.3. ENSAIOS DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO (UFSC - LABSOLAR)

No dia 31 de Agosto, foi realizado em campo um teste de performance do sistema em que se obteve o volume máximo de água bombeado para o dia. Esse valor foi referência para obter uma estimativa de volume para outros dias de irradiação variada. Essa estimativa foi realizada através da obtenção de uma razão de bombeamento dividindo o volume bombeado pela irradiação.

- Irradiação 31 de agosto a 42°: 7,21 kWh/m²
- Volume bombeado: 14600 litros
- Razão de bombeamento: 2048 litros/kWh/m²

Para uma comparação com o valor volumétrico coletado e os valores teóricos proposto, usou-se da Equação 9 que tem como referência a Equação 3 e Equação 6, citadas nos itens 3.1.1 e 3.2.1 respectivamente.

$$P(Wp) = \frac{1,25 \times \frac{2,275 \times Qd \times (AMT)}{\eta_{motobomba}}}{HSP} \quad \text{Equação 9}$$

O rendimento da bomba centrífuga foi considerado do Anexo C apresentado por Medeiros (2011).

Os índices então considerados são:

- $Hv = 15\text{m}$;
- $Hf = 1,6\text{m}$ (trecho de 25m lineares).;
- $He = 23\text{m}$ (10 cotovelos comuns);
- $AMT = Hv + Hf + He = 39,6\text{ m}$;
- $P(Wp) = 460\text{ Wp}$ (2 painéis);
- $HSP = 7,21$ (horas a 1000 W/m^2) no dia 31 de agosto;
- $\eta_{motobomba} = 0,5$.

O volume coletado em m^3/dia foi de 14,600, sendo que o esperado era 14,723. Conforme os valores apresentados, a Equação 9, mostrou-se verdadeira para estimar os volumes a serem bombeados. Nota-se que o fator He , perdas em pontos singulares teve grande influência na somatória da altura manométrica total, cerca de 58%. A grande quantidade de curvas no sistema fez com que a perda de carga nesses pontos fosse significativa. Isso demonstra que a eficiência do sistema pode ser melhorada apenas com a alteração do caminho da tubulação.

Com a coleta dos dados de irradiância citado no item 4.2 e, através do *software* excel foi possível montar os gráficos de irradiância e volume bombeado através dos dias analisados:

4.3.1. MÊS DE AGOSTO DE 2011

No dia 31 de agosto, conforme citado no item 4.3, foi o dia em que se obteve máxima irradiância no mês de Agosto devido ao céu estar limpo, sem nenhuma

nuvem. O valor máximo de irradiância medido pelo sensor instalado na horizontal, foi de 762 W/m^2 às 12h10min. Convertendo esse valor para a inclinação dos módulos fotovoltaicos (42°) obtem-se o valor de irradiância de 1025 W/m^2 , conforme pode ser visto na Figura 50. Esse gráfico apresenta a característica da irradiância ao longo de um dia perfeito, em que nas primeiras horas da manhã a irradiância tem um valor baixo. Ao longo do dia o sol percorre o seu curso de leste para o oeste, assim aumentando o valor da irradiância sobre os módulos fotovoltaicos. Ao meio-dia o sol se encontra em seu apogeu, com isso tem-se uma incidência máxima dos raios solares. No final do dia, com o sol em seu crepúsculo, tem-se novamente uma baixa irradiância. A irradiação do dia a 42° foi de $7,21 \text{ kWh/m}^2$.

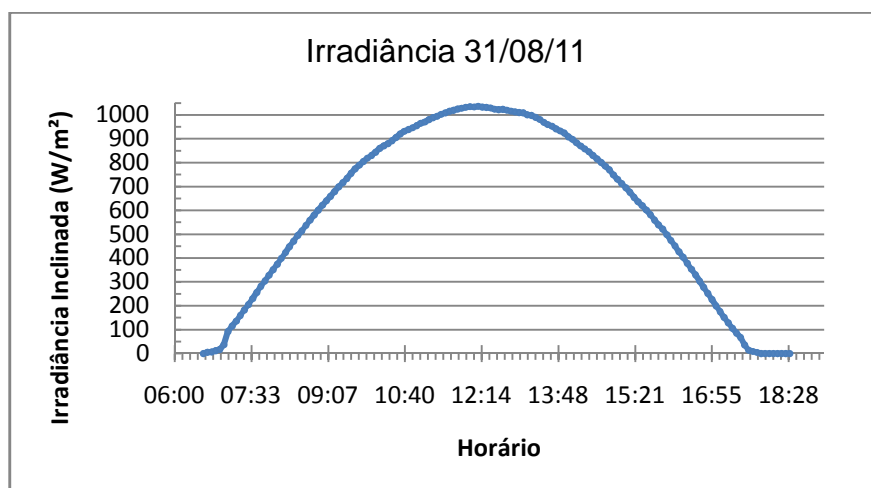


Figura 50 - Gráfico da irradiância de um dia perfeito, Agosto de 2011.

Devido ao bom nível de irradiação no dia 31 de Agosto, o volume de água bombeado foi referência para o cálculo dos volumes bombeados para os outros dias. O hidrômetro instalado próximo a caixa de água superior, registrou que o volume de água acumulado no dia foi 14600 litros. A Figura 51 mostra a acumulação de água ao longo do dia. Nota-se que no início do dia o acúmulo de água é pequeno, devido a baixa irradiância e vai aumentando ao longo das horas como uma forma de armazenamento da energia do sol.

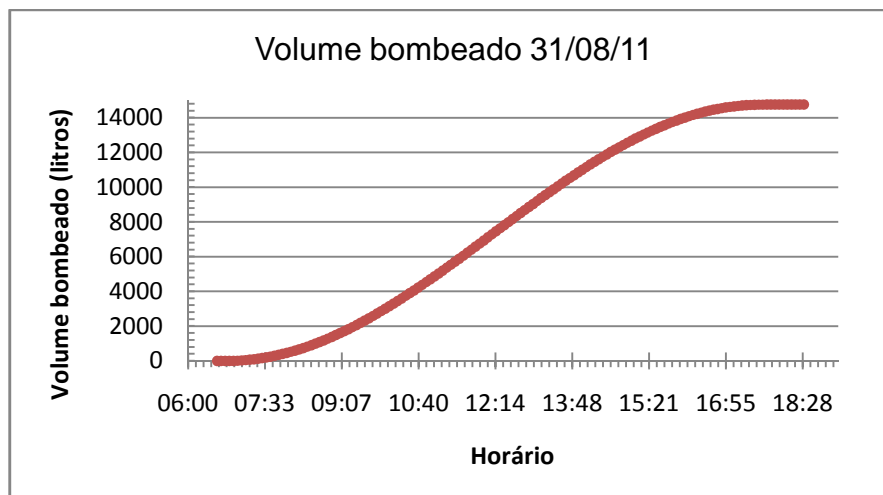


Figura 51 - Volume de água acumulado durante um dia perfeito de Agosto de 2011.

O dia 08 de Agosto, foi um dia encoberto com muitas nuvens. Esse efeito teve uma influência direta na irradiância sobre os módulos fotovoltaicos, sendo que a máxima irradiância foi de 42 W/m² às 12h50min, conforme pode ser visto na Figura 52. Devido a característica desse dia o valor da irradiação foi de 0,10 kWh/m².

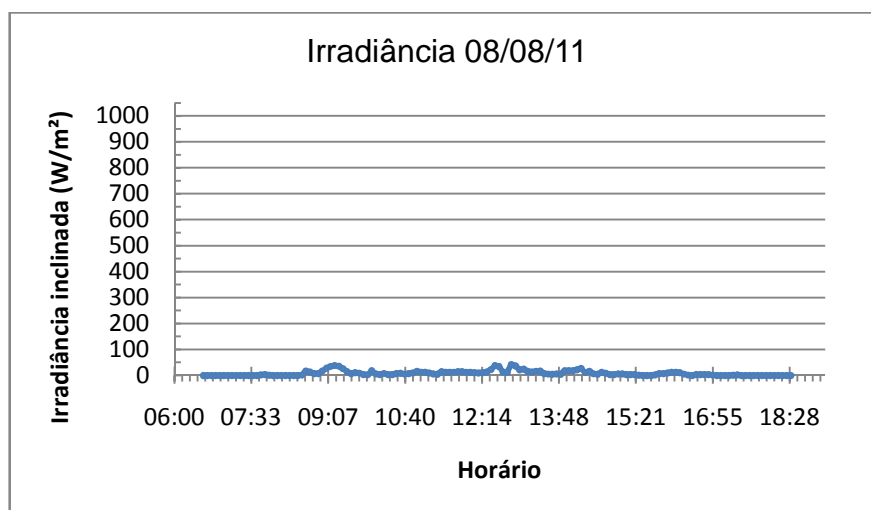


Figura 52 - Gráfico de irradiância de um dia ruim de Agosto de 2011.

O volume bombeado ao longo desse dia foi pequeno, conforme mostrado na Figura 53, resultado da baixa irradiação. O volume de água para esse dia não foi medido mas estimado, conforme item 4.3. O valor acumulado de água nesse dia foi de 205 litros.

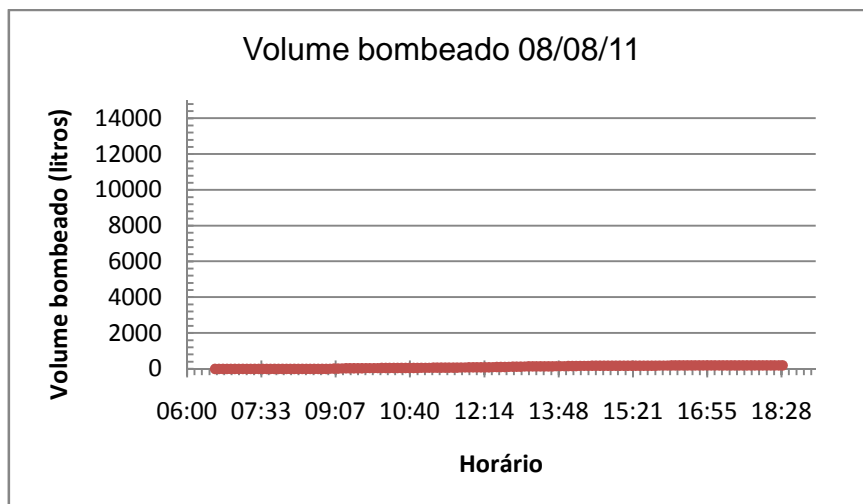


Figura 53 - Volume de água acumulado em um dia ruim de Agosto de 2011.

O dia 28 de Agosto foi um dia considerado um dia intermediário, ou seja, sol com a passagem frequente de nuvens. Observa-se esse efeito na grande variação da irradiância ao longo do dia. Mesmo assim pode-se observar um valor maior de irradiância entre as 10h00min e 15h00min. A irradiância máxima foi de 669 W/m² às 13h25min. O valor da irradiação no dia foi de 2,8 kWh/m², Figura 54.

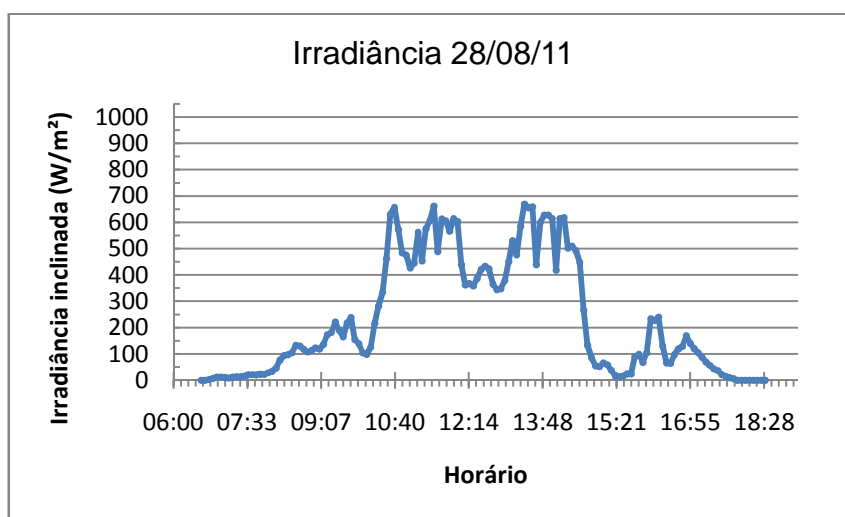


Figura 54 - Gráfico de irradiância em um dia intermediário de Agosto de 2011.

Devido à irradiação intermediária no dia, o volume bombeado estimado foi menor que no dia de céu limpo, porém maior que o do dia ruim com muitas nuvens, conforme a Figura 55. O volume acumulado de água no foi de 5734 litros.

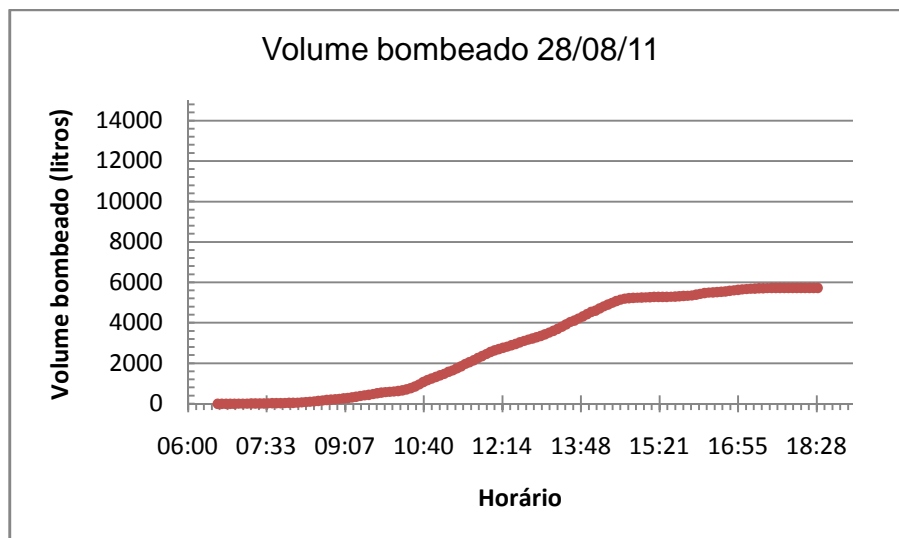


Figura 55 - Volume de água acumulado em um dia intermediário de Agosto.

4.3.2. MÊS DE SETEMBRO DE 2011

As medições do mês de Setembro foram realizadas da mesma maneira que o mês de Agosto. Também foram escolhidos apenas três dias do mês com as mesmas características: dia com irradiação mínima (dia chuvoso), dia com irradiação intermediária (grande variação da irradiação no dia), dia com irradiação máxima (dia limpo, sem nuvens).

O dia 08 de Setembro foi o dia com irradiação mínima, com um valor máximo de irradiação de $69,5 \text{ W/m}^2$ às 12:50, conforme Figura 56. A irradiação no dia foi de apenas $0,25 \text{ kWh/m}^2$.

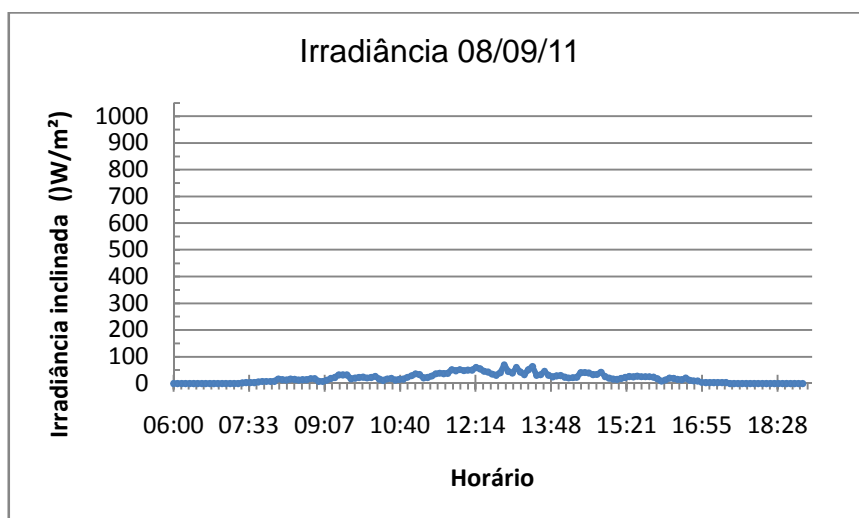


Figura 56 - Gráfico de irradiação em um dia ruim de Setembro de 2011.

Na Figura 57 tem-se o valor de água bombeado no dia. Esse valor foi baixo devido ao dia estar com muitas nuvens e chuvoso. O volume total bombeado foi estimado em apenas 512 litros.

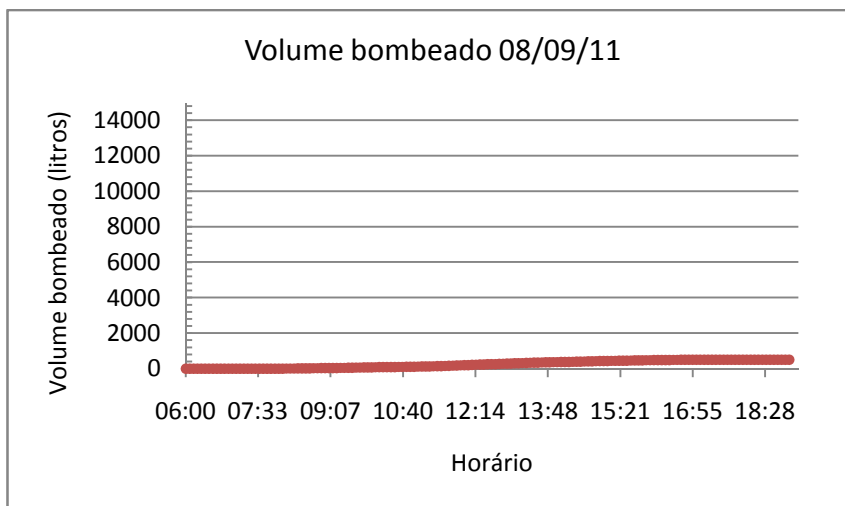


Figura 57 - Volume de água acumulado em um dia ruim de Setembro de 2011.

O dia 21 de Setembro foi o dia com nível de irradiação intermediária, ou seja, com a presença de nuvens. Na Figura 58 nota-se que nas primeiras horas da manhã o céu estava limpo. A partir das 09h00min ocorreu a presença de nuvens, ao qual influenciou nos valores da irradiância, provocando variações. A partir das 14h00min o céu voltou a ficar limpo. O valor de irradiância máxima foi de 1011 W/m² às 12h30min. A irradiação no dia foi de 5,65 kWh/m².

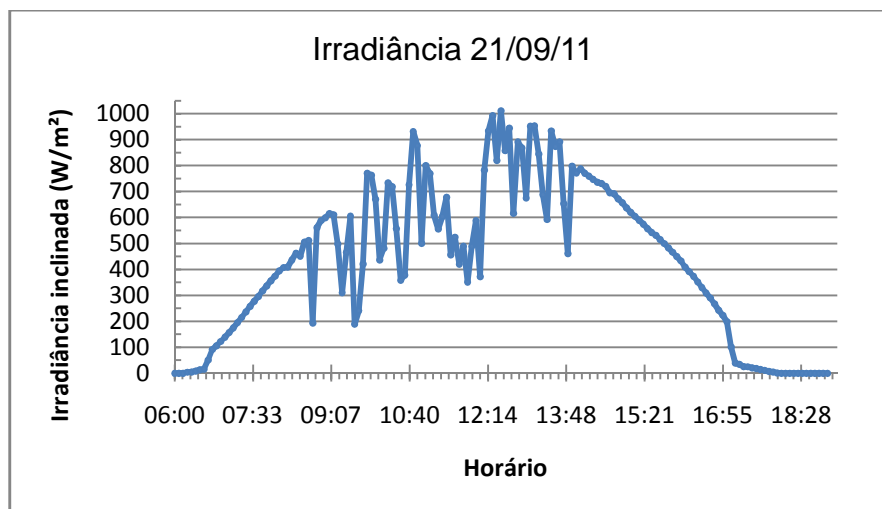


Figura 58 - Gráfico de irradiância em um dia intermediário de Setembro de 2011.

Devido ao valor de irradiação intermediário no dia, o volume bombeado estimado foi maior que o do dia ruim com muitas nuvens, conforme a Figura 59. O valor acumulado de água nesse dia foi de 11569 litros.

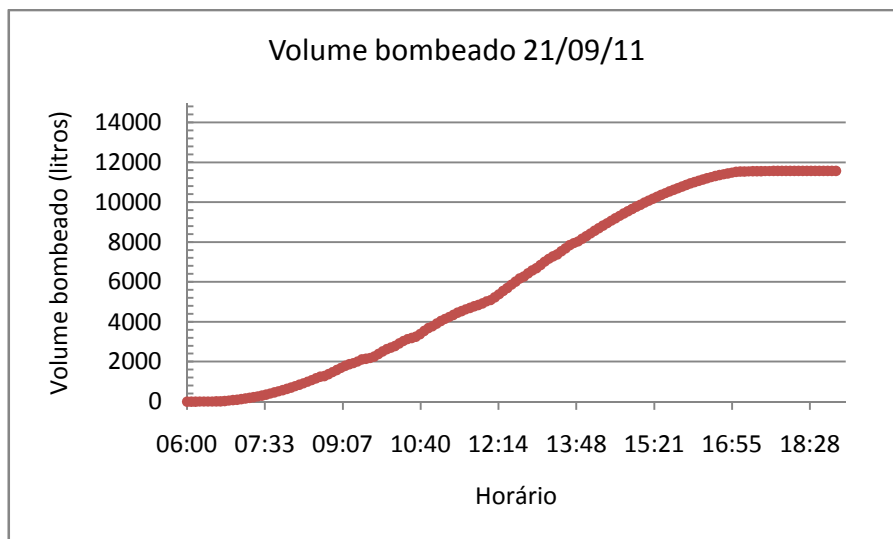


Figura 59 - Volume acumulado em um dia intermediário de Setembro de 2011.

O dia 29 de Setembro, conforme Figura 60, foi o dia que teve um nível de irradiação máxima do mês de Setembro e por isso foi selecionado como o dia perfeito de céu limpo. Durante todo o dia, as nuvens não prejudicaram a incidência dos raios solares sobre os módulos fotovoltaicos. A irradiação máxima foi de 976 W/m² às 12h00min. A irradiação do dia foi de 7,15 kWh/m².

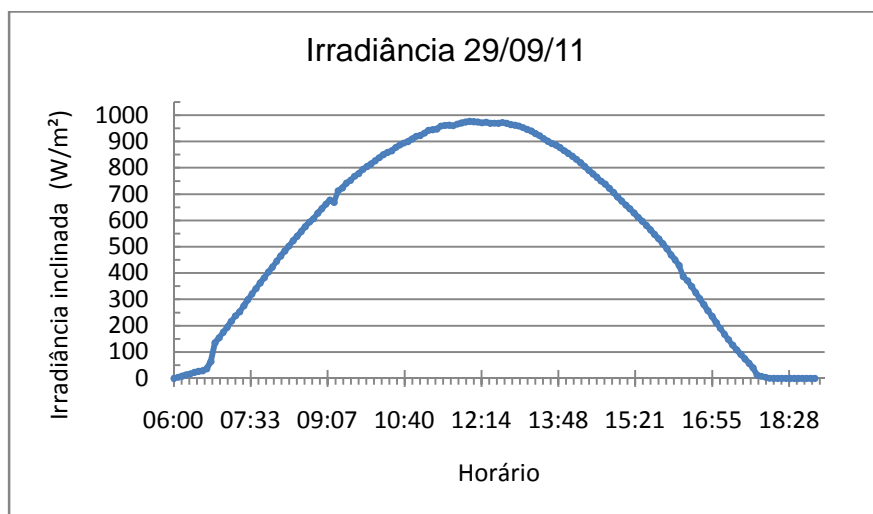


Figura 60 - Gráfico de irradiação em um dia perfeito de Setembro.

Nesse dia considerado perfeito, também houve apenas uma estimativa do volume bombeado. O volume acumulado ao longo do dia foi de 14670 litros, como mostrado na Figura 61. Esse volume estimado foi bastante próximo do volume de referência do dia 31 de Agosto que foi de 14600 litros.

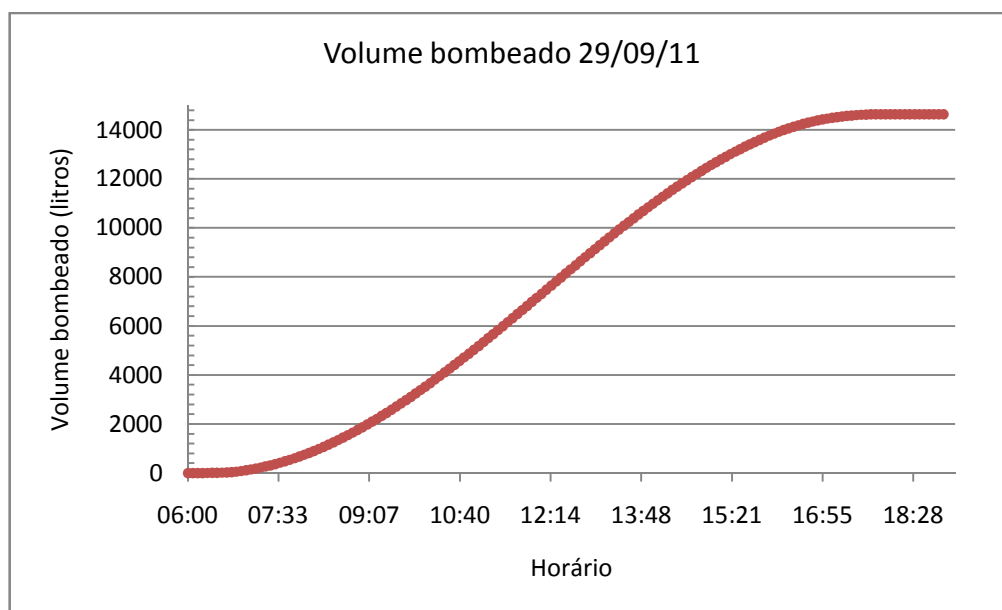


Figura 61 - Volume acumulado em um dia perfeito de Setembro.

4.4. ANÁLISE DE IRRADIAÇÃO

Com a coleta de irradiância e o cálculo dos valores de irradiação para todos os dias dos meses de Agosto e Setembro, analisados em Florianópolis, foi possível calcular uma média de irradiação que representa o valor de um dia típico na região. Esse valor foi então comparado com as médias históricas de irradiação dos últimos 10 anos para os respectivos meses, com os dados do ATLAS solarimétrico. A Tabela 3 exibe a comparação entre os valores reais e os valores históricos de irradiação no plano horizontal (0°).

Mês	Irradiação Local (kWh/m².dia)	Irradiação Histórica (kWh/m².dia)	Erro (%)
Agosto	2,510	3,740	32,888
Setembro	3,830	3,970	3,526

Tabela 3 – Irradiação típica de um dia em Florianópolis no plano horizontal (0°).

O erro apresentado no mês de Agosto, é justificado pelo fator climático atípico desse ano. Devido a ocorrência de chuvas constantes, a irradiação foi reduzida em varios dias consecutivos, interferindo na média mensal. Já o erro de 3,526 % presente no mês de Setembro, demonstra apropriado para ser considerado como referência em estimativas de projetos. Esse erro percentual tem o objetivo de direcionar os cálculos de dimensionamento de um sistema de bombeamento, como o proposto nesse trabalho. A aplicação dessa diferença minimiza as incertezas presentes nos cálculos de dimensionamento. Para trabalhos futuros é interessante repetir essa metodologia para outros meses ao longo do ano, tendo assim uma perspectiva anual.

4.5. SIMULAÇÃO DE SISTEMAS (CURITIBA E FLORIANÓPOLIS)

Nesse tópico são analisados os valores das médias de irradiação em um dia típico em Curitiba e Florianópolis. Considerando o menor erro da Tabela 3 e com a média histórica dos dados do ATLAS solarimétrico, serão descritos quais seriam os valores de irradiação médios (máximo e mínimo) estimados para os meses de Agosto e Setembro. Após a apresentação desses dados será realizada uma estimativa mensal do volume de água bombeado .

Para a estimativa dos níveis de irradiação de Curitiba, foram considerados os valores presentes no ATLAS Solarimétrico (Latitude 25,42; Longitude 49,27). A localização foi retirada do *software* Radisol 2, demonstrado na Figura 62.

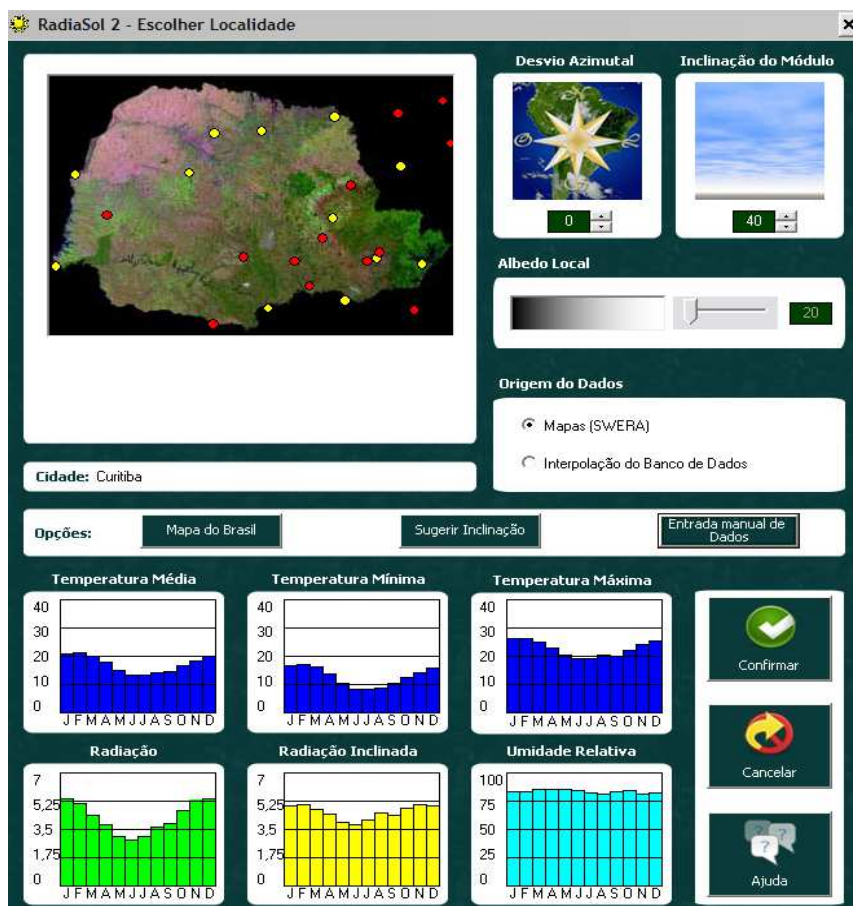


Figura 62 - Tela do Software RADIASOL 2 para Curitiba.

Todos os valores de irradiação presente no ATLAS Solarimétrico são valores no plano horizontal (0°), representados na Tabela 4 e Tabela 5.

Mês	Irradiação Histórica (kWh/m ² .dia)	Erro (%)	Irradiação máxima (kWh/m ² .dia)	Irradiação mínima (kWh/m ² .dia)
Agosto	4,190	±3,526	4,338	4,042
Setembro	4,450	±3,526	4,607	4,293

Tabela 4 - Dados históricos de irradiação em Curitiba a 0°

Mês	Irradiação Histórica (kWh/m ² .dia)	Erro (%)	Irradiação máxima (kWh/m ² .dia)	Irradiação mínima (kWh/m ² .dia)
Agosto	3,740	±3,526	3,872	3,608
Setembro	3,970	±3,526	4,110	3,830

Tabela 5 – Dados históricos de irradiação em Florianópolis a 0°

Com o uso do *software* RADIASOL os dados de irradiação serão convertidos para o ângulo de aplicação, de 40° e 42° para as localidades de Curitiba e Florianópolis respectivamente. A conversão dos valores para o ângulo de aplicação é apresentada na Tabela 6 e Tabela 7.

Mês	Irradiação a 40° máxima (kWh/m ² .dia)	Irradiação a 40° mínima (kWh/m ² .dia)
Agosto	5,344	4,882
Setembro	4,814	4,338

Tabela 6 - Irradiação estimada para o ângulo de aplicação de 40°, Curitiba.

Mês	Irradiação a 42° máxima (kWh/m ² .dia)	Irradiação a 42° mínima (kWh/m ² .dia)
Agosto	4,724	4,240
Setembro	4,204	3,834

Tabela 7 - Irradiação estimada para o ângulo de aplicação de 42°, Florianópolis.

Após os valores de irradiação para os ângulos de aplicação serem conhecidos, foi realizada uma estimativa de volume bombeado para cada caso. Essa estimativa usou a Equação 9 como forma de obter o volume bombeado com o uso de um sistema idêntico ao montado no LABSOLAR. Esses valores são apresentados na Tabela 8 e Tabela 9 para Curitiba e Florianópolis respectivamente.

Mês	Irradiação máxima (kWh/m ² .dia)	Volume máximo (m ³)	Irradiação mínima (kWh/m ² .dia)	Volume mínimo (m ³)
Agosto	5,344	10,915	4,882	9,971
Setembro	4,814	9,832	4,338	8,860

Tabela 8 - Volumes diários estimados para Curitiba.

Mês	Irradiação máximo (kWh/m ² .dia)	Volume máximo (m ³)	Irradiação mínima (kWh/m ² .dia)	Volume mínimo (m ³)
Agosto	4,724	9,648	4,240	8,660
Setembro	4,204	8,586	3,834	7,831

Tabela 9 - Volumes diários estimados para Florianópolis.

Para uma comparação mais efetiva entre as duas localidades foram calculados os volumes mensais de água acumulada nas duas regiões, como demonstrado na Tabela 10 e Tabela 11

Mês	Volume mensal máximo (m ³)	Volume mensal mínimo (m ³)
Agosto	338,365	309,101
Setembro	294,96	265,8

Tabela 10 - Acumulado mensal em Curitiba

Mês	Volume mensal máximo (m³)	Volume mensal mínimo (m³)
Agosto	299,088	268,46
Setembro	257,58	234,93

Tabela 11 - Acumulado mensal em Florianópolis.

O acúmulo mensal de água em Curitiba mostrou-se maior em todas as comparações com Florianópolis. Essa diferença ocorre porque a irradiação de um dia típico em Curitiba é maior que em Florianópolis. Os valores de irradiação não estão ligados ao tipo da localidade, como litoral ou zona urbana, mas sim a latitude do local. Quanto mais próximo da linha do equador, menor será a latitude e consequentemente maiores serão os valores de irradiação ao longo do dia. Quanto maiores os valores de irradiação, maior será o valor da irradiação no dia.

Essa simulação conseguiu aplicar todos os fatores analisados nesse trabalho. Fica evidente que o uso adequado dessa metodologia facilita o cálculo de dimensionamento de um sistema de bombeado utilizando energia solar fotovoltaica. Além disso, também diminui as incertezas dos valores esperados para o projeto.

5. CONCLUSÕES

O sistema de bombeamento montado e analisado foi o de carga CC sem armazenamento. Durante a montagem, pode-se notar a simplicidade do sistema, já que alguns dos componentes são fáceis de serem adquiridos e instalados. As exceções são os módulos fotovoltaicos, e a bomba Solarjack, específica para esse tipo de função e instalação. Esses últimos componentes exigem um cuidado na montagem e instalação. A bomba Solarjack usada na montagem exige uma pequena automação, utilizando eletro bóias, para que o equipamento não corra o risco de operação sem água e possível dano. A bomba também se mostrou bastante sensível ao nível de incidência dos raios solares sobre os módulos fotovoltaicos. A passagem de nuvens sobre o sistema faz com que a bomba diminua o seu rendimento global. Na instalação dos módulos fotovoltaicos é importante a sua inclinação e posicionamento. Esses dois fatores têm uma grande influência no rendimento total do sistema como foi demonstrado em todo o trabalho. O ângulo de inclinação dos módulos é variável para cada região de aplicação. Com a inclinação sugerida de 15° a mais que a latitude local, os módulos estarão privilegiando a incidência de raios solares no inverno. Nesses meses o sol se encontra mais inclinado, levando assim a uma inclinação maior dos módulos fotovoltaicos. As medições realizadas ao longo dos meses de Agosto e Setembro foram importantes para a verificação da incidência solar.

Essas medições também foram importantes para a comparação com os valores históricos presentes no ATLAS solarimétrico. O mês de Agosto foi um mês atípico, pois ocorreram vários dias chuvosos e isso fez com que a irradiação média do mês fosse baixa. O mês de Setembro foi um mês normal. As comparações com os valores históricos demonstraram o erro percentual que pode ser aplicado a um cálculo de dimensionamento utilizando apenas os valores históricos para uma região. O dimensionamento através destes métodos torna-se bastante confiáveis, já que os percentuais de ajuste máximo e mínimo ($\pm 3,5\%$) que deverão ser contabilizados são viáveis para os cálculos de projetos.

Para a realização da conversão de irradiância do plano horizontal para o plano inclinado dos módulos fotovoltaicos, utilizou-se basicamente do *software* Radiasol. Esse se mostrou didático e de fácil utilização que torna mais simples o processo de dimensionamento de um sistema. Assim é possível a verificação da irradiação

presente para qualquer ângulo desejado e a realização das simulações para cada situação.

A equação de dimensionamento de um sistema de bombeamento apresentada mostrou-se confiável. O volume coletado para um dia limpo de Agosto foi de 14600 litros, sendo que o estimado através da Equação 9 foi 14723 litros. Dentre os fatores da Equação 9 que podem influenciar no rendimento total do sistema, os únicos que podem ser alterados no projeto são o índice de irradiação solar (HSP) e a altura manométrica total (AMT), já que o rendimento da motobomba não é variável. O índice de irradiação (HSP) pode ser otimizado com um estudo da inclinação de instalação dos módulos fotovoltaicas para a região de aplicação. A altura manométrica total (AMT) é composta por três fatores. Dentre esses fatores, o que se demonstra ser mais significativo é a perda de carga em pontos singulares (He). Essa perda de carga, para o sistema montado, foi de 23 metros, representando 58% da altura manométrica total de 39,6 metros. Essa perda de carga é justificada pela grande quantidade de curvas na tubulação do sistema.

Através das análises de resultados e comparações realizadas nesse trabalho, obteve-se parâmetros de referência para dimensionamento dos sistemas de bombeamento utilizando energia solar fotovoltaica. As equações de dimensionamento retiradas das literaturas, presentes nesse trabalho, mostraram-se satisfatórias desde que as mesmas considerações sejam aplicadas. Os fatores que devem ser considerados são as diferenças presentes entre o valor histórico de irradiação solar e o valor real na região aplicada. Para uma maior eficiência do sistema hidráulico, ficou evidente que deve-se minimizar a quantidade de curvas ao longo da tubulação. Quanto menor a quantidade de curvas, menor a perda de carga e maior será o volume bombeado ao longo do dia.

6. REFERÊNCIAS

ALONSO, Abella, M.; LORENZO, E.; CHENLO, F. **PV water pumping systems based on standard frequency converters**. Progress in photovoltaics: Research and Applications, v.11, p.179-191, fev. 2003.

ALVIM, Aymoré C. ; MARTINEZ, Carlos B.; SILVA, Selênio R.; **Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água**. In. Seminário de Divulgação do Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos (CPH) da UFMG.2002.

ANDRADE, Eduardo H. P.; BEZERRA, Luiz D. S.; ANTUNES, Fernando L. M.; Neto, Manuel R.B; **Sistema de bombeamento de água com energia solar fotovoltaica utilizando motor de indução trifásico**. In CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUIDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 7. 2008, Anais: Nº 63, Fortaleza.

ARGAW, Neway. **Renewable energy water pumping systems handbook**. Technical report, National Renewable Energy Laboratory. 2004

BRITO, Allan U.; FEDRIZZI, Maria C.; ZILLES, Roberto; **Bancada de ensaio para averiguação operacional de sistemas fotovoltaicos de bombeamento**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUIDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Anais: Nº 13, Campinas.

BRITO, A.U.; FEDRIZZI, M. C.; ZILLES, R. **Uso do conversor de frequência como dispositivo de condicionamento de potência em sistema fotovoltaico de bombeamento**, I Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, Ceará, 2007 b.

CABRAL, Claudia. V. T.; NETO, Lauro V. B. M.; FILHO, Dellly O.; DINIZ, Antônia S. A.C.; **Modelagem e simulação de gerador fotovoltaico**. . In CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUIDA E ENERGIA NO MEIO RURAL 5. 2004 , Campinas.

CARVALHO, Geraldo; **Máquinas Elétricas; Teoria e Ensaio**, 2 Edição, pp. 85-97, Junho, 2007.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA DE SALVO BRITO (CRESESB). **Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2004.

CENTRO DE REFERÊNCIA EM ENERGIA SOLAR (CRESESB). **Casa Solar Eficiente**. Disponível em <http://www.CRESESB.cepel.br>. Acesso em 5 de Maio de 2011.

COMISSIÓN EUROPEA DG XII; **Manual de energización Rural mediante energia fotovoltaica**, 1996

COSTA, Heitor S.; **Diagnóstico do estado de funcionamento de sistemas de bombeamento de água fotovoltaico (SBFV) instalada em Pernambuco**. In CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUIDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 6. 2006 Anais: Nº 50, Campinas.

CUADROS, F.; LOPEZ-RODRIGUEZ, F.; MARCOS, A.; e COELLO, J. . **A procedure to size solar-powered irrigation (photoirrigation) schemes**. Solar Energy, 76:465–473, 2004

CHUCO, Braulio; **Otimização da potência de operação em sistema isolado fotovoltaico usando técnicas de inteligência artificial**. Dissertação; Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2007

DEKA. **Photovoltaic Batteries**. Catálogo, 2011

FEDRIZZI, Maria. C. ; **Fornecimento de água com sistemas de bombeamento fotovoltaicos**. Dissertação de Mestrado; Universidade de São Paulo; São Paulo, 1997

FEDRIZZI, Maria. C. ; **Sistemas Fotovoltaicos de abastecimento de Água para uso Comunitário: Lições Aprendidas e Procedimentos para Potencializar a sua Difusão**. Tese de Doutorado; Universidade de São Paulo; São Paulo, 2003.

FEDRIZZI, Maria. C.;BRITO, Alaan U.; ZILLES, Roberto; **Procedimento para averiguação operacional de sistemas fotovoltaicos de bombeamento**; In CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUIDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 5. 2004 , Campinas.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen; **Máquinas Elétricas**; Com introdução à eletrônica de potência, Vol. 6, pp. 177-187, pp 343-369, Maio, 2006.

FRAIDENRAICH, Naum.; VILELA, Olga C. **Avanços em Sistemas de Abastecimento de Água com Bombeamento fotovoltaico para Comunidades Rurais**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 4, N°3, pp. 69-81, Jul./Set 1999.

GLASNOVIC, Z.; MARGETA, J.; **A model for optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping systems**. Solar Energy. 2007

GURGEL, B.F. **Proposição de uma metodologia para avaliação de inversores de frequência AM estação elevatórias de água. Estudo de casos no sistema de abastecimento de água de São José dos Campos**. 117p. Dissertação (Mestre em Engenharia) Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

HECKTHEUER, L. A.; **Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos**; Tese de Doutorado; Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Porto Alegre, 2001.

KLUMPNER, C.; NIELSEN P.; BLAABJERG F. **A New Matrix Converter Motor (MCM) for Industry Applications**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 49: 2,2002.

KRENZINGER, A.; BLAETH, Y. B.; WISBECK, J. O.; **Seguidor Dinâmico de Máxima Potência para Painéis Solares**; apresentado no XIV Congresso Brasileiro de Automática, pp. 985-990, 2002.

LEVA, Flávia F.; SALERNO, Carlos H.; CAMACHO, J.R.; GUIMARÃES, S.B; **Modelo de um projeto de um sistema fotovoltaico**; ; In CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 5.Trabalho N°42, Campinas, 2004.

MACINTYRE, A.J. ; **Bombas e Instalações de Bombeamento**, Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1997.

MATHEUS, H. **Curso completo sobre conversores de frequência**. P.33. 2006. Disponível em: <http://www.ejm.com.br/download/inversores.pdf>. Acesso em 30 mai 2011.

MEDEIROS, Carlos F. ; **Abastecimento de água**; Disponível em <<http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/Agua.html>>. Acesso em: 06 jun. 2011.

MELÉNDEZ, Teddy A. F.; **Avaliação de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento**. Dissertação do programa de pós Graduação em Energia. Universidade de São Paulo, 2009.

MERMOUD, A.; **Pumping sistem sizing and modeling tool**. In 19th European Photovoltaic solar energy conference and exhibition, Paris, 2004

MONACHESI, Marcelo G.; **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**; pp. 63-80, Junho, 2005.

MOREIRA, André P.; CARVALHO, Paulo C. M.; NETO, Manuel R. B.; Ramalho, Geraldo L. B.; Dias, Samuel V. **Identificação da curva de máxima potencia de módulos FV utilizando softwares de simulação**; In CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUIDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 7. 2008 Anais: N°91, Fortaleza.

MOREIRA, Carlos A. M. **Avaliação do Desempenho Hidro Energético de Sistemas Fotovoltaicos utilizados no Bombeamento de Água**; Dissertação de Mestrado; Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp. Botucatu, 2009

NOGUEIRA, CÍCERO U.; **Utilização de Sistema Solar e Eólico no Bombeamento de Agua para uso em Irrigação**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2009.

URBANETZ, Jair J.; **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbana: sua influência na qualidade da energia elétrico e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade**; Tese de Doutorado; Programa de Pós graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2010

RUTHER, Ricardo. **Edifícios Solares Fotovoltaicos**, UFSC, LABSOLAR Florianópolis, 2004.

SALAMEH, Z. M.; BOROWY, B. S.; AMIN, A. R. A.; **Photovoltaic Module-Site Matching Based on the Capacity Factors**; IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 2, pp. 326-332, June, 1995.

SHORT, T. D. e THOMPSON, P. **Breaking the mould: solar water pumping– the challenges and the reality**. Solar Energy, 2003.

SUNPUMPS; **Scs Series Brushless DC Submersible Pumps** <<http://www.sunpumps.com/UploadDocs/ProductDataSheet/0.5%20HP-SCS2-2801.pdf>>. Acesso em: 06 jun. 2011.

SUNPUMPS; **SDS Series DC Submersible Pumps** <<http://www.sunpumps.com/UploadDocs/ProductDataSheet/SDS-D-1280.pdf>> . Acesso em: 06 jun. 2011.

WEG. **Manual de inversor de frequência. Série CFW-10Plus**, software: V3.9X. São Paulo, Weg Automação, 2005, p.22.

ZILLES, Roberto; **Aplicações de energia solar fotovoltaica**; INSTITUTO DE ELETROTÉCNICA E ENERGIA; USP; SETEMBRO 2010.

ANEXOS

ANEXO A

Perda de Carga em tubulação de ferro											
*(coeficientes para outros materiais)											
Vazão litros/ hora	Diâmetro interior em mm.										
	19	26	32	38	50	63	75	89	100	125	150
Metros de altura manométrica para cada 100 metros de tubulação											
500	2,30										
1000	9,30	2,30	0,45								
2000	44,80	10,60	32,85	1,10							
3000		19,80	5,00	2,00	1,00	0,35					
4000		32,50	9,10	4,00	1,65	0,75	0,28				
5000			12,90	5,20	2,30	0,95	0,34				
6000			18,50	8,60	3,10	1,15	0,40				
7000			25,70	10,90	4,00	1,35	0,50	0,25			
8000			33,20	15,00	5,00	1,80	0,60	0,30			
9000				18,90	6,10	2,25	0,80	0,40			
10.000				25,00	8,50	2,80	1,15	0,50	0,25		
12.000				30,90	10,90	3,80	1,50	0,60	0,45		
15.000				47,00	16,20	6,00	2,35	0,75	0,65		
18.000					22,60	8,20	3,00	1,00	0,85	0,25	
20.000					28,80	10,00	4,00	1,40	0,95	0,30	
25.000					41,50	14,40	6,10	1,80	1,40	0,45	
30.000						20,60	8,35	2,40	2,10	0,60	0,30
35.000						27,85	11,40	3,20	2,90	0,95	0,40
40.000						36,90	14,50	4,20	3,60	1,15	0,45
45.000						40,60	18,30	5,60	4,50	1,45	0,55
50.000							21,90	6,90	5,40	1,85	0,80
60.000							30,50	9,60	7,60	2,55	1,05
70.000								12,10	9,80	3,25	1,40
80.000								16,30	12,40	4,00	1,80
90.000								20,00	16,20	5,45	2,20
100.000									19,90	6,65	2,70
125.000										9,10	3,75
150.000										13,65	5,65
175.000											88,10

*Fator a aplicar para outros materiais: Aço=0,75 / Amianto=0,60 / P.V.C.=0,50

Anexo A - Perda de carga em tubulação.

Fonte: (Fedrizzi, 1997)

ANEXO B

Conexões	<i>K</i>
Válvula esférica (totalmente aberta)	10,00
Válvula angular (totalmente aberta)	5,00
Válvula de retenção (totalmente aberta)	2,50
Válvula gaveta (totalmente aberta)	0,19
Curva de raio curto	2,20
Tê comum	1,80
Cotovelo comum	0,90
Cotovelo de raio médio	0,75
Cotovelo de raio longo	0,60

Anexo B - Coeficiente de perdas em pontos singulares.

Fonte: (Fedrizzi,1997)

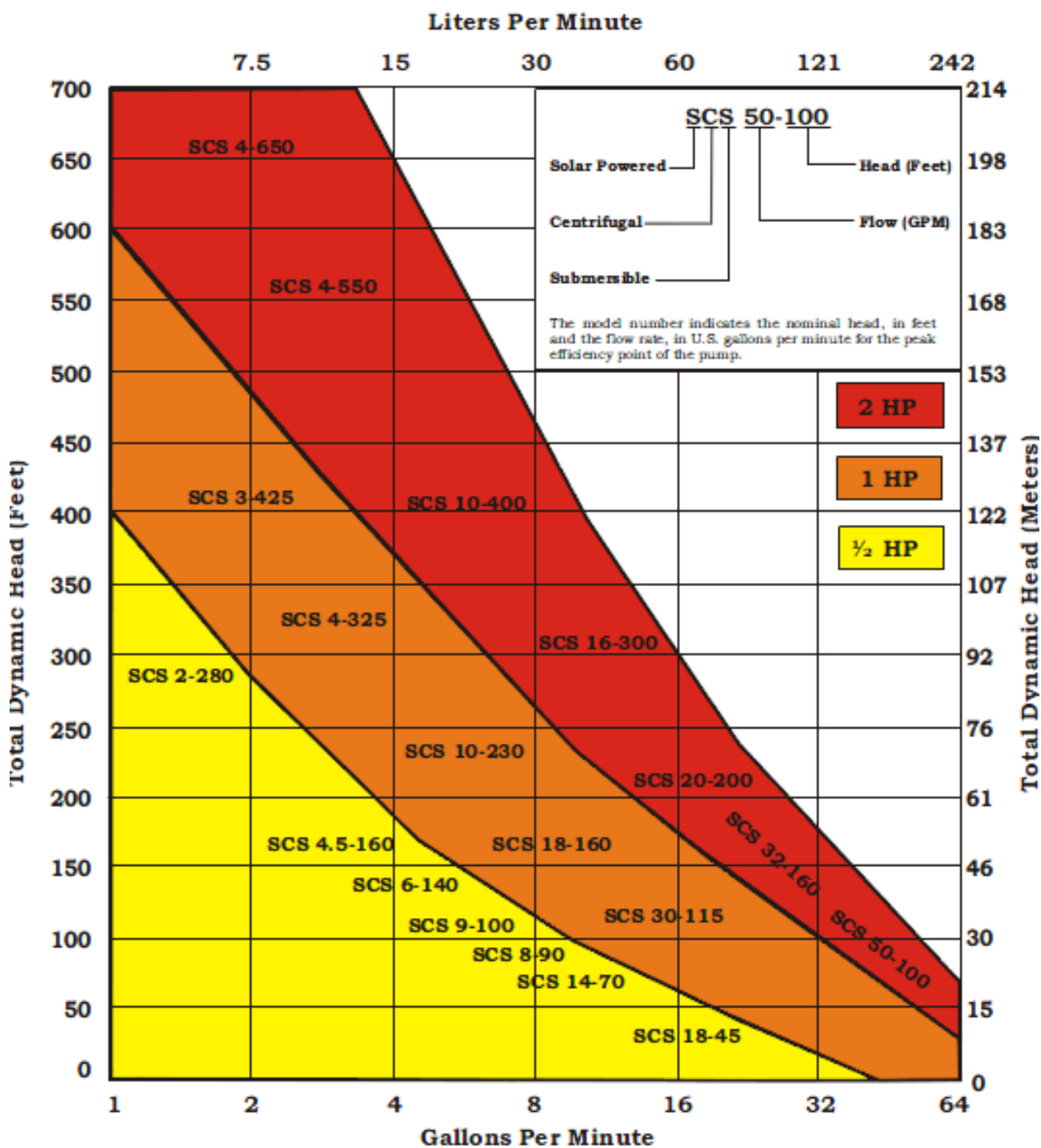
ANEXO C**Rendimentos hidráulicos aproximados das bombas centrífugas**

Q (l/s)	5,0	7,5	10	15	20	25	30	40	50	80	100	200
η_b (%)	55	61	64	68	72	76	80	83	85	86	87	88

Anexo C - Eficiência Global de bombas centrífugas.

Fonte: (Medeiros, 2011)

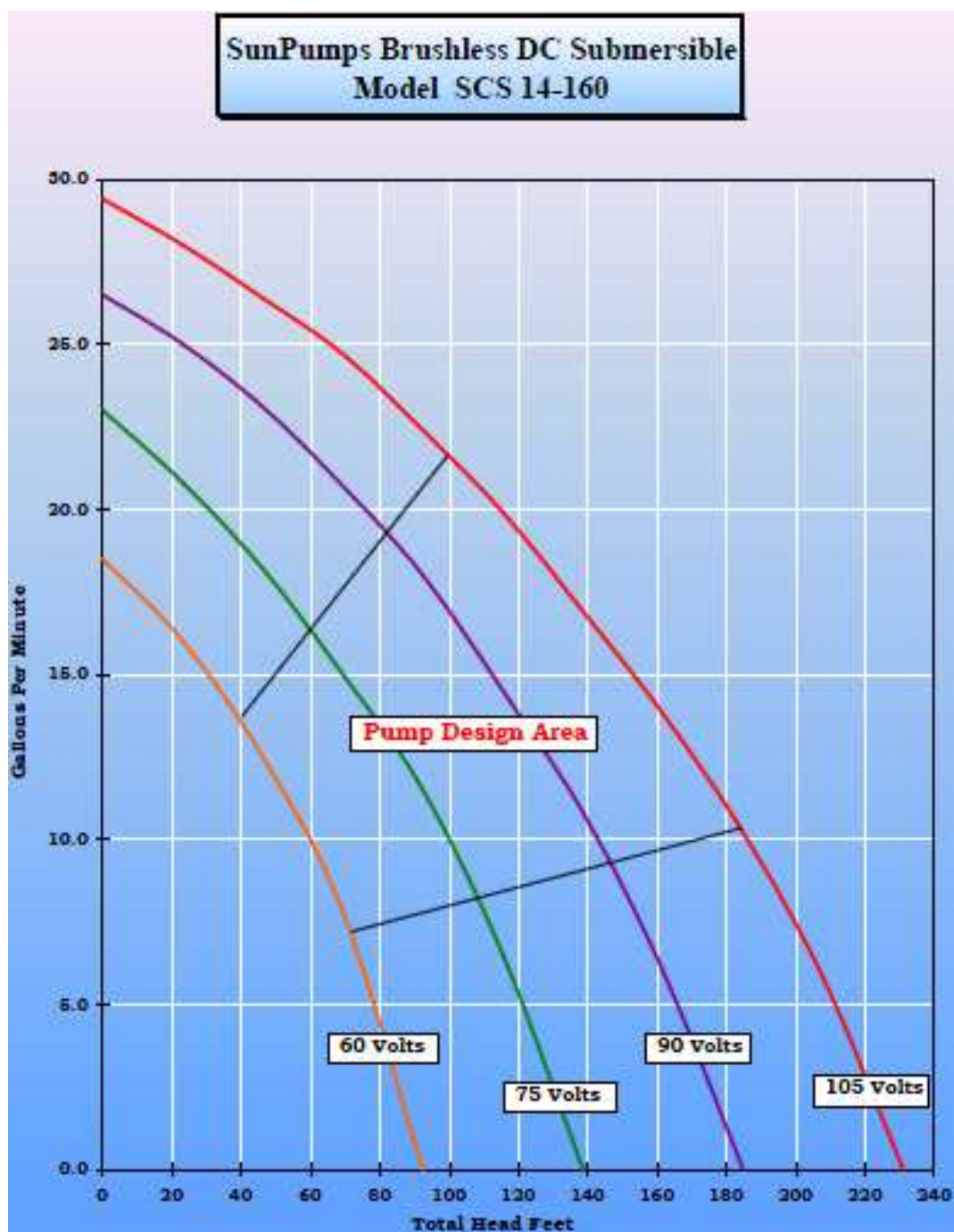
ANEXO D



Anexo D - Diagrama de modelos de bombas.

Fonte: (SunPumps,2011)

ANEXO E



Anexo E - Diagrama de operação da bomba.

Fonte: (SunPumps, 2011)

ANEXO F

Pump Model	SCS-3-425	SCS-4-325	SCS-6-185	SCS-10-185	SCS-10-230	SCS-11-210	SCS-14-160	SCS-18-160	SCS-27-90	SCS-30-115	SCS-80-42
Pump Dimensions											
Horse Power	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Diameter (Inches)	3.9"	3.9"	3.9"	3.9"	3.9"	3.9"	3.9"	3.9"	3.9"	3.9"	3.9"
Length (Inches)	32.5	25.6	24.3	24	29	24	27.5	25.6	25.2	27.6	27
Weight (Lbs)	32	28	26	27	29	26	28	26	28	33	45
Shipping Dims.											
Width	4"	4"	4"	4"	4"	4"	4"	4"	4"	4"	4"
Length	36"	36"	36"	36"	36"	36"	36"	36"	36"	36"	36"
Height	4"	4"	4"	4"	4"	4"	4"	4"	4"	4"	4"
Weight	25	31	29	30	32	29	31	30	31	36	48
Pump Specs											
Discharge Size	1 1/4" NPT	1 1/4" NPT	1 1/4" NPT	1 1/4" NPT	1 1/4" NPT	1 1/4" NPT	1 1/4" NPT	1 1/4" NPT	2" NPT	2" NPT	2 1/2" NPT
Voltage Range (DC)	60-105	60-120	60-120	60-105	60-105	60-120	60-105	60-120	60-120	60-120	105-135
Max Current (A)	8.8	8.7	6.1	8.6	9.5	9	9.1	9.5	8.4	10	9.2
Max Power (W)	924	1044	732	903	998	1080	955	1140	1008	1200	1553
Flow Range (GPM)	2 - 5	3 - 5.5	4 - 8	6 - 14	6 - 14	8 - 16	10 - 22	11 - 25	18 - 38	18 - 40	40 - 100

Anexo F - Especificação das bombas.

Fonte: (SunPumps, 2011)