

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

USP

Programa de Pós-Graduação em Energia

PPGE

(EP / FEA / IEE / IF)

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE
BOMBEAMENTO**

Teddy Arturo Flores Meléndez

São Paulo

2009

TEDDY ARTURO FLORES MELÉNDEZ

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE
BOMBEAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Escola Politécnica / Faculdade de Economia e Administração / Instituto de Eletrotécnica e Energia / Instituto de Física) para a obtenção do Título de Mestre em Energia.

Orientador: Prof. Dr. **Roberto Zilles**

São Paulo

2009

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

MeléndeZ, Teddy Arturo Flores

Avaliação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento / Teddy Arturo Flores Meléndez; Orientador Roberto Zilles. – São Paulo, 2009.
86p.: Il.; 29,7cm.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo.

1. Sistemas fotovoltaicos de bombeamento 2. Avaliação econômica 3. Conversores de frequência 4. Motobomba.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA
EP – FEA – IEE - IF

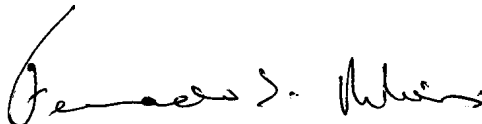
TEDDY ARTURO FLORES MELÉNDEZ

“Avaliação de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento”

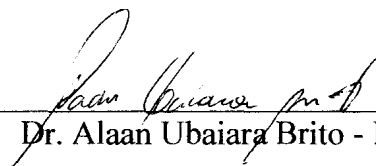
Dissertação defendida e aprovada em 22/04/2009 pela Comissão Julgadora:



Prof. Dr. Roberto Zilles – PPGE/USP
Orientador e Presidente da Comissão Julgadora



Prof. Dr. Fernando Selles Ribeiro – EP/USP



Dr. Alaán Ubaiara Brito - ELETRONORTE

DEDICATÓRIA

Dedicado a meus pais, Pedro e Rosa, pelos sábios conselhos outorgados à minha formação, a quem sempre serei grato. A minhas tias Julia, Adela, Eugenia, Tomasa e Lucia, que sempre acreditaram em mim e com seu esforço colaboraram na minha educação. A meus queridos irmãos Artémio, Angel e Ana, que colaboraram com seu apoio moral. Finalmente, a todas aquelas pessoas envolvidas com o desenvolvimento das energias renováveis e alternativas, pois, graças ao seu otimismo, espera-se no futuro um mundo sustentável. A Deus, por ser fonte divina de inspiração e ajuda espiritual.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Roberto Zilles e à Dra. M. Cristina Fedrizzi, pela orientação e apoio no desenvolvimento da presente dissertação. Eles me ofereceram toda a informação disponível sobre sistemas fotovoltaicos de bombeamento, ensinaram-me a operar a bancada de ensaios de motobombas e ajudaram-me na elaboração de artigos apresentados em congressos. Ao mestre André Moscelin, pelos conselhos e apoio oferecidos no Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos. À CAPES e à FINEP, pelo apoio financeiro oferecido para o desenvolvimento da pesquisa. A meus amigos Wilson, Alaan, Norman, Lenin, Henry, Adelaida, Vanesa, Julieta, Adriana, Wilbert, Margot, Marleny e muitos outros que me apoiaram incondicionalmente.

RESUMO

A presente dissertação aborda a avaliação de três sistemas fotovoltaicos de bombeamento, que compreendem duas configurações com equipamentos dedicados à tecnologia fotovoltaica e um com equipamentos alternativos com potências entre 0,75 CV e 1,0 CV. Os resultados mostram que a configuração alternativa apresenta menor eficiência diária do sistema motobomba. A avaliação econômica revela a competitividade da configuração alternativa frente aos sistemas importados dedicados à tecnologia fotovoltaica. Alia-se a isso a disponibilidade dos equipamentos de condicionamento de potência e a facilidade de reposição. Verificou-se também que a configuração alternativa, conversor de frequência WEG CFW08 e motobomba SOMAR de 1,0 CV e 8 estágios, trabalha com eficiência diária próxima aos 30% na faixa de operação de 20 a 40 metros de coluna d'água. Portanto, com uma adequada escolha da motobomba para a configuração alternativa, podem-se obter desempenhos semelhantes aos obtidos com sistemas importados dedicados à tecnologia fotovoltaica. Para 30 metros, a configuração alternativa bombeou somente 1% a menos do que o sistema Grundfos. O custo do volume bombeado para 30m de altura manométrica total do sistema alternativo é 22% menor do que o sistema Grundfos e 51% mais econômico do que o sistema Solarjack (Sun Pumps).

ABSTRACT

The present dissertation shows the evaluation of three Photovoltaic Pumping Systems, which involves two configurations: the equipment dedicated to the photovoltaic technology and the alternative equipment with nominal powers between 0.75 CV and 1.0 CV. The results show that the alternative configuration attained minor daily efficiency of the motopump system. The economic evaluation reveals the competitiveness of the alternative configuration in comparison with imported photovoltaic technology dedicated systems. It also should be considered the availability of equipment for power conditioning and the facility of replacement. It was also verified that the alternative configuration, variable speed drive WEG CFW08 and 1.0 CV SOMAR motor pump with 8 stages, works with daily efficiency near 30% in the 20 to 40 meters operation range. Therefore, with an adequate choice of the motor pump for the alternative configuration, performances similar to the imported photovoltaic technology dedicated systems can be obtained. For 30 meters, the alternative configuration pumped only 1% less than the Grundfos system. The cost of pumped volume for 30 meters of manometer total height of the alternative system is 22% cheaper than the system Grundfos and 51% cheaper than the system Solarjack (Sun Pumps).

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO	4
1.1 Descrição de um sistema fotovoltaico de bombeamento	6
1.1.1 Tanque de armazenamento	8
1.1.2 Gerador fotovoltaico.....	8
1.1.3 Grupo motobomba	9
1.1.3.1 Bombas	10
1.1.3.2 Curva-característica de bombas centrífugas multiestágios.....	11
1.1.3.3 Motor elétrico.....	12
1.1.4 Equipamentos de condicionamento de potência	13
1.1.4.1 Acoplamento direto	14
1.1.4.2 Booster.....	14
1.1.4.3 Conversor CC / CC.....	14
1.1.4.4 Conversor CC / CC com seguidor de ponto de máxima potência.....	15
1.1.4.5 Inversor CC / CA.....	15
1.1.4.6 Conversor de frequência CC / CA.....	15
1.2 Recurso solar.....	17
2 PROCEDIMENTOS DE CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO	19
2.1 Parâmetros de referência	19
2.2 Seleção dos dispositivos do sistema fotovoltaico de bombeamento.....	20
2.2.1 Características do sistema alternativo	21
2.2.2 Características dos sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica	22
2.3 Caracterização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento.....	24
2.4 Instrumentação utilizada para os testes das motobombas	26
3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO	30
3.1 Avaliação dos sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica	30
3.1.1 Resultados experimentais dos sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica.....	31
3.1.2 Curvas de irradiância e vazão dos sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica.....	32
3.1.3 Curvas de eficiência e vazão dos sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica	34

3.2 Avaliação do sistema alternativo (equipamentos nacionais).....	37
3.2.1 Resultados experimentais do sistema alternativo.....	38
3.2.2 Curvas de irradiância e vazão do sistema alternativo	39
3.2.3 Curvas de eficiência e vazão do sistema alternativo	40
3.3 Comparações dos resultados obtidos dos três sistemas (Alternativo, Grundfos e Solarjack).....	42
4 AVALIAÇÃO ECONÔMICA E FINANCEIRA.....	45
4.1 Figuras-de-mérito.....	46
4.1.1 Ciclo do custo de vida (CCV).....	46
4.1.2 Custo do ciclo de vida anualizado (CCVA)	47
4.1.3 Custo do volume bombeado (CVB).....	47
4.1.4 Custo do volume específico bombeado (CVEB).....	48
4.2 Avaliação econômica	48
4.2.1 Figuras-de-mérito da análise econômico-financeira para um ciclo de vida de 25 anos.	53
4.2.2 Figuras-de-mérito da análise econômico-financeira para um ciclo de vida de 30 anos.	56
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
ANEXO A.....	67
ANEXO B.....	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1: Níveis de seleção do tipo de Bomba para diferentes alturas e vazões	5
Figura 1. 2: Configurações mais utilizadas dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento	7
Figura 1. 3: Exemplo de um sistema fotovoltaico de bombeamento.....	7
Figura 1. 4: Conjunto motobomba e motobombas mais utilizadas	10
Figura 1. 5: Classificação geral de bombas	11
Figura 1. 6: Exemplo de curva-característica de motobomba convencional.....	12
Figura 1. 7: Classificação de motores elétricos	13
Figura 1. 8: Configuração de um sistema alternativo de bombeamento	14
Figura 1. 9: Diagrama de blocos de um conversor de frequência	16
Figura 1. 10: Exemplo de índices de irradiância que atingem quantidades maiores do que 1.000 W/m ²	18
Figura 2. 1: Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água	26
Figura 2. 2: Diagrama esquemático da bancada de ensaios	27
Figura 2. 3: Foto da bancada de ensaios	28
Figura 3. 1: Curvas de irradiância e vazão ao longo de um dia de bombeamento (Grundfos e Solarjack).....	33
Figura 3. 2: Curvas da eficiência em função da potência do gerador fotovoltaico, sistema Grundfos.....	35
Figura 3. 3: Curvas da eficiência em função da potência do gerador fotovoltaico, sistema Solarjack.....	35
Figura 3. 4: Curvas de vazão em função da potência do gerador fotovoltaico, sistema Grundfos.....	36
Figura 3. 5: Curvas de vazão em função da potência do gerador fotovoltaico, sistema Solarjack.....	37
Figura 3. 6: Curvas de irradiância e vazão ao longo de um dia de bombeamento, sistema alternativo.....	40
Figura 3. 7: Curvas da eficiência em função da potência do gerador fotovoltaico, sistema alternativo.....	41
Figura 3. 8: Curvas da vazão em função da potência do gerador fotovoltaico, sistema alternativo.....	42

Figura 4. 1: Análise econômica do custo de ciclo de vida de um sistema de bombeamento fotovoltaico versus um sistema a Diesel	46
Figura 4. 2: Custo do volume bombeado em função das diferentes taxas de desconto, exemplo para 30 m de AMT e ciclo de vida de 25 anos	49
Figura 4. 3: Custo do volume bombeado, ciclo de vida, 25anos, para 30 m, 40 m e 50 m de AMT.....	55
Figura 4. 4: Custo do volume específico bombeado, ciclo de vida, 25 anos, para 30 m, 40 m e 50 m de AMT	56
Figura 4. 5: Custo do volume bombeado, ciclo de vida 30 anos, para 30 m, 40 m e 50 m de AMT.....	58
Figura 4. 6: Custo do volume específico bombeado, ciclo de vida 30 anos, para 30 m, 40 m e 50 m de AMT	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1: Características dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento selecionados	21
Tabela 2. 2: Vazão da motobomba para condições nominais de operação	21
Tabela 2. 3: Características do conversor de frequência da WEG	22
Tabela 2. 4: Características do inversor modelo Solartronic SA 1500	23
Tabela 2. 5.: Características do controlador modelo PCB – 180C	24
Tabela 2. 6: Características dos equipamentos de aquisição de dados	29
Tabela 3. 1: Resultados experimentais sistemas GRUNDFOS e SOLARJACK	32
Tabela 3. 2: Resultados experimentais do sistema Alternativo	39
Tabela 3. 3: Resultados experimentais das motobombas SOMAR, GRUNDFOS e SOLAJARCK	44
Tabela 4. 1: Preços dos equipamentos no mercado brasileiro e custo do investimento inicial de cada sistema	53
Tabela 4. 2: Figuras-de-mérito da análise econômico-financeira, taxa de desconto 12% a.a. e 25 anos	54
Tabela 4. 3: Figuras-de-mérito da análise econômico-financeira, taxa de desconto 12% a.a. e 30 anos	57
Tabela B. 1: Figuras-de-mérito da análise econômico-financeira, para 30 m de altura manométrica e 25 anos de ciclo de vida	69
Tabela B. 2: Figuras-de-mérito da análise econômico-financeira, para 30 m de altura manométrica e 30 anos de ciclo de vida	70
Tabela B. 3: Figuras-de-mérito da análise econômico-financeira, para 40 m de altura manométrica e 25 anos de ciclo de vida	71
Tabela B. 4: Figuras-de-mérito da análise econômico-financeira, para 40 m de altura manométrica e 30 anos de ciclo de vida	72
Tabela B. 5: Figuras-de-mérito da análise econômico-financeira, para 50 m de altura manométrica e 25 anos de ciclo de vida	73
Tabela B. 6: Figuras-de-mérito da análise econômico-financeira, para 50 m de altura manométrica e 30 anos de ciclo de vida	74

INTRODUÇÃO

Atualmente, cerca de 2 a 3 bilhões de pessoas no mundo todo estão sem luz elétrica e outras comodidades do mundo urbano, sendo que esta situação não mudará até o ano 2030, por causa principalmente do crescimento continuado da população (HOFFMANN, 2006). Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), em torno de 1,1 bilhão de pessoas (um sexto da população mundial) não têm acesso a água potável (84% delas moram na zona rural) e 2,6 bilhões vivem sem saneamento básico (OMS, 2007). No Brasil, a cobertura urbana é de 96% para água encanada e 83% para o saneamento básico (84% da população); sendo que a cobertura em áreas rurais é bem inferior, atingindo 57% para água e 37% para saneamento básico (16% da população) (WHO; UNICEF, 2006). Esses números fazem com que a tecnologia fotovoltaica torne-se atrativa para ser utilizada em sistemas de bombeamento no âmbito rural.

As primeiras aplicações em escala comercial dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento datam do final da década de 1970 e apresentam como suas principais aplicações o fornecimento de água às comunidades rurais remotas. Sua utilização foi disseminada no mundo todo, sobretudo nos países em desenvolvimento, e atualmente possui uma tecnologia consolidada com mais de três décadas de experiência acumulada. Contudo, a Associação da Indústria Fotovoltaica Européia (EPIA, na sigla em inglês) prevê um incremento de 150 mil sistemas até o ano de 2010 (EPIA, 1996).

Apesar desses números, o custo do investimento inicial da tecnologia de sistemas fotovoltaicos ainda é alto. Contudo, esta encontra competitividade quando calculados e comparados os fluxos de caixa ao longo da vida-útil dos projetos com distintas opções tecnológicas, tais como os sistemas a Diesel e a gasolina (POSORSKI, 1996; FEDRIZZI, 1997; COTA ESPERICUETA et al., 2004; LORENZO, 2005). A competitividade aumenta à medida que aumenta a distância entre a rede elétrica e a localidade a ser atendida.

Atualmente, existem instalados no Brasil muitos sistemas fotovoltaicos de bombeamento. As primeiras instalações destes sistemas datam de 1981, em sua maioria fruto de iniciativas isoladas. O Programa para o Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM), programa de maior expressão em âmbito nacional, foi responsável pela instalação de 2.485 unidades de bombeamento no período de 1994 a 2002; mais 806

unidades de bombeamento foram instaladas pelas entidades privadas, ONGs, e iniciativas de alguns governos estaduais e municipais. Portanto, são 3.291 unidades de bombeamento instaladas, o que corresponde a um total de 1.590,7 quilowatt-pico (kWp)¹ de potência instalada para este uso final, e ainda com grande potencial de expansão. Após décadas de evolução, a tecnologia de bombeamento fotovoltaico está tecnicamente consolidada para o abastecimento de água em localidades remotas (FEDRIZZI, 2003).

No entanto, este tipo de aplicação tem adquirido certo descrédito, pois, apesar de ser eficiente, confiável e economicamente competitiva, constata-se que muitos dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento ficam inoperantes muito antes do esperado, 25 anos (vida-útil de módulo). Este fato se deve em muitas ocasiões às falhas ou defeitos que ocorrem no dispositivo de condicionamento de potência e na motobomba, geralmente compostos por dispositivos dedicados à tecnologia fotovoltaica, situação que dificulta a troca ou manutenção desses dispositivos. Isso foi demonstrado em diferentes avaliações de sistemas fotovoltaicos de bombeamento localizados em comunidades remotas (ZILLES et al., 1999; KAUNMUANG et al., 2001; BEZERRA, 2002; FEDRIZZI, 2003; COTA ESPERICUETA et al., 2004). De certa forma, essas situações refletem a realidade de inúmeros projetos no Brasil, os quais não conseguem manter a qualidade técnica na manutenção e reposição de equipamentos, embora a vida-útil do módulo seja de 25 a 30 anos.

Uma saída para esses problemas é a utilização de conversores de frequência² de uso industrial, como unidade de condicionamento de potência para a operação de motores de indução trifásicos, mais bomba centrífuga de vários estágios (ALONSO ABELLA, 2003). A operação e as vantagens desse tipo de configuração foram estudadas por Brito (2006) e, embora esse sistema já seja empregado e comercializado em outros países, no Brasil começa agora a ser utilizado em aplicações fotovoltaicas.

Para assegurar a qualidade técnica dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento, existem procedimentos de caracterização mediante testes simplificados em bancada de ensaios; tais procedimentos podem ser encontrados em Fedrizzi (2003; 2007) e em Narvarte et. al. (2006).

¹ A unidade Wp (Watt pico) é utilizada para definir a potência nominal de uma célula fotovoltaica. Está potência está disponível quando a célula é exposta a uma condição padrão de irradiância solar de 1.000 W/m² a uma temperatura de 25°C.

² O conversor de frequência, também conhecido no mercado como Inversor de frequência ou no inglês como: variable-frequency drive (VFD); adjustable-frequency drives (AFD); variable-speed drives (VSD).

Por outro lado, no Brasil existe um mercado bem consolidado no que concerne à comercialização de conversores de frequência de uso industrial e motobombas (convencionais) submersíveis de vários estágios (BRITO; ZILLES, 2004). Mas esses dispositivos ainda têm uma aplicação tímida em sistemas fotovoltaicos de bombeamento, pois os existentes estão em fase experimental; tal é o caso do sistema instalado no assentamento agrícola (Palu) localizado no município de Presidente Bernardes, SP; mais detalhes podem ser encontrados em Brito et. al. (2007 b).

Com o objetivo de continuar com as pesquisas em sistemas fotovoltaicos de bombeamento, o laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo desenvolveu uma bancada de ensaios para testar o conjunto de condicionamento de potência mais motobomba submersível (centrífuga ou de deslocamento positivo). Essa bancada permite avaliar sistemas importados dedicados à tecnologia fotovoltaica, assim como os sistemas alternativos. A bancada simula poços de até 100 metros de altura manométrica total, e seus dispositivos de aquisição de dados medem os parâmetros de irradiância, tensão CC, corrente CC, e vazão. Os resultados obtidos na bancada de ensaios possibilitam a elaboração de ábacos que facilitam o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento (BRITO; ZILLES, 2006; FEDRIZZI, 2007).

Como existem lacunas para a difusão e conhecimento dos sistemas alternativos, o objetivo da presente dissertação é avaliar o desempenho de dois sistemas fotovoltaicos de bombeamento que empregam equipamentos dedicados à tecnologia fotovoltaica e de um sistema fotovoltaico de bombeamento que utiliza uma configuração alternativa: conversor de frequência mais motobomba centrífuga multiestágios de fabricação nacional.

O conteúdo da dissertação se divide em quatro capítulos, mais as conclusões e recomendações. No Capítulo 1, é feita uma descrição teórica dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento, dos componentes do subsistema fotovoltaico e do recurso solar; o Capítulo 2 é dedicado aos procedimentos de caracterização dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento, que envolvem parâmetros como a demanda diária de água, disponibilidade do recurso solar e altura manométrica total, assim como a seleção dos dispositivos do subsistema fotovoltaico; no Capítulo 3, são apresentados os resultados da avaliação de desempenho dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento (sistema alternativo e sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica); o Capítulo 4 apresenta uma avaliação econômica e financeira dos sistemas. Finalmente, são apresentadas as conclusões e recomendações.

CAPÍTULO 1

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO

Muitas propriedades e comunidades rurais do Brasil, principalmente das regiões norte e nordeste, não são atendidas com energia elétrica, pois estão distantes das redes de distribuição de eletricidade. Uma das formas de garantir o suprimento de energia elétrica nessas propriedades ou comunidades rurais isoladas é a implantação de sistemas energéticos baseados em fontes alternativas de energia. Entre elas, a energia solar fotovoltaica é uma das possibilidades, podendo ser utilizada para bombeamento de água.

A tecnologia fotovoltaica apresenta vantagens em vários aspectos, em primeiro lugar pelo fato de que o recurso solar ocorre, com mais ou menos abundância, em todo o globo terrestre, sendo sua utilização uma questão solucionável por meio de dimensionamento. Outra importante vantagem é evitar gastos permanentes na aquisição e transporte de combustível, bem como a emissão de gases poluentes e de ruído na geração. Além disso, conta positivamente com uma tecnologia consolidada, de alta confiabilidade e com uma vida-útil do gerador de mais de 25 anos. Contudo, o alto custo de investimento inicial ainda é uma grande barreira a ser superada, por causa principalmente da falta de incentivos para a produção e aquisição dos equipamentos.

Em aplicações de bombeamento de água, diversos tipos de bombas podem ser usados, podendo ser selecionados de acordo com o tipo de projeto (bombas centrífugas ou de deslocamento positivo), ser de localização superficial ou submersa e possuir motor em corrente alternada ou contínua. Geralmente, as bombas centrífugas são preferidas para poços profundos tubulares (bomba multiestágios) e grandes volumes de água. Por outro lado, as bombas de deslocamento estão limitadas a baixos volumes e grandes alturas. As bombas de deslocamento positivo (por exemplo, bombas de diafragma, êmbolo e/ou helicoidal) são menos acessíveis do que as bombas centrífugas e geralmente são sensíveis ao lodo ou areia presentes na água. Na figura 1.1 – adaptada de Barlow (1993) – são apresentados os diversos níveis de seleção das bombas, que sugerem possíveis escolhas da bomba em função da altura total e da exigência diária de água.

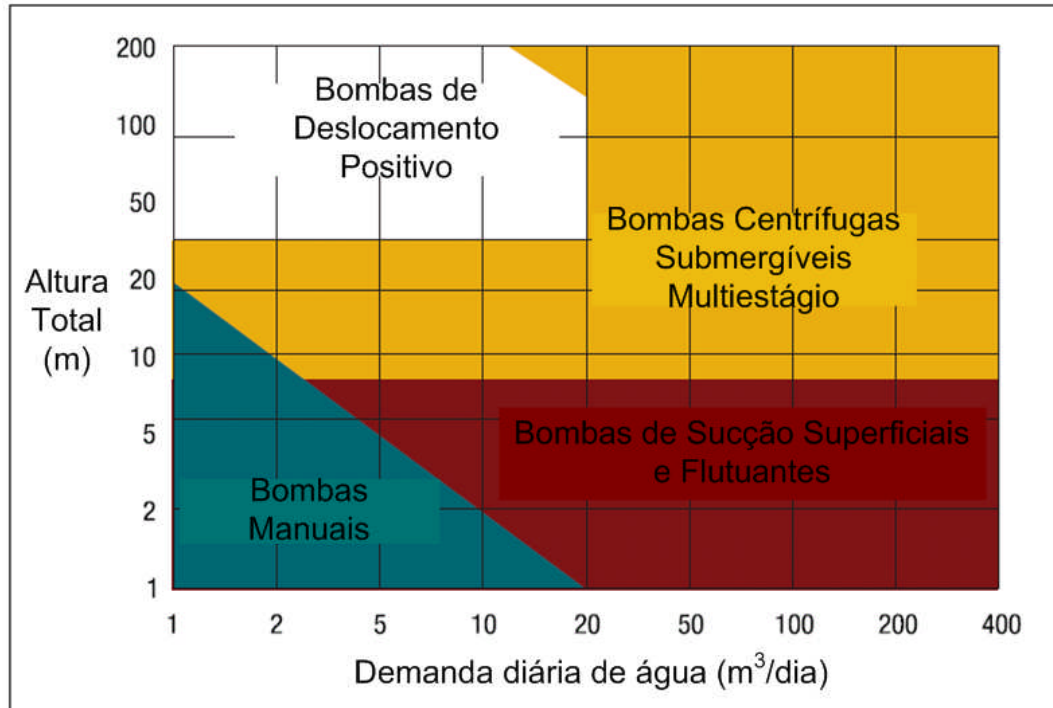


Figura 1. 1: Níveis de seleção do tipo de Bomba para diferentes alturas e vazões

Fonte: Adaptado de Barlow (1993)

Na prática, podem-se distinguir três tipos de sistemas de bombeamento fotovoltaico:

a) Sistemas de baixa potência (50 até 400 Wp), que utilizam principalmente um motor em corrente contínua acionando uma bomba de deslocamento positivo com diafragma. Entre o gerador fotovoltaico e o motor se instala um conversor (corrente contínua/corrente contínua) para otimizar seu acoplamento. Exemplos desse tipo são os sistemas Solarjack SDS ou Shurflo 9300.

b) Sistemas de media potência (400 até 1.500 Wp), que compreendem duas configurações diferentes: uma bomba centrífuga submersa multiestágios com motor assíncrono acionado por um inversor de frequência variável (sistemas Grundfos com condicionamento de potência tipo SA400 e SA1500); e os formados por um motor de corrente contínua sem escovas (nesta faixa de potências podem ter um rendimento maior do que os motores trifásicos de indução convencionais e muito superior aos motores de indução monofásicos) operando uma bomba de deslocamento positivo helicoidal (sistemas como: Monopumps – Austrália, Total Energie – França, ou Solenersa – Espanha). O motor em corrente contínua sem escovas é comandado por um dispositivo de condicionamento de potência externo utilizado na comutação

eletrônica do motor, assim como, para a manutenção do ponto de máxima potência. Enquanto que a utilização de motores de corrente alternada é habitual, os motores em corrente contínua sem escovas são utilizados por causa de seu maior rendimento, inclusive com bombas centrífugas, como é o caso do modelo Solarjack SCS.

e) O terceiro tipo de sistemas fotovoltaicos de bombeamento baseia-se na utilização de conversor de frequência mais motobomba centrífuga multiestágios ou de deslocamento positivo (ambos de utilização industrial). Essa alternativa supera os 1.600 Wp (máxima potência atingida pelos sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica), tornando-se uma solução viável, eficiente e econômica (BRITO, 2006; ALONSO ABELLA, 2003).

Nas subseções seguintes deste capítulo são resumidos os aspectos teóricos dos componentes de um sistema fotovoltaico de bombeamento, assim como do subsistema dedicado e alternativo.

1.1 Descrição de um sistema fotovoltaico de bombeamento

A evolução dos equipamentos de bombeamento fotovoltaico passou de um sistema no qual a bomba se encontrava submersa e o motor e os demais componentes de condicionamento de potência localizavam-se na superfície, acoplados por um eixo, para um sistema compacto em que todo o mecanismo se encontra submerso ou flutuante, tendo como configurações mais utilizadas as apresentadas na figura 1.2; sendo as linhas em azul escuro as de maior ocorrência e, em verde claro, as menos frequentes (FEDRIZZI, 2003).

As motobombas em corrente alternada são as mais utilizadas atualmente, pelo fato de serem mais robustas, comerciais e apresentarem ciclo de vida mais longo. No entanto, uma das desvantagens frente às motobombas em corrente contínua é que são menos eficientes, por apresentarem perdas no inversor de potência; isso será visto com mais detalhes no capítulo 3, onde são apresentados os testes realizados.

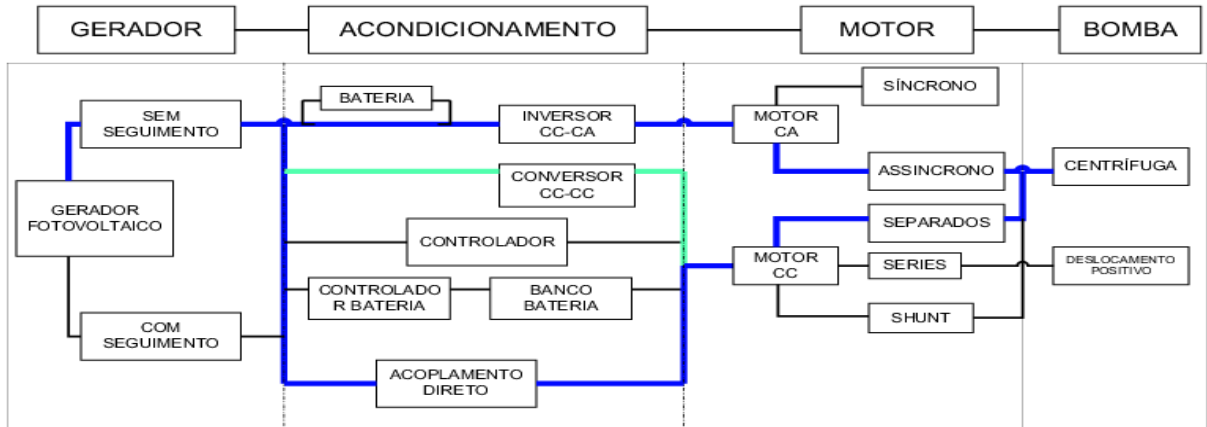


Figura 1. 2: Configurações mais utilizadas dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento

Fonte: Fedrizzi, 2003

Na figura 1.3, é apresentada a configuração de um sistema fotovoltaico de bombeamento com seus componentes principais, na qual o conjunto motobomba fica submerso e o sistema de condicionamento de potência, na superfície, junto com o arranjo fotovoltaico. Também conta com equipamentos adicionais, tais como disjuntores, relés e cabos.

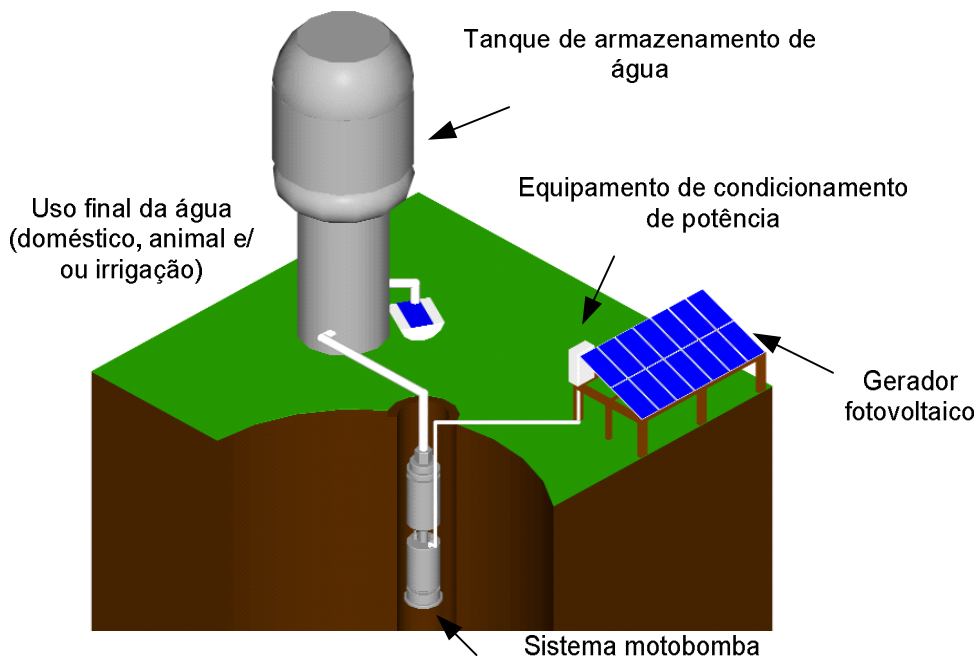


Figura 1. 3: Exemplo de um sistema fotovoltaico de bombeamento

O atual estado-da-arte dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água é dominado pelas bombas centrífugas e sistemas de condicionamento de potência dedicados à

tecnologia fotovoltaica (ALONSO ABELLA, 2003). Esse fato nos conduz ao mercado, que atualmente é controlado por alguns fabricantes com recursos para o desenvolvimento contínuo dessa tecnologia. Por outro lado, em alguns países, para aliviar essa situação, utilizam-se motobombas centrífugas multiestágios acopladas a conversores de frequência.

No Brasil, a inserção desta alternativa tecnológica está começando a difundir-se timidamente, já que, para consolidar-se, esta precisa de laboratórios que possuam bancadas de ensaios, cuja infraestrutura permita dimensionar o arranjo fotovoltaico, assim como avaliar o desempenho dos diferentes tipos de motobombas e condicionadores de potência. Nesse sentido, no laboratório de sistemas fotovoltaicos, foi desenvolvida uma bancada de testes para motobombas (centrífugas multiestágios ou de deslocamento positivo) e sistemas de condicionamento de potência, com a finalidade de avaliar experimentalmente a confiabilidade do sistema e o comportamento técnico dos equipamentos.

1.1.1 Tanque de armazenamento

Pelo fato de os sistemas fotovoltaicos de bombeamento só fornecerem água durante as horas de irradiação solar, é necessário que o sistema conte com um tanque de armazenamento de água. Armazenar água em tanques é muito mais econômico do que armazenar energia em baterias, em virtude de que depois de quatro anos ou menos as baterias precisam ser trocadas, enquanto que a vida-útil de um tanque de armazenamento bem construído é de várias décadas (exemplos: tanques de armazenamento feitos de concreto e os tanques de polietileno). O armazenamento de energia em baterias normalmente se justifica quando o rendimento máximo do poço durante as horas de sol é insuficiente para satisfazer as necessidades diárias de água e quando se requer bombear água durante a noite. Em longo prazo é mais econômico e viável perfurar outro poço do que implementar um banco de baterias. A introdução de um banco de baterias em um sistema fotovoltaico de bombeamento pode diminuir sua confiabilidade e incrementar seus custos de manutenção.

1.1.2 Gerador fotovoltaico

No caso específico dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água que usam motobomba centrífuga multiestágios, os geradores fotovoltaicos apresentam elevada confiabilidade. Contudo, esses geradores operam em tensão de corrente contínua superior a 120 V (IES-UPM, 2003), portanto, existe a possibilidade, caso aconteça um sombreamento

parcial, de aparecimento de pontos quentes e danificação de módulos do gerador. Afortunadamente, esse problema pode ser atenuado mediante a inclusão de diodos *by-pass*, que são colocados em paralelo com um ramo de células em série, servindo de caminho alternativo para a corrente.

Em geral, todos os módulos fotovoltaicos são projetados para ser ligados em série e/ou paralelo, formando vários arranjos; não obstante, em situações irregulares, é provável que aconteçam correntes inversas. Para evitar isso, os fabricantes incluem um diodo de bloqueio em cada painel, como meio de proteção.

1.1.3 Grupo motobomba

As motobombas³ empregadas em poços artesianos se caracterizam por terem em um mesmo bloco o motor de indução (alguns fabricantes utilizam motores de corrente contínua sem escovas) e uma bomba centrífuga multiestágios (em alguns casos, os fabricantes empregam bombas helicoidais ou de deslocamento positivo), formando um conjunto único, figura 1.4 (a). Contudo, as motobombas centrífugas multiestágios são as mais comuns no mercado convencional. Portanto, esse equipamento já é padronizado no mercado elétrico convencional, mas, quando se trata de empregá-lo em sistemas fotovoltaicos, atenção especial deve ser dada à qualidade da motobomba (preferencialmente de materiais resistentes a corrosão e atóxicos), pois o sistema irá operar em lugares afastados da rede elétrica convencional (geralmente comunidades isoladas) e em muitas ocasiões fornecerá água para consumo humano.

³ Motor (CC ou CA) + Bomba (centrífuga multiestágios ou de deslocamento positivo)

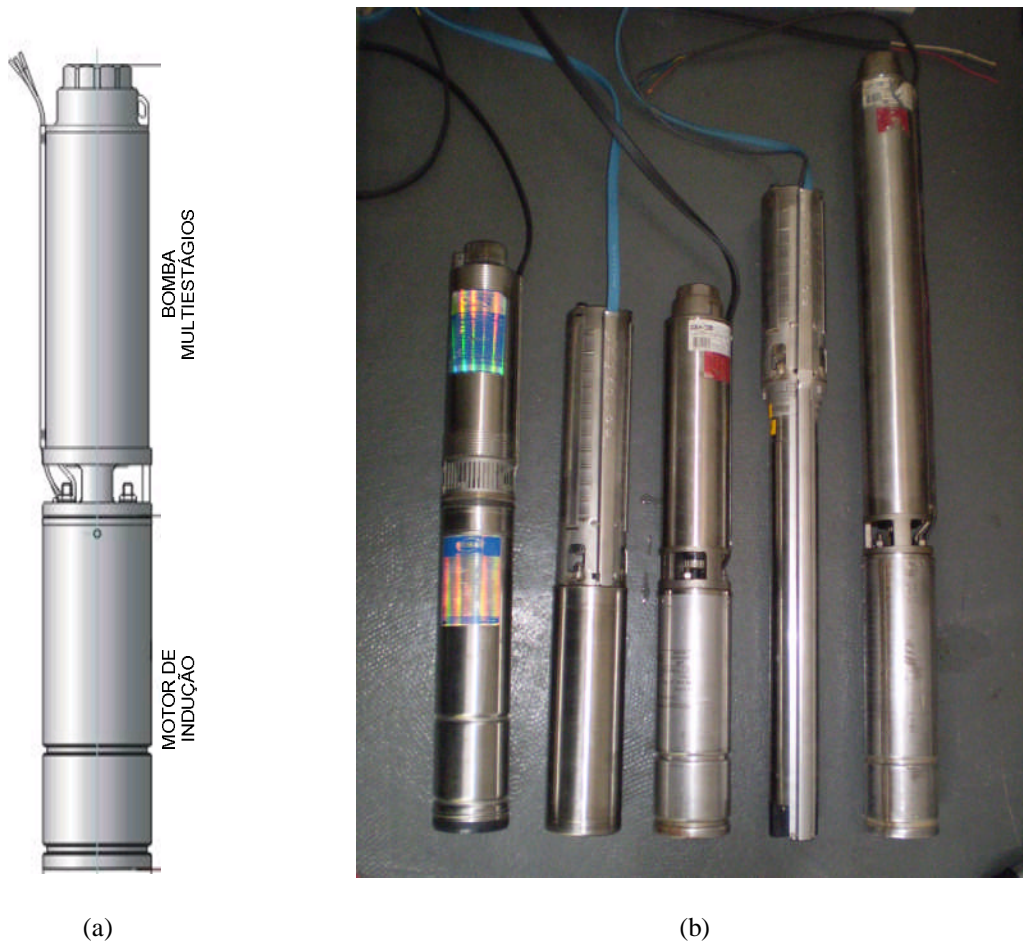


Figura 1. 4: Conjunto motobomba e motobombas mais utilizadas

1.1.3.1 Bombas

As bombas são classificadas em centrífugas ou de deslocamento positivo, conforme se observa na figura 1.5. As bombas centrífugas fornecem energia à água sob a forma de velocidade (a energia potencial da água é convertida em energia cinética de rotação), transformando essa velocidade do fluido dentro das bombas em energia de pressão, fazendo com que esse fluido atinja cotas mais elevadas.

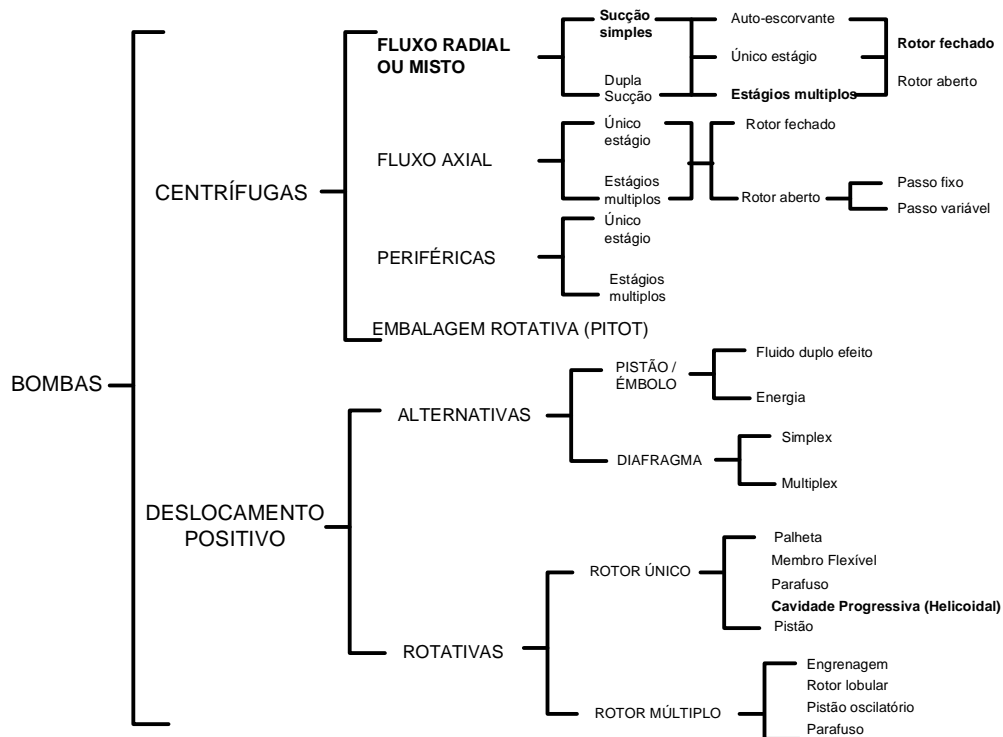


Figura 1. 5: Classificação geral de bombas

Fonte: Adaptado de Gurgel, 2006

Nas bombas de deslocamento positivo, não há troca de energia interna na massa líquida. O líquido sofre uma pressão interna e, por estar confinado, desloca-se de uma posição estática para outra mais elevada. A vazão é proporcional à velocidade do acionador da máquina. Estas bombas não serão consideradas para o teste na bancada de ensaios, porque a comparação é entre bombas centrífugas.

1.1.3.2 Curva-característica de bombas centrífugas multiestágios

As bombas centrífugas são máquinas projetadas e construídas para trabalhar na mesma rotação, sob diferentes condições de vazão e de altura manométrica. Existe, entretanto, uma interdependência bem definida entre esses valores de vazão e altura manométrica, que é obtida mediante ensaios feitos nos laboratórios dos fabricantes. Por isso, é comum que o fabricante forneça as curvas características de seus produtos para diversos diâmetros de rotor e número de estágios, relacionando a altura manométrica total, H_T ; a potência necessária, P ; e a eficiência, η ; em função da vazão, Q ; conforme se observa na figura 1.6.

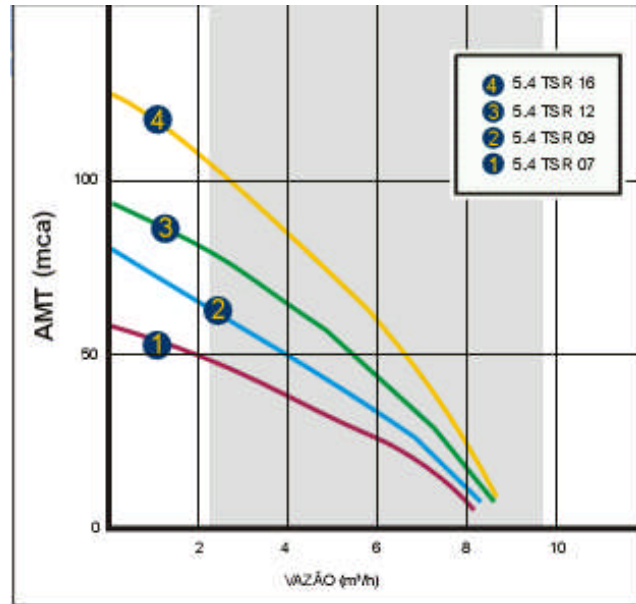


Figura 1. 6: Exemplo de curva-característica de motobomba convencional

Fonte: Catálogo da DANCOR, 2006

1.1.3.3 Motor elétrico

Os motores elétricos são máquinas destinadas a transformar energia elétrica em energia mecânica. Os tipos mais comuns são os de corrente contínua e os de corrente alternada. A figura 1.7 apresenta a classificação de motores.

Os motores de corrente contínua são utilizados em aplicações de bombeamento fotovoltaico, já que exigem para seu funcionamento uma fonte de corrente contínua; geralmente são acoplados diretamente ao gerador fotovoltaico, mediante um mecanismo de controle. Por causa do seu alto custo inicial, esta alternativa está se tornando menos competitiva se comparada aos motores de corrente alternada, sendo sua aplicação restrita a sistemas de bombeamento de pequenas potências (potências menores a 400Wp) (FEDRIZZI, 1997; FEDRIZZI, 2003).

Os motores de corrente alternada são mais comuns em função da distribuição de energia pelas concessionárias ser realizada em corrente alternada. Pelo grande número de aplicações e menores preços, os motores em corrente alternada são amplamente utilizados em sistemas fotovoltaicos de bombeamento; geralmente são utilizados em sistemas submersos, destinados a suprir grandes demandas de água.

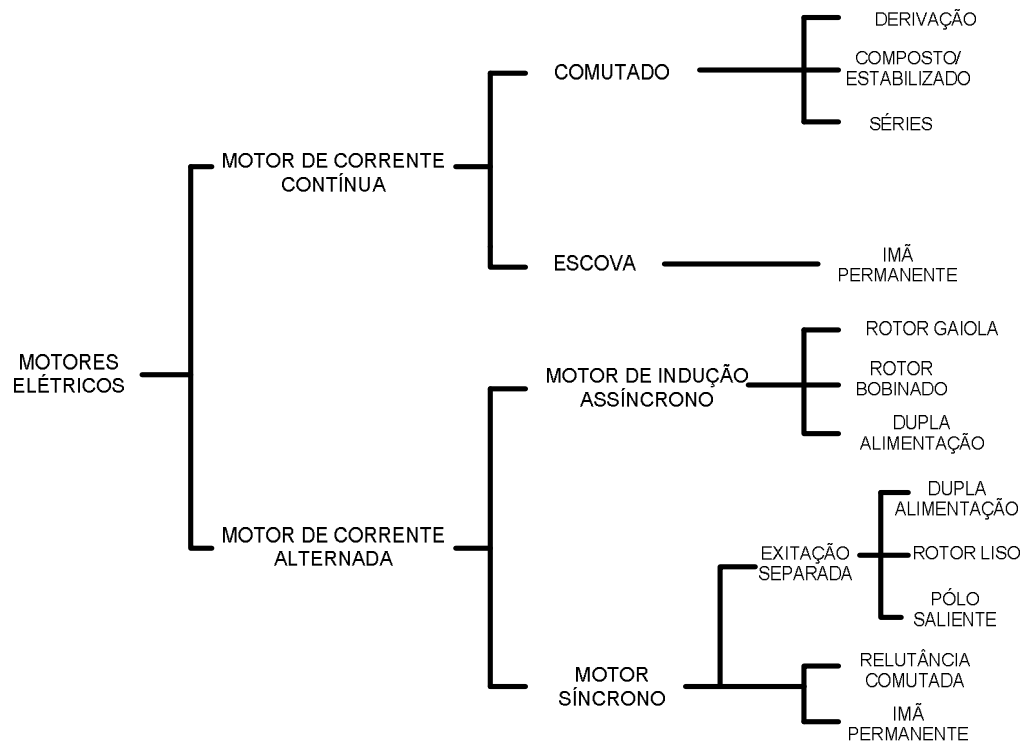


Figura 1. 7: Classificação de motores elétricos

Fonte: Adaptado de Gurgel, 2006

1.1.4 Equipamentos de condicionamento de potência

A maioria dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento são equipadas com dispositivos eletrônicos de condicionamento de potência, que trabalham como interface entre o arranjo fotovoltaico e o conjunto motobomba. Em geral, são utilizados conversores CC/CC em sistemas de corrente contínua e inversores CC/CA em sistemas de corrente alternada. No caso de sistemas de corrente alternada, uma alternativa é a utilização de conversores de frequência como unidade de condicionamento de potência. A característica intrínseca do conversor de frequência permite controlar a velocidade do motor, em função da variação da irradiância ao longo do dia. A figura 1.8 mostra essa configuração, na qual o gerador fotovoltaico está conectado diretamente ao conversor de frequência e este, acoplado ao conjunto motobomba (ZILLES e BRITO, 2004).

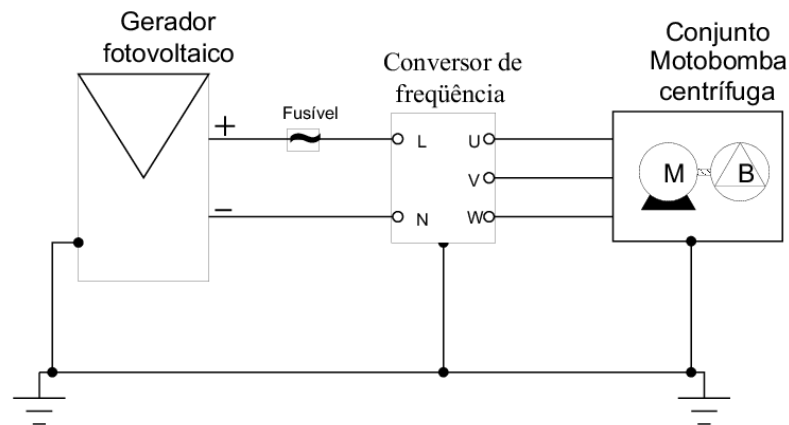


Figura 1. 8: Configuração de um sistema alternativo de bombeamento

Fonte: Brito e Zilles, 2004

1.1.4.1 Acoplamento direto

O acoplamento direto de bombas movimentadas por um motor de corrente contínua com um arranjo fotovoltaico é ainda amplamente usado, especialmente em sistemas fotovoltaicos de bombeamento de pequeno porte (de 50 até 400 Wp), graças à sua simplicidade e economia.

1.1.4.2 Booster

Muitas das bombas de deslocamento positivo requerem um pico de corrente significativo (em baixas voltagens) durante o arranque, de forma a superar as forças internas de atrito. Soma-se a isto também a falta de irradiância solar suficiente durante o nascer do sol.

Para ajudar a solucionar este problema, um dispositivo eletrônico chamado *booster* é instalado, o qual armazena uma quantidade de energia produzida pelo arranjo fotovoltaico em um capacitor e alimenta a motobomba com uma corrente de pico.

1.1.4.3 Conversor CC / CC

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 de corrente acoplado à bomba.

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 motobomba.

No lado da 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 é da ordem de 95% (MERMOUD, 2004a). Contudo, a eficiência dos conversores pode cair quando o fornecimento de potência é baixo (baixas irradiâncias).

1.1.4.4 Conversor CC / CC com seguidor de ponto de máxima potência

A operação deste conversor é semelhante à do conversor mencionado na subseção 1.1.4.3, com a diferença de que este possui um circuito eletrônico seguidor de ponto de máxima potência (MPPT, na sigla em inglês); esse circuito ajusta a tensão de entrada no ponto máximo do “joelho” da curva I-V do gerador fotovoltaico.

1.1.4.5 Inversor CC / CA

Uma bomba acionada por um motor de indução de corrente alternada necessita de um inversor ou conversor de potência. Os fabricantes de motobombas dedicadas à tecnologia fotovoltaica projetam inversores especiais para este propósito. Nesses casos, eles não especificam os valores intermediários (tensão, corrente e frequência) entre a saída do conversor e a entrada da motobomba.

1.1.4.6 Conversor de frequência CC / CA

Em alguns países, são utilizadas configurações alternativas, baseadas no uso de conversores de frequência acoplados a motobombas centrífugas submersíveis, ambos de uso comercial. Isso permite escolher qualquer motobomba 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 potências para sistemas fotovoltaicos de bombeamento (ALONSO ABELLA, 2003; BRITO, 2006).

Desde meados da década de 1960, o conversor de frequência tem passado por várias e rápidas mudanças, principalmente pelo desenvolvimento da tecnologia dos microprocessadores e semicondutores e pela redução de seus custos. Entretanto, os princípios básicos dos conversores de frequência continuam os mesmos (MATHEUS, 2007; GURGEL, 2006). A figura 1.9 mostra um diagrama de blocos de um conversor de frequência da WEG.

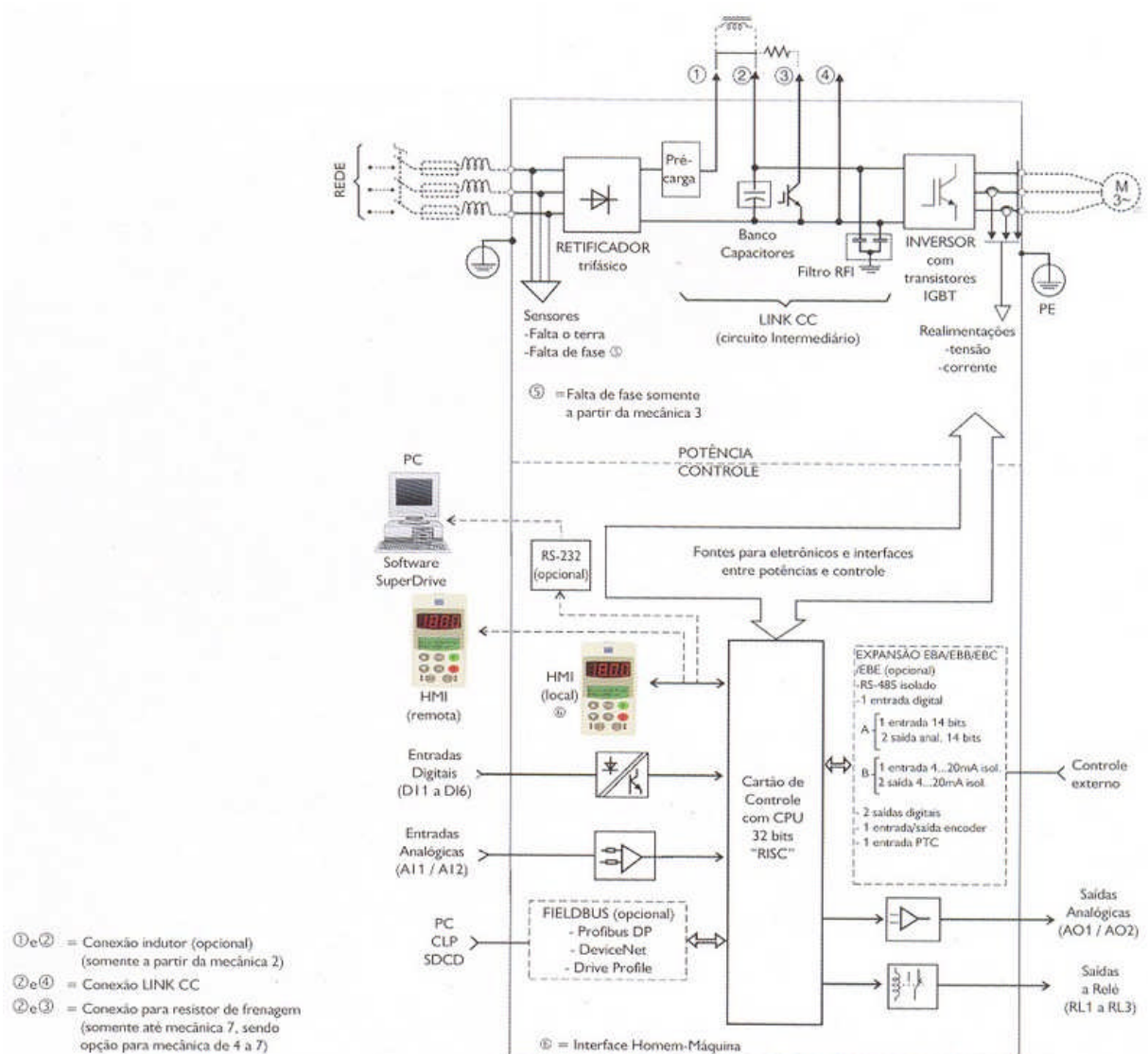


Figura 1. 9: Diagrama de blocos de um conversor de frequência

Fonte: Manual da WEG, 2005

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

Segundo Alonso Abella (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. Mas outros autores (KLUMPNER et. al. 2002) afirmam que graças às reduzidas perdas dos transistores bipolares com porta de entrada isolada (IGBTs, na sigla em inglês), a eficiência do conversor de frequência alcança 98%, na potência nominal.

1.2 Recurso solar

Uma grande parte da energia proveniente do Sol chega à Terra em forma de radiação eletromagnética, denominada comumente energia solar.

No topo da atmosfera terrestre, a densidade média do fluxo energético proveniente da radiação solar é de 1367 W/m^2 , quando medido sobre uma superfície perpendicular à direção da propagação dos raios solares. Esse valor é designado como constante solar (DUFFIE; BECKMAN, 1991), e foi adotado como padrão pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, na sigla em inglês).

Sabe-se também que a atmosfera terrestre é constituída de gases, nuvens, vapor de água, partículas contaminantes e sólidos em suspensão, cujo conjunto se denomina comumente massa de ar (AM, na sigla em inglês). Portanto, na medida em que a luz solar atravessar a AM, esta sofre processos de absorção, reflexão e refração, e em consequência disso o valor da irradiância é atenuado.

Alem disso, a irradiação solar global que chega a um ponto qualquer da Terra pode ser dividida em irradiação direta, irradiação difusa e albedo. A irradiação direta é aquela que se recebe na superfície terrestre sem que haja sofrido nenhuma alteração em sua direção original (proveniente da esfera solar). A irradiação difusa é a que atinge um determinado ponto vindo da cúpula celeste, produzida pela refração e reflexão que acontece na atmosfera. O albedo é a parcela de irradiação refletida pelo entorno.

Porém, um coletor de energia solar “vê” a irradiação solar como se esta viesse da esfera celeste com as duas componentes principais (direta e difusa), o que em muitas ocasiões fornece valores de irradiância superiores a 1.000 W/m^2 (SANDIA NATIONAL

LABORATORIES, 2001). Um exemplo disso é apresentado na figura 10: nesse dia houve bastante presença de nuvens e os valores de irradiância ultrapassaram o valor médio normalizado (curvas de irradiância e vazão do sistema alternativo).

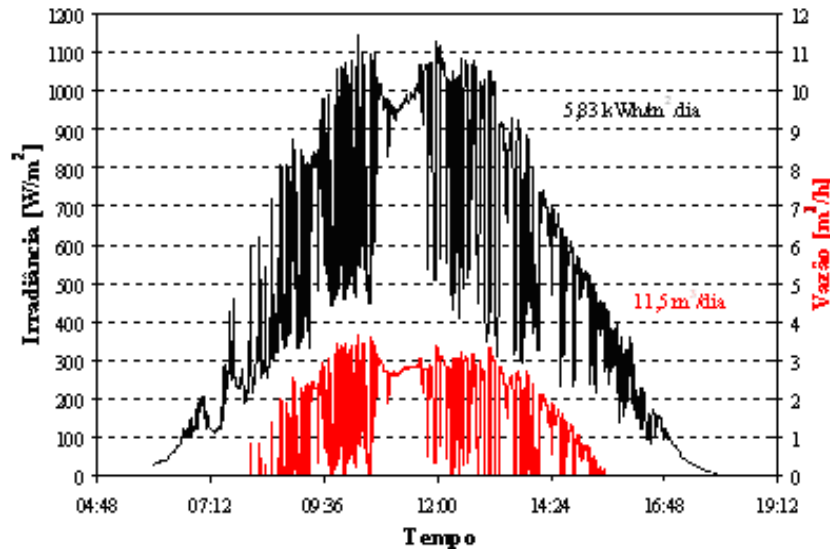


Figura 1. 10: Exemplo de índices de irradiância que atingem quantidades maiores do que 1.000 W/m^2

Em condições de atmosfera limpa, sem nenhum processo óptico e estando o Sol no zênite, a irradiância máxima que um coletor solar poderia receber é de 1.000 W/m^2 , como valor médio normalizado.

Segundo Martins et.al. (2005) a média anual de irradiação solar em um plano inclinado⁴ no território brasileiro é de $5 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$, praticamente igual ao valor máximo de irradiação observado no continente europeu, $5,5 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$. O que é de grande utilidade no aproveitamento da energia solar em projetos de energia solar fotovoltaica ou térmica.

⁴ Irradiação solar em um plano inclinado, em ângulo igual à latitude do lugar.

CAPÍTULO 2

PROCEDIMENTOS DE CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO

A caracterização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água envolve parâmetros de referência, como a demanda diária de água, m^3/dia , a disponibilidade do recurso solar local, $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{dia}$, e a altura manométrica total, mca. No entanto, a experiência tem demonstrado que, apesar de um bom dimensionamento, nem sempre os sistemas instalados apresentam o desempenho esperado indicado nos catálogos comerciais. Essa realidade faz com que se recomende a realização de testes de desempenho dos módulos fotovoltaicos e do sistema motobomba (dispositivo de condicionamento de potência mais conjunto motobomba), antes de sua instalação em campo (FEDRIZZI, 2003; NARVARTE; POZA; LORENZO, 2006). Com relação aos módulos fotovoltaicos, existem procedimentos bastante consolidados para a realização de ensaios, motivo pelo qual este tema não será abordado nesta dissertação. Portanto, enfatiza-se o procedimento de avaliação do volume diário fornecido por um sistema fotovoltaico de bombeamento.

2.1 Parâmetros de referência

Para se configurar um sistema fotovoltaico de bombeamento, são utilizados parâmetros de referência, cujos valores permitem selecionar e dimensionar o sistema. No presente trabalho considera-se como referência um lugar hipotético, cujos parâmetros são os seguintes:

- Irradiação solar diária de referência no plano gerador fotovoltaico: $5 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{dia}$;
- Altura manométrica total de referência: 20m, 30m, 40m e 50 m;
- Volume diário do projeto para 50m de AMT: $15 \text{ m}^3/\text{dia}$.

2.2 Seleção dos dispositivos do sistema fotovoltaico de bombeamento

Os sistemas fotovoltaicos de bombeamento são selecionados em função dos parâmetros de referência. As equações empregadas para o dimensionamento são as seguintes:

$$E_H = 2,725 \cdot Q_d \cdot AMT, \quad (1);$$

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);

$$C_h = \frac{\rho g}{3.600}, \quad (2);$$

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;

$$L = \frac{E_H}{\eta_{motobomba}}, \quad (3);$$

em que: L é a carga diária do sistema, Wh/dia; $\eta_{motobomba}$ é a eficiência diária do conjunto motobomba, %;

$$P_{(Wp)} = 1,25 \cdot \frac{L}{(HSP)_\beta}, \quad (4);$$

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

O tamanho do gerador fotovoltaico (potência-pico da instalação) é calculado levando-se em conta o conceito de horas de sol pleno (HSP), que é o número de horas de sol em média diária a uma intensidade de 1.000 W/m², e equivale à energia total diária incidente sobre a superfície do gerador em kWh/m².

Na tabela 2.1 são apresentadas as características básicas das configurações dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento selecionados.

Tabela 2. 1: Características dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento selecionados

Tipo de sistema	SISTEMA FOTOVOLTAICO DE BOMBEAMENTO		
	Potência do gerador fotovoltaico	Subsistema ⁵	
		Dispositivo de condicionamento de potência	Motobomba
Sistema dedicado à tecnologia fotovoltaica (importado)	1.575 Wp	Solartronics1500	Grundfos SP 3A-10 0,75CV
	1.575 Wp	PCB – 180C	Solarjack SCS 10 – 230 1HP
Sistema alternativo (fabricação nacional)	1.500 Wp	Conversor de frequência 1CV (WEG)	Somar BMSAF 407/1,0-8 1CV

2.2.1 Características do sistema alternativo

O sistema alternativo caracteriza-se por ter sido configurado para operar com a tensão e a frequência da rede elétrica convencional. Os dados apresentados na tabela 2.2 foram extraídos do manual do fabricante da motobomba (catálogo SOMAR), em que se apresentam os valores da vazão a diferentes alturas manométricas para as condições nominais de operação.

Tabela 2. 2: Vazão da motobomba para condições nominais de operação

AMT	20 m	30 m	40 m	50 m
Vazão	6,5 m ³ /h	5,8 m ³ /h	5,1 m ³ /h	4,0m ³ /h

Fonte: Catálogo SOMAR

O dispositivo de condicionamento de potência utilizado é o conversor de frequência da WEG, cujas características técnicas são apresentadas na tabela 2.3. Mais detalhes sobre a parametrização deste conversor de frequência podem ser encontrados em Brito e Zilles (2006). Além deste conversor de frequência, existem modelos de outros fabricantes (exemplo: Micromaster-SIEMENS e VS-606V7 – YASKAWA) que foram testados em aplicações fotovoltaicas para bombeamento de água (BRITO, 2006; CRUZ, 2007).

⁵ Sistema motobomba

Tabela 2. 3: Características do conversor de frequência da WEG

Modelo: Corrente (A) / Tensão (V)	4,0 / 200-240
Potência (kVA)	1,5
Corrente nominal de saída (A)	4,0
Corrente de saída máxima (A)	6,0
Fonte de alimentação	Monofásica ou trifásica
Potência máxima do motor	1 CV / 0,75 kW
Potência dissipada nas condições nominais	50 W

Fonte: Manual do conversor de frequência da WEG

A dissipação de potência (em forma de calor) nas condições nominais acontece geralmente perto do meio-dia. É nesse período que o sistema geralmente opera na condição nominal. Para aliviar o aquecimento do aparelho, o conversor de frequência conta com um ventilador, que é ativado automaticamente e refrigera o dispositivo eletrônico. A potência dissipada representa 6,8% da potência nominal do conversor de frequência.

O gerador fotovoltaico é constituído de 20 módulos de silício cristalino (75 Wp cada), todos dispostos em série, formando um único arranjo. Segundo Alonso Abella (2003), os conversores de frequência deveriam operar com uma tensão de entrada em torno de 300 volts em corrente contínua, de maneira que permita melhorar a eficiência quando for utilizado um motor de indução trifásico de 220 volts em corrente alternada.

2.2.2 Características dos sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica

A maioria das bombas convencionais de água existentes no mercado é fabricada para operar em condições de potência constante. Por outro lado, a potência produzida pelos módulos fotovoltaicos é diretamente proporcional à disponibilidade de irradiância; isso significa que, quando o Sol muda de posição durante o dia, a potência gerada pelos módulos varia, em consequência varia também a potência entregue à bomba. Essa é uma das razões pelas quais foram projetadas bombas para trabalhar com eletricidade fotovoltaica. Poucos são os fabricantes destes equipamentos (os mais comercializados são: Grundfos e Solarjack), e geralmente estes não fornecem dados completos de placa. Portanto, as únicas características existentes são as apresentadas na tabela 2.1.

Na presente dissertação, serão testados os sistemas Grundfos e SolarJack; apesar de os dois sistemas serem muito utilizados, só se considera como referência o primeiro deles, já que é a motobomba mais utilizada atualmente e cuja eficiência nos servirá de referência. Por outro lado, a motobomba SolarJack está deixando de ser comercializada no Brasil e no exterior ela é vendida com o nome de Sun Pumps, mas na avaliação feita permitirá realizar as necessárias comparações de desempenho.

O sistema Grundfos consiste de uma motobomba multiestágios, a qual é alimentada por um inversor tipo solartronic SA 1500. As características do inversor são apresentadas na tabela 2.4. A partir das características do inversor, é realizada a distribuição dos módulos fotovoltaicos. Com uma configuração de sete módulos em série e três arranjos em paralelo, o sistema ficou com uma potência-pico de 1.575 Wp, tensão de operação de 105 V e corrente de operação de 13,5 A, as quais estão dentro dos limites das faixas estabelecidas no catálogo do fabricante.

Tabela 2. 4: Características do inversor modelo Solartronic SA 1500

Entrada em corrente contínua	Nominal	Máxima	Mínima
Tensão com carga	120 V	140 V	100 V
Tensão em circuito aberto	155 V	175 V	115 V
Corrente com carga	12,5 A	14 A	-----
Potência	1.500 W	1.960 W	-----
Operação da bateria	120 V	140 V	100 V
Saída em corrente alternada	Nominal	Máxima	Mínima
Corrente	-----	14 A	-----
Frequência	-----	63 Hz	7 Hz
Eficiência	0,96	0,97	0,95
Operação da bateria	60 Hz	-----	-----

Fonte: Catálogo Grundfos

O sistema SolarJack é constituído por um motor em corrente contínua sem escovas (modelo SCS 10-230) e um controlador de potência da série PCB-180C, que possui seguidor de ponto de máxima potência (MPPT, na sigla em inglês). Esse dispositivo permite operar a motobomba de maneira que aproveite a máxima potência possível do gerador fotovoltaico, com isso o controlador maximiza o total de água bombeada, enquanto proporciona proteção para a motobomba. As características do controlador são apresentadas na Tabela 2.5.

Tabela 2. 5.: Características do controlador modelo PCB – 180C

Entrada em corrente contínua	Nominal	Máxima	Mínima
Tensão com carga	-----	-----	-----
Tensão em circuito aberto	-----	250 V	105 V
Corrente com carga	-----	-----	-----
Potência	2 HP	-----	-----
Saída em corrente contínua	Nominal	Máxima	Mínima
Corrente com carga	-----	10 A	-----
Corrente de pico	-----	14 A	-----
Potência	-----	1.800 W (180 Vx 10 A)	-----

Fonte: Catálogo Solarjack

Como se pode ver, as motobombas (alternativa e dedicadas à tecnologia fotovoltaica) possuem características elétricas diferentes, tanto no sistema de condicionamento de potência, como no conjunto motobomba. Em virtude disso, foi necessário associar os módulos em série ou paralelo, para produzir, respectivamente, tensões e correntes de intensidades adequadas às especificações elétricas encontradas nos catálogos do fabricante. Como consequência disso, houve uma diferença entre o sistema alternativo e os sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica .

Geralmente, os dispositivos de condicionamento de potência dos sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica consomem entre 4% e 7% da energia total gerada pelo arranjo fotovoltaico (BARLOW, 1993; SANDIA NATIONAL LABORATORIES, 2001).

2.3 Caracterização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento

A caracterização do sistema fotovoltaico de bombeamento é realizada experimentalmente, mediante a coleta de dados do volume bombeado, m³/dia, ao final de um período de funcionamento; da irradiação, kWh/m²/dia (integração da irradiância ao longo do dia); altura manométrica total, mca, para um ciclo completo de bombeamento; e energia elétrica gerada, kWh/dia (ao longo do dia). A figura 2.1 mostra o diagrama de blocos do sistema fotovoltaico de bombeamento.

Para adequar o volume bombeado medido às condições de referência, é utilizada a seguinte equação (FEDRIZZI, 2003):

$$Q_{dcor} = \frac{Q_{dmed} \cdot IG_{ref}}{IG_{med}} , \quad (5);$$

na qual: Q_{dcor} é o volume diário corrigido, m^3/dia ; Q_{dmed} é o volume medido, m^3/dia ; IG_{med} é a irradiação solar diária medida, $kWh/m^2/dia$; e IG_{ref} é a irradiação solar diária de referência, $kWh/m^2/dia$.

A eficiência diária (η_{med}) representa a relação entre a energia hidráulica produzida e a energia elétrica fornecida pelo arranjo fotovoltaico, que é dada pela seguinte equação:

$$\eta_{med} = 2,725 \cdot AMT \cdot \frac{\int Q \cdot dt}{\int V_{cc} \cdot I_{cc} \cdot dt}, \quad (6);$$

em que: AMT é a altura manométrica total, mca; Q é a vazão, m^3/h ; V_{cc} e I_{cc} correspondem à tensão e à corrente de operação do gerador fotovoltaico, V e A.

Para obter a eficiência diária corrigida (η_{cor}) é utilizada a seguinte equação:

$$\eta_{cor} = 2,725 \cdot AMT \cdot \frac{Q_{dcor}}{Ed}, \quad (7);$$

em que: Ed é a energia elétrica gerada pelo arranjo fotovoltaico para a irradiação de referência no plano gerador fotovoltaico ($5 kWh/m^2/dia$), Wh/dia.

A energia elétrica gerada pelo arranjo fotovoltaico para a irradiação de referência ($5 kWh/m^2/dia$) é: para $1.500 Wp$, a energia elétrica gerada é $6.786 Wh/dia$ e para $1.575 Wp$ a energia elétrica gerada é $7.125 Wh/dia$, que devem ser consideradas para o cálculo da eficiência diária corrigida. A energia elétrica gerada pelo arranjo fotovoltaico para a irradiação de referência é calculada a partir do perfil diário da irradiação de referência segundo a norma IEC-61725 (1997) e usando o modelo de Lorenzo (2002).

Nem sempre a energia produzida pelo gerador fotovoltaico se transforma totalmente em energia hidráulica, por causa das perdas existentes. Cada vez que a energia se transforma de uma forma para outra (isto é: solar para elétrica, elétrica para mecânica, mecânica para hidráulica), esta se associa a perdas, portanto a energia gerada pelo arranjo fotovoltaico deve ser maior do que a energia hidráulica requerida.

As equações (5) (6) e (7) permitem avaliar e comparar o melhor desempenho dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento.

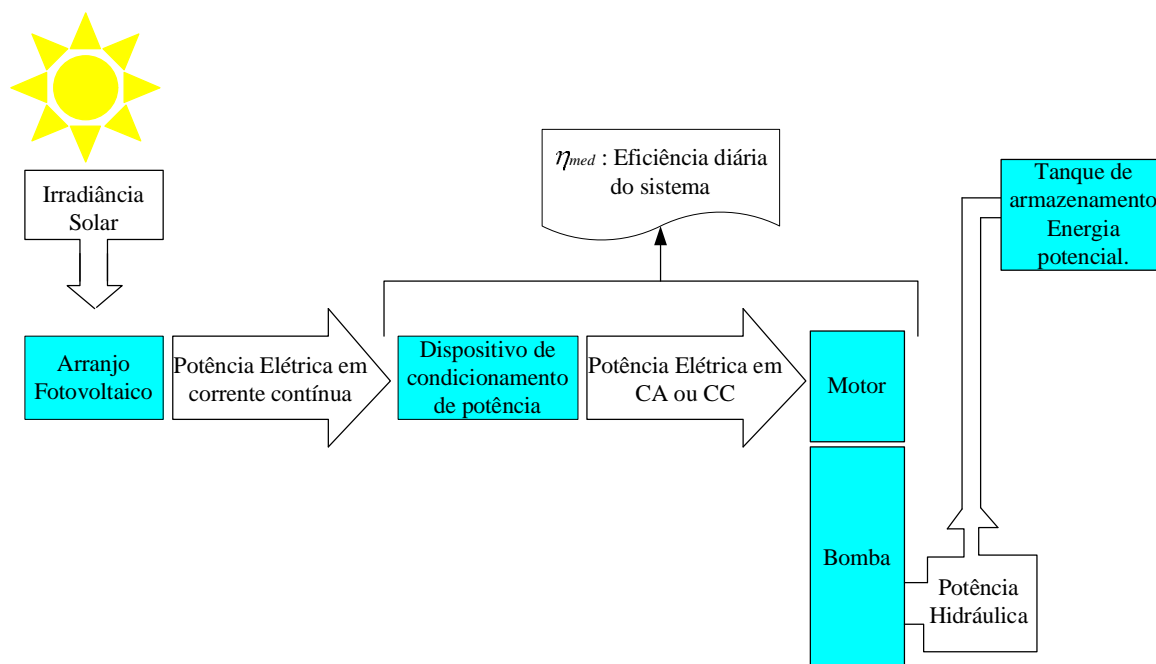


Figura 2. 1: Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água

Fonte: Adaptado de Fraidenraich e Vilela, 2007

Para fins de aceitação, o teste deve ser realizado em dias com irradiação solar superior a 80% do valor de irradiação solar diária de referência; além disso, o volume diário corrigido deverá ser igual ou superior a 0,90 do volume de água previsto nos parâmetros de referência (FEDRIZZI, 2003).

Por causa da sazonalidade do clima, serão excluídas as medidas realizadas em dias com excessiva contribuição de irradiação difusa, preferindo-se medidas com céu claro (livre de nuvens). Conseqüentemente, os testes de desempenho foram realizados procurando-se dias ensolarados, cuja previsão do tempo foi feita segundo o canal do tempo (THE WEATHER CHANNEL), que pode ser consultado no jornal *Folha de São Paulo*⁶.

2.4 Instrumentação utilizada para os testes das motobombas

Os testes foram realizados em bancada de ensaios do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo. A disposição dos dispositivos de medição e outros equipamentos (arranjo fotovoltaico, dispositivo de condicionamento de potência e motobombas) da bancada é apresentada na

⁶ Acesso ao site da folha de São Paulo: http://www1.folha.uol.com.br/folha/tempo/br-sao_paulo.shtml

figura 2.2; mais detalhes podem ser obtidos em Brito et. al. (2007a). Esta bancada mantém a altura manométrica constante; isto é realizado mediante uma motobomba que controla a pressão, que é controlada pelo conversor de frequência, que por sua vez está conectado na rede elétrica. Essa motobomba que mantém a altura manométrica constante recebe um sinal de um transdutor de pressão e realimenta o conversor de frequência que a controla. De tal forma que, quando a motobomba testada aumentar sua capacidade de bombeamento, a outra motobomba reduz a sua; ou então, caso sua capacidade de bombeamento diminua, a outra a incrementará, e assim por diante durante todo o turno de bombeamento.

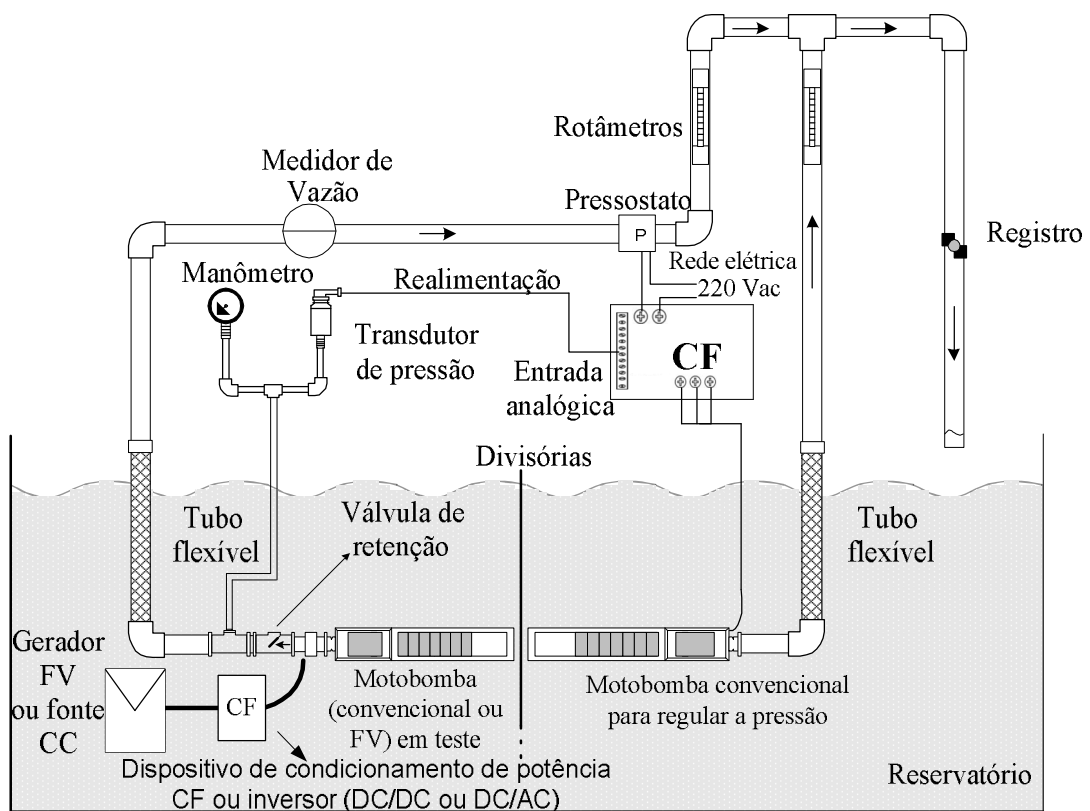


Figura 2. 2: Diagrama esquemático da bancada de ensaios

Fonte: Brito et. al., 2007a

Para evitar possíveis interferências das bolhas de ar formadas pela turbulência da descarga de água bombeada sobre a motobomba a ser testada, as duas motobombas estão em compartimentos separados por uma divisória, dentro de um reservatório.

Uma foto da bancada de ensaios é mostrada na figura 2.3, na qual se vê um trocador de calor, o qual permite refrigerar a água do depósito, pois o aquecimento excessivo

produzido pelo trabalho dos motores pode debilitar o verniz dos fios do enrolamento do motor elétrico. Por isso, durante os testes experimentais, manteve-se a temperatura da água em um valor inferior a 35°C, já que essa é a temperatura máxima recomendada pelo fabricante da motobomba.



Figura 2. 3: Foto da bancada de ensaios

Os dados foram coletados por um equipamento de aquisição de dados tipo HP-34970A. Os detalhes da operação e configuração deste equipamento podem ser consultados em Agilent Thecnologies (2000). Esses dados correspondem à corrente e à tensão do gerador fotovoltaico, irradiância, altura manométrica total e vazão, os quais foram armazenados em intervalos de 10 segundos. As características e escalas de medição dos dispositivos utilizados na aquisição de dados são apresentadas na tabela 2.6.

Tabela 2. 6: Características dos equipamentos de aquisição de dados

Variáveis monitoradas	Transdutor	Escala de medição
Irradiância	Célula fotovoltaica calibrada	0 – 130,2 mV ↔ 0 – 1.000 W/m ²
Tensão de entrada	Transdutor de tensão	0 – 500 mVcc ↔ 0 – 10 Vcc
Corrente de entrada	Shunt	0 - 100 mV ↔ 0 – 10 A
Pressão nos tubos	Transdutor de pressão	0 -10 kgf/cm ² ↔ 0 -10 Vcc
Vazão	Transdutor de vazão	0 -32 m ³ /h ↔ 0 -20 mA
Equipamento de aquisição de dados: HP 34970 A		

Todos os dados foram processados em planilha eletrônica Excel sobre uma base horária, para obter um turno de bombeamento diário (06h00min a 18h00min).

Para ligar e desligar automaticamente a bancada de ensaio, esta possui um timer programável, que deve ser programado de maneira a colocar em funcionamento o sistema por um período de tempo que vai do nascer até o pôr-do-sol.

Para configurar a disposição dos módulos fotovoltaicos, a bancada possui um quadro elétrico de conexões que permite incrementar ou diminuir o número de módulos, segundo as características e requerimentos do subsistema fotovoltaico. No Anexo A são apresentadas as conexões utilizadas para os três tipos de sistemas; Grundfos, Solarjack e alternativo.

CAPÍTULO 3

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO

A avaliação de desempenho dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento é de vital importância, já que da qualidade dos equipamentos do subsistema dependerá a confiabilidade de funcionamento do sistema. Portanto, uma falha nos equipamentos do subsistema acarretará consequências no serviço.

De nada adianta realizar cálculos sofisticados ou simulações para estimar o desempenho se não se presta especial atenção à qualidade dos equipamentos do subsistema. Existem muitos modelos matemáticos que utilizam softwares para esse tipo de cálculo, alguns desses podem ser vistos em Mermoud (2004b), Hadj Arab A. (2005), Ghoneim (2005), Hamidat e Benyoucef (2007).

Existe também no software PVsyst⁷ a implementação dos parâmetros inerentes aos conversores de frequência mais motor de indução trifásico acionando uma bomba multiestágios, que simula o desempenho do sistema.

A seguir, as avaliações de desempenho são realizadas em uma bancada de ensaio, obtendo-se resultados experimentais de um sistema alternativo e de dois sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica. Os resultados nos permitiram realizar comparações dos três sistemas, assim como obter o real desempenho do sistema alternativo quando acoplado a um gerador fotovoltaico.

3.1 Avaliação dos sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica

Foram testadas duas configurações, os sistemas Grundfos e SolarJack (Sun Pumps), para três alturas manométricas (30 m, 40 m e 50 m), nas quais ambos possuem bombas centrífugas de 10 estágios cada. As duas configurações são diferentes, porque uma possui motor de indução trifásico e a outra, motor em corrente contínua sem escovas. No entanto,

⁷ Software para o estudo, dimensionamento e simulação de dados de sistemas fotovoltaicos.

com o constante desenvolvimento e diminuição dos custos dos motores de indução trifásicos, que são empregados para uma ampla gama de potências e aplicações em bombas de poços profundos, estes se tornaram comercialmente competitivos, enquanto os motores em corrente contínua, apesar de serem mais eficientes, não são competitivos economicamente.

Com o intuito de compará-los, o tamanho do gerador fotovoltaico foi dimensionado para uma potência-pico de 1.575 Wp, de acordo com as características do catálogo do fabricante de cada sistema. A disposição e a conexão dos módulos foram as seguintes: um arranjo de 7 módulos em série e 3 arranjos em paralelo, sendo a corrente e tensão elétrica do gerador fotovoltaico nas condições de máxima potência 13,74 A e 114,1 V, respectivamente.

3.1.1 Resultados experimentais dos sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica

Os resultados experimentais dos dois sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica são mostrados na tabela 3.1.

Para realizar as respectivas comparações, foram considerados os seguintes indicadores: o volume corrigido para as condições de irradiação diária de referência, a eficiência diária e a eficiência diária corrigida do sistema (ver cap. 2).

A partir do volume corrigido para 30 m de AMT, o sistema Grundfos bombeia 8,3% a mais do que o sistema Solarjack; a 40 m, o sistema Grundfos bombeia 8% a menos do que o sistema Solarjack; e a 50 m, o sistema Grundfos bombeia 17% a menos do que o sistema Solarjack.

Por outro lado, ao se considerar a eficiência diária do sistema, para 30 m de AMT, o sistema Grundfos está 2,6 pontos percentuais acima do sistema Solarjack; para 40 m, de AMT, o sistema Grundfos está 0,8 ponto percentual abaixo do sistema Solarjack; e para 50 m de AMT, o sistema Grundfos está 5,2 pontos percentuais abaixo do sistema Solarjack.

No entanto, ao se considerar a eficiência diária corrigida para a irradiação de referência, 5 kWh/m²/dia, para 30 m de AMT, o sistema Grundfos está 1,9 ponto percentual acima do sistema Solarjack; para 40m de AMT, o sistema Grundfos está 2,1 pontos percentuais abaixo do sistema Solarjack; e para 50m de AMT o sistema Grundfos está 5,1 ponto percentual abaixo do sistema Solarjack.

Comparando-se estas duas configurações, conclui-se que o sistema Solarjack é mais eficiente para as alturas manométricas de 40 m e 50 m. Tem-se que considerar que o sistema

Solarjack não apresenta perdas de conversão, pois não possui Inversor de CC para CA, sendo mais eficiente.

Tabela 3. 1: Resultados experimentais sistemas GRUNDFOS e SOLARJACK

MOTOBOMBA GRUNDFOS: SP3A-10 (1575Wp – 7sx3p) (Dados mês de março 2008)						MOTOBOMBA SOLARJACK (SUN PUMPS): SCS10-230 (1575Wp – 7sx3p) (Dados mês de março - abril 2008)				
<i>AMT</i>	<i>IGmed</i>	<i>Qdmed</i>	<i>Qdcor</i>	η_{med}	η_{cor}	<i>IGmed</i>	<i>Qdmed</i>	<i>Qdcor</i>	η_{med}	η_{cor}
30	6,79	28,30	20,9	33,6	24,0	6,12	23,63	19,3	31,0	22,1
40	6,27	20,28	16,2	35,2	24,8	6,04	21,24	17,6	36,0	26,9
50	6,22	16,31	13,1	33,6	25,1	6,28	19,86	15,8	38,8	30,2

AMT: Altura manométrica total (m)

IGmed: Irradiação medida (kWh/m²/dia)

Qdmed: Volume medido (m³/dia)

Qdcor: Volume corrigido (m³/dia), para a irradiação de referência no plano gerador fotovoltaico, 5 kWh/m²/dia.

η_{med} : Eficiência diária do sistema motobomba (%).

η_{cor} : Eficiência diária corrigida do sistema motobomba (%), para a irradiação de referência no plano gerador fotovoltaico, 5 kWh/m²/dia.

3.1.2 Curvas de irradiância e vazão dos sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica

As curvas de irradiância e vazão estão apresentadas na fig. 3.1, na qual a curva de vazão se comporta proporcionalmente à trajetória variável da curva de irradiância. Desta forma, se a irradiância aumentar ou diminuir, a curva de vazão também se comportará seguindo essas oscilações, pois a corrente elétrica produzida pelo módulo fotovoltaico é um parâmetro dependente da irradiância. Isso significa que, quando houver horários com maior incidência solar, a corrente será maior e, portanto, maior será a vazão instantânea fornecida pela motobomba.

Por outro lado, as figuras mostram que, com a passagem de nuvens, o dispositivo de condicionamento de potência se encarrega de controlar a velocidade do motor, incrementando-a ou diminuindo-a, mantendo ligado o motor a maior parte do tempo. Diminuem-se, assim, as paradas e ligações sucessivas, que, em excesso, causariam a diminuição da vida-útil da motobomba.

Além disso, na figura 3.1 se visualizam os instantes em que os sistemas começam a bombear e quando param. Assim, o sistema Grundfos, para 30 m de AMT, começa a bombear quando a irradiância é superior a 231 W/m²; para 40 m de AMT, ele começa a bombear quando a irradiância é superior a 231 W/m²; e para 50 m de AMT, ele começa bombear

quando a irradiância é superior a 241 W/m^2 . O sistema Solarjack, para 30 m de AMT, começa a bombear quando a irradiância é superior a 237 W/m^2 ; para 40 m de AMT, ele começa a bombear quando a irradiância é superior a 243 W/m^2 ; e para 50 m de AMT, ele começa a bombear quando a irradiância é superior a 284 W/m^2 . Esses valores representam a irradiância crítica dos sistemas; abaixo desses valores, os sistemas não conseguirão ligar a motobomba.

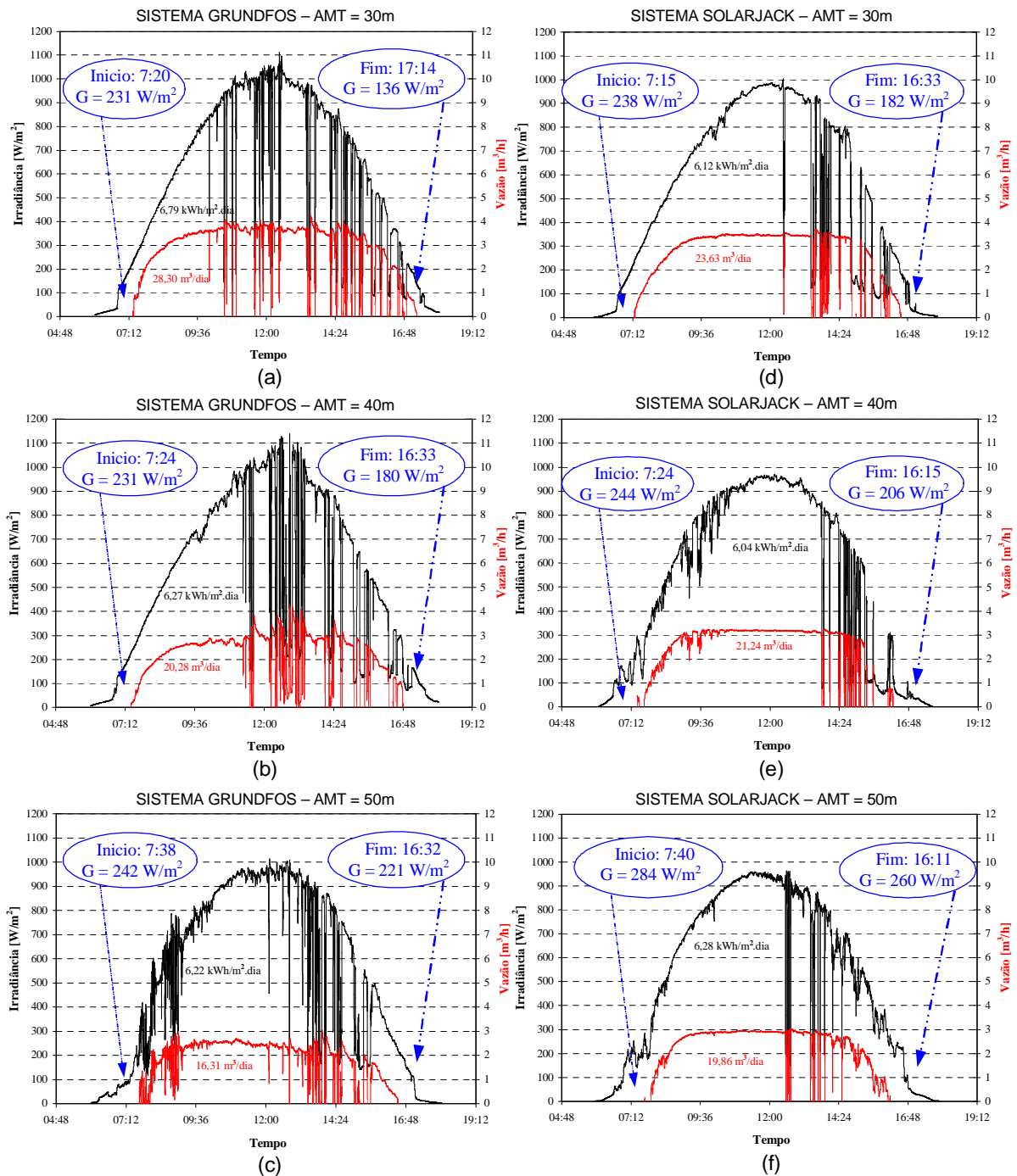


Figura 3. 1: Curvas de irradiância e vazão ao longo de um dia de bombeamento (Grundfos e Solarjack)

No período da tarde, quando o bombeamento vai diminuindo, a irradiância necessária para manter funcionando o motor é menor do que no período da manhã, por causa da corrente mínima necessária para manter funcionando a motobomba.

3.1.3 Curvas de eficiência e vazão dos sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica

As eficiências dos sistemas Grundfos e Solarjack em função da potência do gerador fotovoltaico estão apresentadas nas figuras 3.2 e 3.3. As eficiências máximas são: para 30m de AMT, o sistema Grundfos atinge 38% de eficiência máxima e o sistema Solarjack atinge 43% de eficiência máxima; para 40m de AMT, o sistema Grundfos atinge 39% de eficiência máxima e o sistema Solarjack, 43% de eficiência máxima; e para 50m de AMT, o sistema Grundfos atinge 39% de eficiência máxima e o sistema Solarjack, 44% de eficiência máxima. Portanto, o sistema Solarjack atinge maiores eficiências máximas do que o sistema Grundfos.

Por outro lado, as eficiências mínimas durante o bombeamento são: para 30 m de AMT, o sistema Grundfos começa em 8% e o sistema Solarjack começa em 10%; para 40 m de AMT, o sistema Grundfos começa em 7% e o sistema Solarjack, em 10%; e para 50 m de AMT, o sistema Grundfos começa em 7% e o sistema Solarjack, em 9%. Conclui-se que o sistema Grundfos começa com eficiências menores do que o sistema Solarjack.

Após atingir o valor de eficiência máxima, geralmente a curva de eficiência do sistema motobomba tende a cair, principalmente pela saturação da potência hidráulica quando se conseguem maiores potências do gerador fotovoltaico. Isso significa que a motobomba não consegue bombear mais do que a vazão máxima, ficando saturada (ver as figuras 3.4 e 3.5).

A máxima eficiência diária do sistema Grundfos se dá a 40 m de AMT, altura em que ela consegue 35,2%, e para o sistema Solarjack, se dá a 50 m de AMT, quando a máxima eficiência diária é de 38,8%.

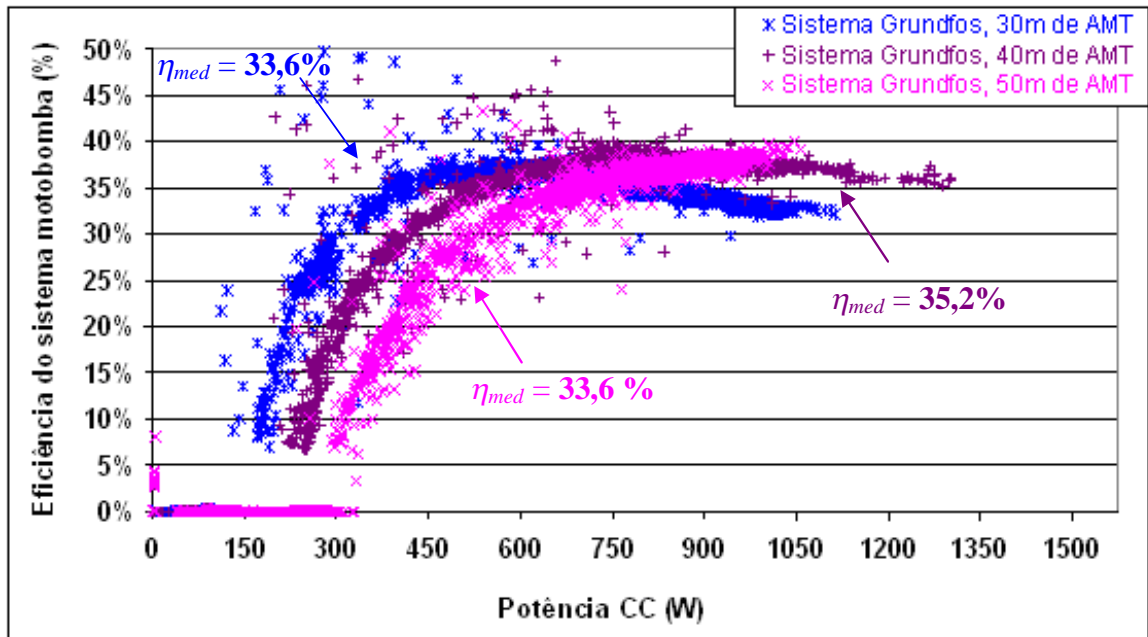


Figura 3. 2: Curvas da eficiência em função da potência do gerador fotovoltaico, sistema Grundfos

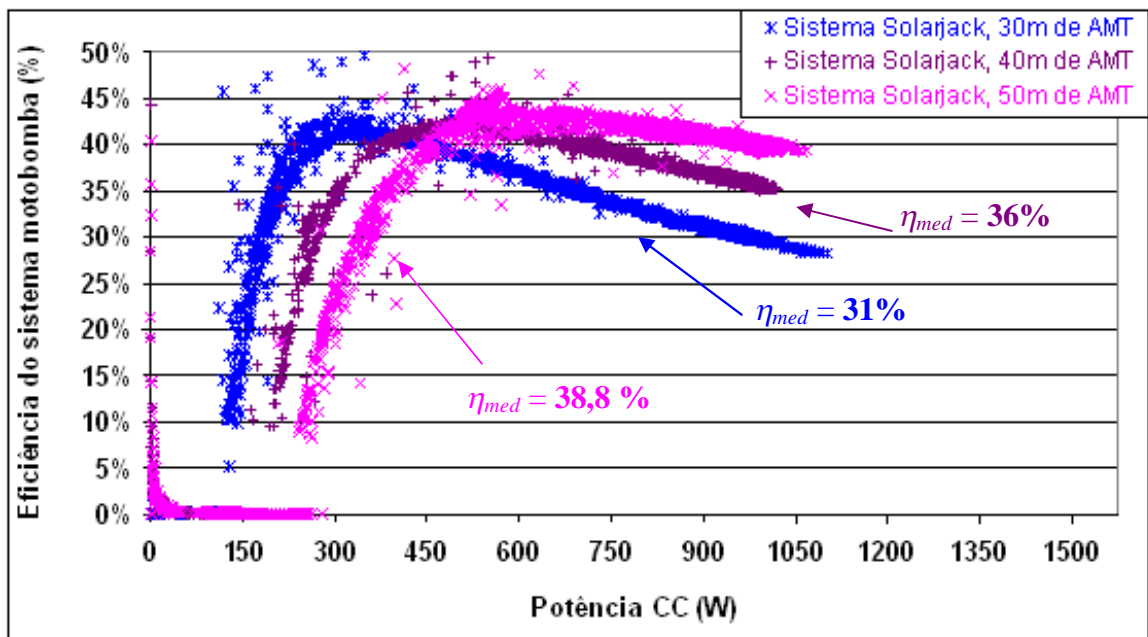


Figura 3. 3: Curvas da eficiência em função da potência do gerador fotovoltaico, sistema Solarjack

Nas figuras 3.4 e 3.5, são apresentadas as curvas de vazão versus potência do gerador fotovoltaico, nas quais a vazão máxima atingida pelos sistemas é a seguinte: para 30 m de AMT, o sistema Grundfos bombeia $4,3 \text{ m}^3/\text{h}$ de vazão máxima e o sistema Solarjack bombeia

3,7 m³/h de vazão máxima. Para 40m de AMT, o sistema Grundfos bombeia 4,2 m³/h de vazão máxima e o sistema Solarjack, 3,3 m³/h de vazão máxima; e para 50 m de AMT, o sistema Grundfos bombeia 3 m³/h de vazão máxima e o sistema Solarjack, 3,1 m³/h de vazão máxima.

Do catálogo do sistema Grundfos foi obtida a vazão máxima instantânea para as potências similares às conseguidas nos ensaios. Esses valores são: para 30m de AMT, a vazão máxima é 4,3m³/h; para 40m de AMT, a vazão máxima é 4,3m³/h; e para 50m de AMT, a vazão máxima é 3m³/h. Verifica-se que a diferença dos resultados experimentais em relação aos indicados no catálogo do fabricante é mínima.

Além disso, para o sistema Solarjack pode-se constatar que os resultados experimentais da vazão máxima estão próximos dos valores indicados no catálogo do fabricante: para 30 m de AMT, é 3,6 m³/h; para 40 m de AMT, é 3,3 m³/h; e para 50 m de AMT, é 3 m³/h. Portanto, a diferença dos resultados experimentais em relação aos valores do catálogo é mínima.

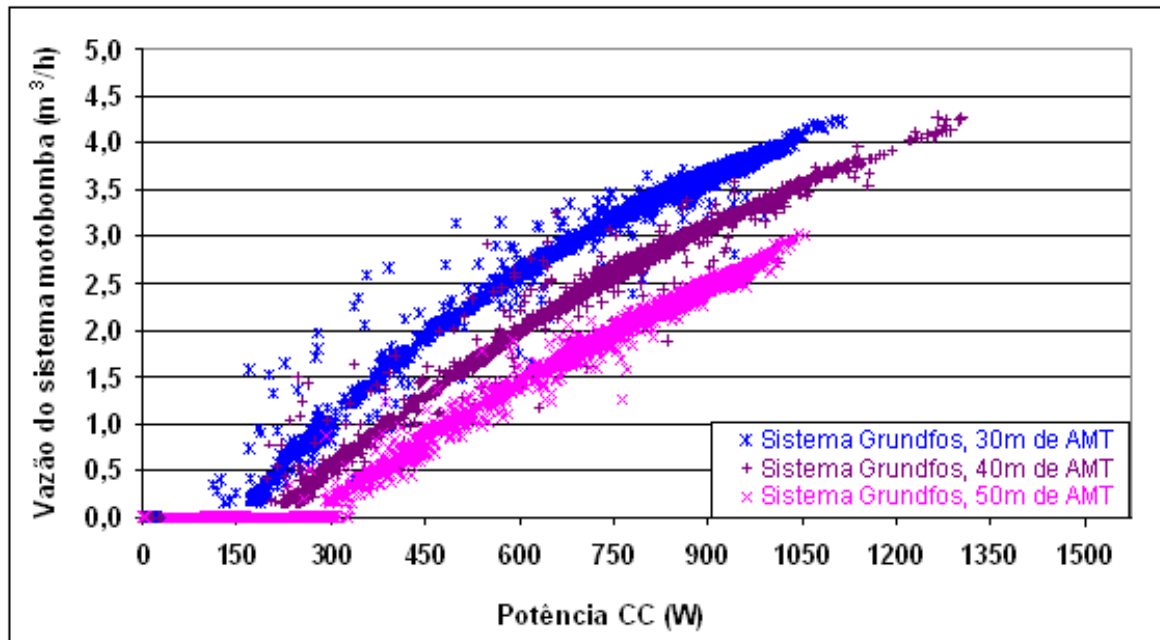


Figura 3. 4: Curvas de vazão em função da potência do gerador fotovoltaico, sistema Grundfos

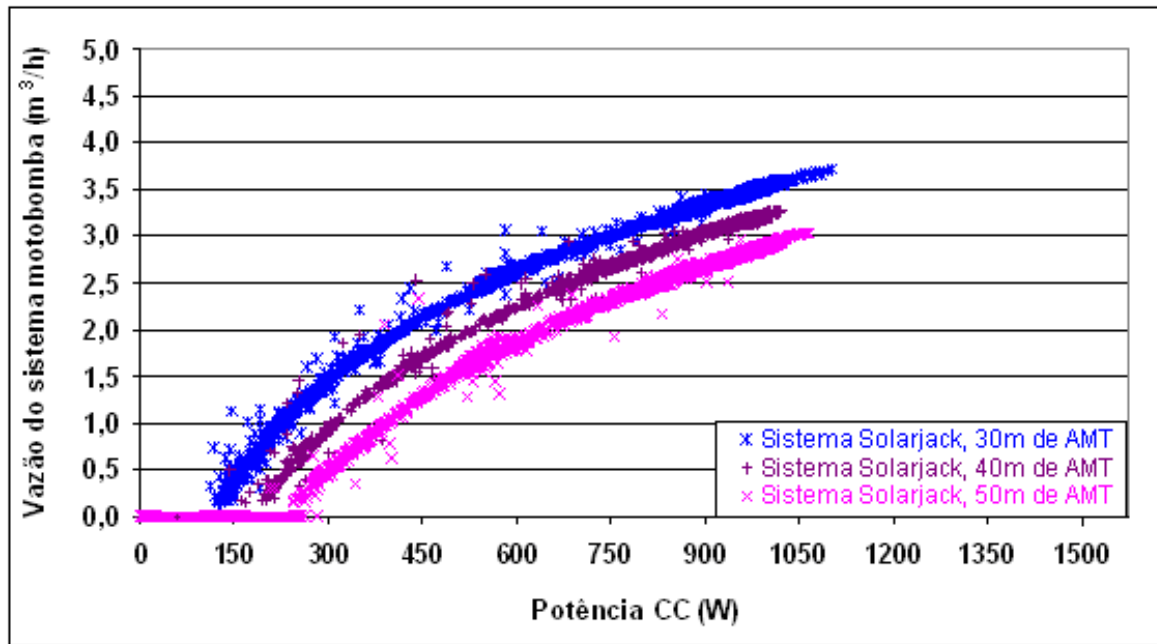


Figura 3. 5: Curvas de vazão em função da potência do gerador fotovoltaico, sistema Solarjack

3.2 Avaliação do sistema alternativo (equipamentos nacionais)

Em aplicações convencionais de bombeamento de água, as motobombas operam com frequência constante o tempo todo. Isso permite comparar sem nenhuma dificuldade diferentes tipos de motobombas, bastando, para isso, comparar suas eficiências instantâneas na frequência constante da rede elétrica (50Hz ou 60Hz). Esses valores resultantes, em muitos casos, são apresentados nos catálogos e dados de placa do fabricante. Por exemplo, para um poço em particular, o bombeamento ótimo seria aquele que entrega a máxima eficiência para a altura correspondente de bombeamento. Já em sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água, a situação é diferente, pois a variabilidade diária da irradiância, o comportamento não-linear da eficiência e da vazão, assim como da altura manométrica e o tamanho do arranjo fotovoltaico são os parâmetros principais que afetam significativamente a confiabilidade e o desempenho do sistema. Desse modo, uma seleção exata e adequada do sistema alternativo composto de equipamentos nacionais não seria garantida se fossem levados em conta somente as características comerciais de cada motobomba.

Para caracterizar qualquer sistema alternativo (motobomba mais conversor de frequência), é necessária a utilização do volume corrigido, definido na equação (5); a eficiência diária, dada pela equação (6); e a eficiência diária corrigida, definido na equação

(7). As três equações são os indicadores mais significativos que permitem avaliar o desempenho, obtendo-se, assim, a correta seleção dos equipamentos.

A seguir, a motobomba selecionada para o teste a sol real é montada na bancada de ensaios, mas, antes da realização destes, verificam-se possíveis vazamentos de água. Após isso, configura-se o conversor de frequência da motobomba para manter constante a altura manométrica. Em seguida, energiza-se a bancada de ensaios e se regula o registro que estrangula a saída de água até fixá-lo em um valor em que a altura manométrica fique constante. Isso é feito com o objetivo de diminuir a potência da motobomba que mantém a altura manométrica constante, de tal forma que esta trabalhe com a menor potência possível, evitando-se assim o aquecimento excessivo do reservatório.

Finalmente, programa-se o timer para o acionamento automático da bancada, de maneira que esta seja ligada ao nascer do sol. O sistema operará por um período de 12 horas (6h00min até 18h00min).

3.2.1 Resultados experimentais do sistema alternativo

Os resultados experimentais do conjunto conversor de frequência mais motobomba são apresentados na tabela 3.2. As eficiências diárias para 20 m, 25 m, 30 m, 35 m e 40 m de AMT alcançaram valores próximos a 30%⁸, conseguindo-se, dessa forma, um desempenho aceitável. Porém, para as alturas manométricas de 45 m e 50 m, a eficiência diminuiu, atingindo valores de 23,2% e 22,7%, respectivamente. Portanto, com os resultados experimentais obtidos, pode-se comprovar que nem sempre o equipamento escolhido se comportará conforme condições apresentadas no catálogo do fabricante. Por outro lado, o volume medido diminuiu conforme se incrementa a altura manométrica.

As eficiências diárias corrigidas para a irradiação de referência (5 kWh/m²/dia) são menores que as eficiências diárias. Para 20, 25, 30, 35 m de AMT as eficiências diárias corrigidas estão na faixa de 24% a 26%, e para 40, 45 e 50 m de AMT as eficiências estão na faixa de 19% a 23%.

⁸ Recomenda-se 30% como valor de referência recomendável para a eficiência diária do conjunto motobomba em sistemas fotovoltaicos de bombeamento com bombas centrífugas.

Tabela 3. 2: Resultados experimentais do sistema Alternativo

<i>AMT</i>	<i>IGmed.</i>	<i>Qdmed.</i>	<i>Qdcorr.</i>	η_{med}	η_{cor}
20	5,82	34,9	30	28,4	24,1
25	5,88	30,4	25,8	31,1	25,9
30	5,16	21,4	20,7	28,4	24,9
35	6,18	21,8	17,6	30,3	24,7
40	5,84	16,3	13,9	27,6	22,3
45	5,98	13,0	10,9	23,2	19,7
50	6,16	12,6	10,3	22,7	20,7

AMT: Altura manométrica total (m)

IGmed: Irradiação medida (kWh/m²/dia)

Qdmed: Volume medido (m³/dia)

Qdcorr: Volume corrigido (m³/dia), para a irradiação de referência no plano gerador fotovoltaico, 5 kWh/m²/dia.

η_{med} : Eficiência diária do sistema motobomba (%).

η_{cor} : Eficiência diária corrigida do sistema motobomba (%), para a irradiação de referência no plano gerador fotovoltaico, 5 kWh/m²/dia.

Portanto, como para alturas manométricas acima de 40 m o sistema alternativo não consegue atingir uma eficiência diária perto dos 30%, recomenda-se selecionar outra motobomba de características diferentes. Por exemplo, a utilização de uma motobomba da mesma potência e maior número de estágios.

3.2.2 Curvas de irradiância e vazão do sistema alternativo

Os quatro ensaios experimentais são mostrados na figura 3.6, nos quais a curva de vazão varia em relação à curva da irradiância solar. Verifica-se também que as curvas do sistema alternativo se comportam de maneira similar às curvas do sistema Grundfos. Entretanto, nas figuras 3.6 (b) e (d) constata-se que houve presença de nuvens causadas pela sazonalidade. Apesar disso, ambas as curvas seguem a mesma trajetória em função do tempo. A irradiância solar crítica no momento de partida do bombeamento muda para cada altura manométrica. Isso acontece porque o motor necessita de diferentes intensidades de corrente durante a partida, sendo estas maiores quando as alturas manométricas são mais elevadas. Por exemplo, a 20 m, o sistema conversor de frequência mais motobomba requer 186 W/m² de irradiância; nesse ponto, o gerador fotovoltaico fornece corrente contínua de 0,77 amperes, que é a necessária para a partida do motor.

O acionamento da motobomba a 50 m de altura manométrica ocorre a 488 W/m^2 , e o gerador fotovoltaico fornece uma corrente contínua de 2,2 amperes, que nesse caso é a corrente crítica para a partida do motor.

Finalmente, pode-se ver que, ao final do bombeamento (período da tarde), a motobomba continua a operar com menor irradiância do que no início da partida (período da manhã), isso pelo fato de o motor necessitar de menos corrente, portanto, menos irradiância. Ao contrário do que acontece de manhã, quando a motobomba, para a partida, precisa de maior corrente, o que implica em maior irradiância.

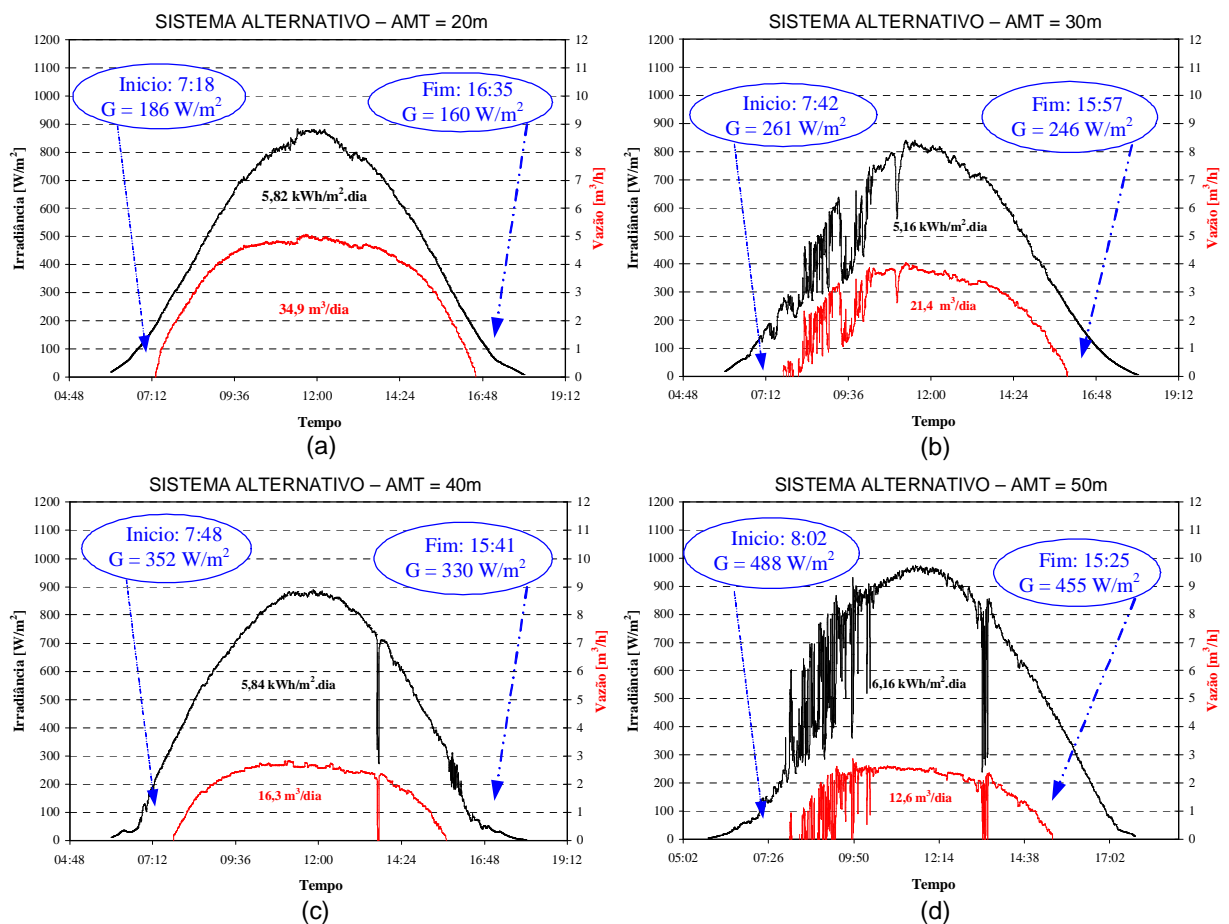


Figura 3. 6: Curvas de irradiância e vazão ao longo de um dia de bombeamento, sistema alternativo

3.2.3 Curvas de eficiência e vazão do sistema alternativo

As curvas de eficiência em função da potência elétrica do gerador fotovoltaico do sistema alternativo são apresentadas na figura 3.7, na qual são apresentados os resultados para quatro alturas manométricas totais de 20 m, 30 m, 40 m e 50 m. Os resultados indicam que,

para 20 m e 30 m de AMT, a eficiência diária atinge 28,4%; por outro lado, a eficiência máxima alcançou 31,55% e 35%, respectivamente. A 40 m, a eficiência diária atinge 27,6%, cujo nível ainda é aceitável, por estar perto da eficiência diária recomendável, 30%. Mas, para o teste realizado a 50 m, a eficiência diária chega a 22,7%, e a máxima atingida é 32%.

Pode-se constatar que, para os testes realizados, não é recomendável considerar os valores das eficiências do sistema motobomba (eficiências instantâneas) como indicadores para a escolha do conjunto motobomba mais conversor de frequência, por causa da instabilidade da irradiância ao longo do dia.

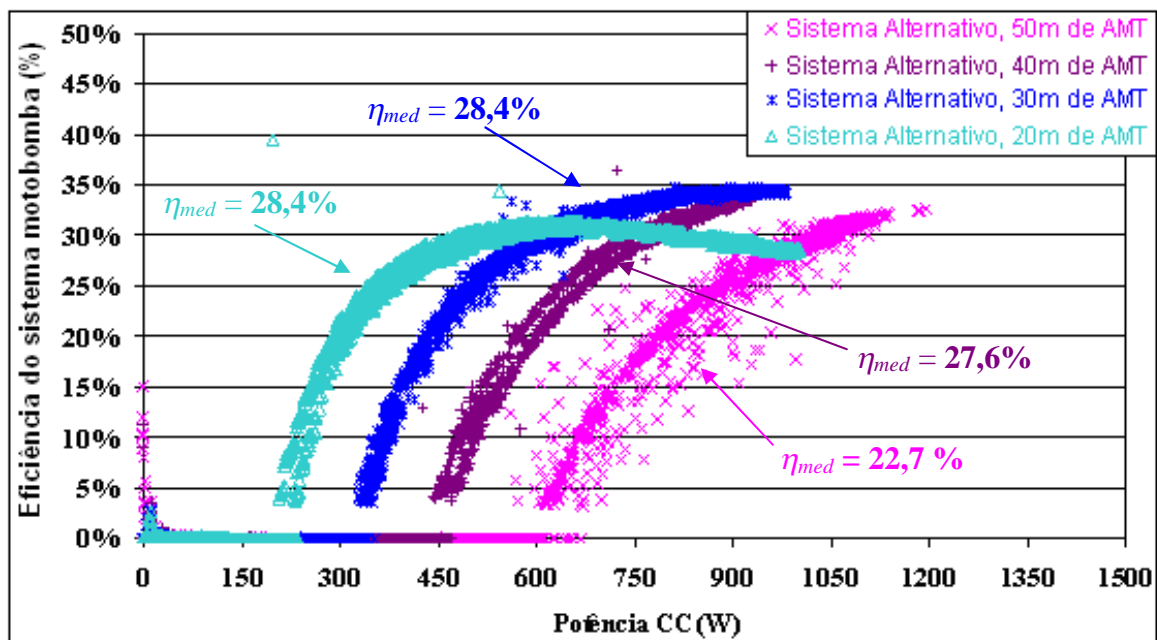


Figura 3. 7: Curvas da eficiência em função da potência do gerador fotovoltaico, sistema alternativo

Na figura 3.8 é apresentado o comportamento da vazão versus potência. Esse gráfico permite determinar a vazão máxima atingida pelo sistema alternativo para cada AMT testada. A partir daí, obtiveram-se os valores da vazão máxima para as condições de sol real. Para 20 m de AMT, a vazão máxima é 5 m³/h; para 30 m de AMT, a vazão máxima é 4 m³/h; para 40 m de AMT, a vazão máxima é 2,9 m³/h; e para 50 m de AMT, a vazão máxima é 2,8 m³/h. No entanto, esses valores são inferiores aos obtidos com a fonte CC; em que para 20m de AMT, a vazão máxima é 6,3 m³/h; para 30m de AMT é 5,7 m³/h; para 40m de AMT é 5,1 m³/h; e

para 50 m de AMT é 4,1 m³/h. Portanto, existe um descasamento das vazões máximas entre os resultados a sol real e os resultados com a fonte CC.

Além disso, na figura 3.8 pode-se ver a potência inicial do gerador fotovoltaico, o que indica o momento em que os sistemas começam a operar. A 20 m de AMT, o sistema alternativo entrou em operação a 245 W; a 30 m de AMT, o sistema alternativo começou a operar a 340 W; a 40 m de AMT, o sistema alternativo entrou em operação a 475 W; e a 50 m de AMT, o sistema alternativo entrou em operação a 625 W.

Finalmente, conclui-se que o melhor desempenho do sistema alternativo ocorre na faixa de 20 m a 40 m de AMT.

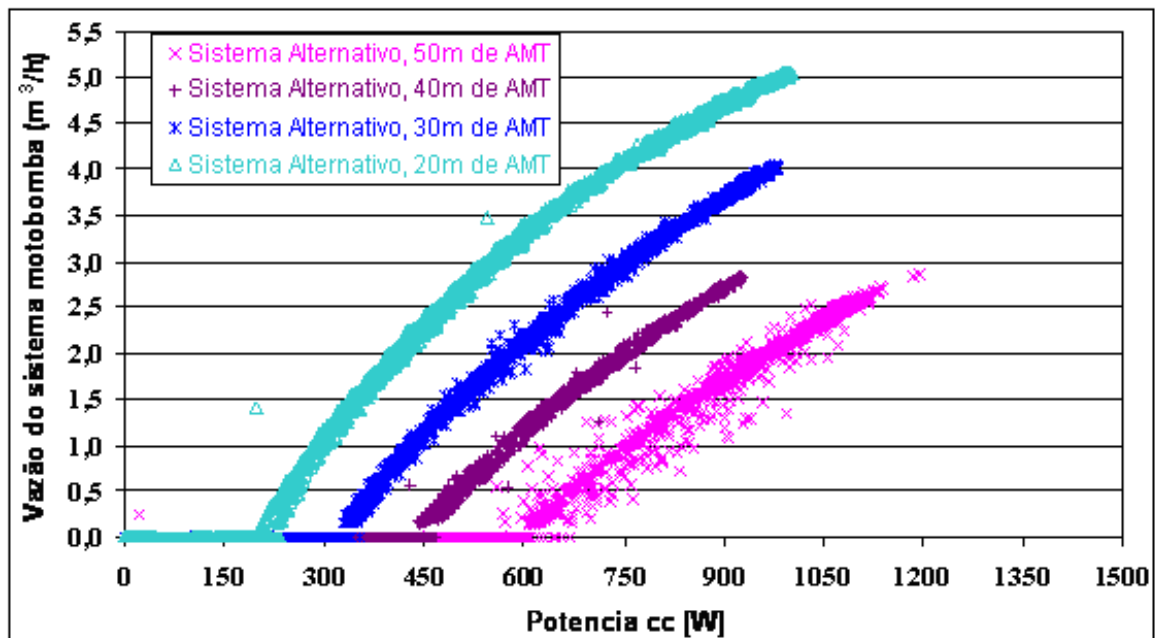


Figura 3. 8: Curvas da vazão em função da potência do gerador fotovoltaico, sistema alternativo

3.3 Comparações dos resultados dos três sistemas (Alternativo, Grundfos e Solarjack)

Com os resultados conseguidos nas avaliações realizadas nas seções 3.1 e 3.2, foi feita a comparação dos três sistemas avaliados.

A eficiência diária de conversão da irradiação solar para energia hidráulica de um sistema fotovoltaico de bombeamento varia em função das condições de trabalho do módulo fotovoltaico e do desempenho do sistema motobomba. Isso acontece, pois o desempenho

diário do módulo está relacionado diretamente com a variação da irradiação solar diária e, principalmente, com a temperatura de operação do módulo. E o desempenho diário do sistema motobomba está relacionado diretamente com a mudança da AMT e com as características da motobomba. Porém, a eficiência diária ótima de um sistema fotovoltaico de bombeamento é determinada por seus valores de eficiência diária ótima do módulo e do sistema motobomba. A tabela 3.3 apresenta uma síntese dos resultados obtidos nos ensaios do sistema alternativo e dos sistemas fotovoltaicos comerciais.

A partir dos resultados obtidos na avaliação técnica, constatou-se que a 30 m de AMT o volume corrigido do sistema alternativo é 1% menor do que o Grundfos e 7,3% maior do que o Solarjack. A 40 m de AMT, o volume corrigido do sistema alternativo é 14,2% menor do que o Grundfos e 21% menor do que o Solarjack. A 50 m, o volume corrigido do sistema alternativo é 21,4% menor do que o Grundfos e 34,8% menor do que o Solarjack.

Considerando 30% como valor de referência recomendável para a eficiência diária do sistema motobomba em sistemas fotovoltaicos de bombeamento com bombas centrífugas, pode-se constatar que a 30 m de AMT o sistema alternativo está 1,6 ponto percentual abaixo de 30%, o sistema Grundfos está 3,6 pontos percentuais acima de 30% e o sistema Solarjack 1 ponto percentual acima de 30%. A 40 m de AMT, o sistema alternativo está 2,4 pontos percentuais abaixo de 30%, o sistema Grundfos está 5,2 pontos percentuais acima de 30% e o sistema Solarjack está 6 pontos percentuais acima de 30%. A 50 m de AMT, o sistema alternativo está 7,3 pontos percentuais abaixo de 30%, o sistema Grundfos está 3,6 pontos percentuais acima de 30% e o sistema Solarjack está 8,8 pontos percentuais acima de 30%.

Ao se considerar a eficiência diária corrigida, para 30 m de AMT o sistema alternativo está 0,9 ponto percentual acima do sistema Grundfos e 2,8 pontos percentuais acima do sistema Solarjack, para 40 m de AMT o sistema alternativo está 2,5 pontos percentuais abaixo do sistema Grundfos e 4,6 pontos percentuais abaixo do sistema Solarjack, e para 50 m de AMT o sistema alternativo está 4,4 pontos percentuais abaixo do sistema Grundfos e 9,5 pontos percentuais abaixo do sistema Solarjack. Portanto, para a irradiação de referência e 30m de AMT o sistema alternativo tem maior desempenho do que os sistemas importados, e para 40 e 50 m de AMT o desempenho do sistema alternativo diminui em relação aos sistemas importados dedicados a tecnologia fotovoltaica.

A partir desses resultados, pode-se dizer que o efeito da AMT sobre a eficiência diária dos sistemas testados é significativo.

Tabela 3. 3: Resultados experimentais das motobombas SOMAR, GRUNDFOS e SOLAJARCK

MOTOBOMBA SOMAR: BMSAF-407 / 1,0-8 (1500Wp – 20sx1p) (Dados mês de setembro - outubro 2007)						MOTOBOMBA GRUNDFOS: SP3A-10 (1575Wp – 7sx3p) (Dados mês de março 2008)					MOTOBOMBA SOLARJACK (Sun Pumps): SCS10-230 (1575Wp – 7sx3p) (Dados mês de março - abril 2008)				
AMT	IGmed	Qdmed	Qdcor	η_{med}	η_{cor}	IGmed	Qdmed	Qdcor	η_{med}	η_{cor}	IGmed	Qdmed	Qdcor	η_{med}	η_{cor}
30	5,16	21,4	20,7	28,4	24,9	6,79	28,30	20,9	33,6	24,0	6,12	23,63	19,3	31,0	22,1
40	5,84	16,3	13,9	27,6	22,3	6,27	20,28	16,2	35,2	24,8	6,04	21,24	17,6	36,0	26,9
50	6,16	12,7	10,3	22,7	20,7	6,22	16,31	13,1	33,6	25,1	6,28	19,86	15,8	38,8	30,2

AMT: Altura manométrica total (m)

IGmed: Irradiação medida (kWh/m²/dia)

Qdmed: Volume medido (m³/dia)

Qdcor: Volume corrigido (m³/dia), para a irradiação de referência no plano gerador fotovoltaico, 5 kWh/m²/dia.

η_{med} : Eficiência diária do sistema motobomba (%).

η_{cor} : Eficiência diária corrigida do sistema motobomba (%), para a irradiação de referência no plano gerador fotovoltaico, 5 kWh/m²/dia.

O sistema alternativo opera em condições ideais para as alturas manométricas totais de 30 m e 40 m, enquanto os sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica têm excelente desempenho para as três AMT. Considerando-se os parâmetros de referência da seção 2.1, utilizados para realizar as comparações respectivas, o sistema alternativo e o sistema Grundfos não cumprem com os requerimentos de volume de água corrigido para 50 m de AMT. No entanto, ao se considerar os custos de reposição de equipamentos (a serem tratados no capítulo 4), o sistema alternativo torna-se viável em relação aos dedicados à tecnologia fotovoltaica.

Apesar de os equipamentos do sistema alternativo serem menos eficientes, seu custo, tecnologia sólida e fácil reposição garantem sua confiabilidade, tanto técnica, econômica, como socialmente. Muitas vezes, sistemas fotovoltaicos de bombeamento que usam equipamentos dedicados à fotovoltaica, os quais ficam em poder de comunidades locais, tornam-se inoperantes pela falta de equipamentos de reposição. Os equipamentos alternativos são uma solução segura, porque podem ser adquiridos com facilidade no mercado local.

Atualmente, no mercado brasileiro, os sistemas Solarjack deixaram de ser comercializados (no exterior se comercializam com o nome de Sun Pumps), por causa dos altos custos de importação e pela consolidação, universalização e constante desenvolvimento da tecnologia das motobombas em corrente alternada. Portanto, atualmente, o sistema utilizado é o Grundfos, mas ele vem perdendo espaço no mercado para os sistemas alternativos.

CAPÍTULO 4

AVALIAÇÃO ECONÔMICA E FINANCEIRA

Este capítulo apresenta a avaliação econômica e financeira dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento (alternativo e dedicados à tecnologia fotovoltaica). Embora a tecnologia de sistemas de bombeamento de água, além da solar, abranja uma faixa enorme de diferentes usos de fontes de energia, como as convencionais (elétrica, Diesel e gasolina) e não-convencionais (eólica e biomassa) para o acionamento de motobombas, estudos econômicos e comparativos da tecnologia fotovoltaica para aplicações de bombeamento de água, em relação ao uso de combustíveis de origem fóssil e da energia elétrica, realizados por Fedrizzi (1997), demonstram que a tecnologia fotovoltaica torna-se adequada em áreas remotas e afastadas da rede elétrica convencional. Além disso, em Cota Espericueta (2004) encontramos um exemplo de análise real do custo de ciclo vida de um sistema fotovoltaico de bombeamento versus um sistema a Diesel, no qual o sistema fotovoltaico é altamente competitivo, como se pode ver na figura 4.1.

Por outro lado, a Sandia National Laboratories (2001) afirma que os sistemas eólicos de bombeamento são competitivos frente aos sistemas fotovoltaicos de bombeamento, quando o produto do volume necessário por dia multiplicado pela altura manométrica total ($V \times AMT$)⁹ é superior a 1.500 m^4 . Mas isso vai depender muito do recurso eólico de cada região, além de uma análise rigorosa do custo de ciclo de vida. Contudo, isso não faz parte do objetivo desta dissertação.

As ferramentas matemáticas para avaliar sistemas fotovoltaicos de bombeamento são as figuras-de-mérito extraídas da dissertação e tese de Fedrizzi (1997) e Brito (2006) respectivamente.

⁹ Produto do volume diário necessário multiplicado pela altura manométrica total, as unidades desse produto ($\text{m}^3 \times \text{m}$) são m^4/dia , que na verdade é diretamente proporcional ao requerimento diário de energia.

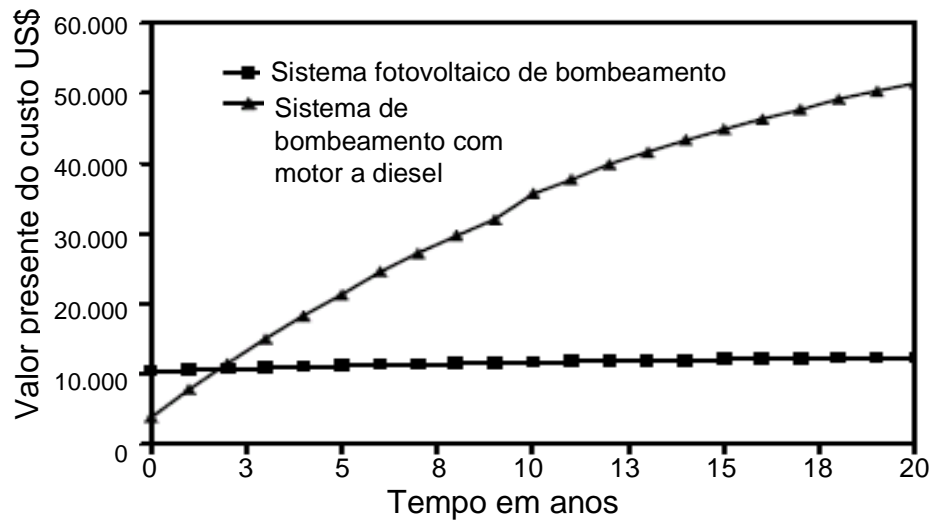


Figura 4. 1: Análise econômica do custo de ciclo de vida de um sistema de bombeamento fotovoltaico versus um sistema a Diesel

Fonte: Cota Espericueta, 2004

4.1 Figuras-de-mérito

Com os resultados obtidos no capítulo de avaliação de desempenho dos sistemas, é feita a análise econômica e financeira dos dois sistemas. Empregam-se, para isso, o custo de ciclo de vida, custo de ciclo de vida anualizado, custo do volume bombeado e o custo do volume específico bombeado.

4.1.1 Custo do ciclo de vida (CCV)

O custo de ciclo de vida de uma alternativa de investimento representa a soma de todas as despesas efetuadas ao longo da vida-útil do projeto e trazidas para o valor presente. Além disso, determina o custo total do investimento levando-se em conta o valor do dinheiro no tempo, em função da taxa de desconto utilizada. A equação (7) mostra os parâmetros utilizados para a avaliação.

$$CCV = I_o + O \& M \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i * (1+i)^n} \right) + CMB * (1+i)^{-N_{MB}} + CCP * (1+i)^{-N_{CP}} + CQE * (1+i)^{-N_{QE}} + CCE * (1+i)^{-N_{CE}}, \quad (7);$$

em que I_o é o investimento inicial para a compra do sistema de bombeamento, $R\$$; $O\&M$ é o custo de operação e manutenção, $R\$$; i é a taxa de desconto anual, %; n é a vida-útil, *anos*; CMB é o custo da motobomba, $R\$$; CCP é o custo do dispositivo de condicionamento de potência, $R\$$; CQE é o custo do quadro elétrico, $R\$$; CCE é o custo do cabo elétrico, $R\$$; N_{MB} é a vida-útil da motobomba, *anos*; N_{CP} é a vida-útil do dispositivo de condicionamento de potência, *anos*; N_{QE} é a vida-útil do quadro elétrico, *anos*; e N_{CE} é a vida útil do cabo elétrico, *anos*.

4.1.2 Custo do ciclo de vida anualizado (CCVA)

O custo do ciclo de vida anualizado, $R\$/ano$, de um projeto é determinado pela soma entre os gastos iniciais anualizados do projeto e todos os gastos, também anualizados, efetuados ao longo de sua vida-útil. Representa as parcelas constantes de pagamento anual que devem ser efetuadas para a sustentação dos projetos ao longo de sua vida-útil. Matematicamente, o CCVA pode ser determinado anualizando-se o CCV, a uma determinada taxa de retorno ao longo do período de vida do investimento, tal como se expressa na equação (8).

$$CCVA = CCV * FRC, \quad (8);$$

em que FRC é o fator de recuperação de capital, índice pelo qual o investimento total do projeto é recuperado anualmente em função de uma determinada taxa de desconto, i , dentro de seu período de vida-útil; esta se expressa pela equação (9).

$$FRC = \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}}, \quad (9)$$

4.1.3 Custo do volume bombeado (CVB)

O custo unitário do volume bombeado, $R\$/m^3$, para cada sistema utilizado, é determinado pelo custo anual do projeto dividido pelo volume bombeado ao longo de um ano; é dado pela equação (10).

$$CVB = \frac{CCVA}{VBa} , \quad (10)$$

em que VBa é o volume bombeado por ano, m^3/ano .

4.1.4 Custo do volume específico bombeado (CVEB)

O custo do volume específico bombeado, $R\$/m^4$, avalia diferentes tecnologias de bombeamento para situações que envolvam diferentes alturas manométricas e volumes bombeados corrigidos. Portanto, o CVEB é dado pela equação (11).

$$CVEB = \frac{CVB}{AMT} , \quad (11)$$

em que CVB é o custo do volume bombeado, $R\$/m^3$; e AMT é a altura manométrica total, m .

4.2 Avaliação econômica

Como se mencionou no capítulo 1, os sistemas fotovoltaicos apresentam uma tecnologia consolidada, com uma vida-útil do módulo fotovoltaico de 25 anos. Além disso, a experiência revela a existência de módulos que atingem vida-útil de 30 anos. Com isso, na prática, os sistemas fotovoltaicos de bombeamento deveriam operar durante esse período de tempo sem apresentar falhas.

O dispositivo de condicionamento de potência mais conjunto motobomba deveria ser trocado após de certo período de operação que pode variar de 5 a 10 anos, tal como é apresentado em diversos projetos de bombeamento fotovoltaico (BARLOW, 1993; GHONEIM, 2005).

No entanto, existem diversas incertezas sobre a vida-útil do módulo, assim como do sistema motobomba. Por exemplo, os módulos podem ser danificados por vandalismo, sendo que este fato não está previsto nos custos de ciclo de vida, assim como as incertezas que se podem produzir no sistema motobomba, como, por exemplo, equipamentos indevidamente instalados, que trariam como consequência estragos prematuros.

Por outro lado, em entrevista realizada com profissionais da empresa Instaladora de Redes Elétricas Real¹⁰, que atua na área de fornecimento, manutenção e instalação de motobombas submersas trifásicas na região do Pontal do Paranapanema, conseguiu-se estabelecer o período de troca das motobombas. Segundo eles, a troca da motobomba é realizada em média a cada cinco anos.

A taxa de desconto empregada para a avaliação econômica foi considerada em 12% ao ano. Outras taxas de desconto não foram consideradas. No entanto, na figura 4.2 é apresentado o comportamento do CVB para 30 de AMT e ciclo de vida de 25 anos, em função das diferentes taxas de desconto. Nessa figura, pode-se ver que, para menores taxas de desconto, o CVB tende a diminuir e, para maiores taxas, tende a subir; tendências similares acontecem com o restante das alturas manométricas.

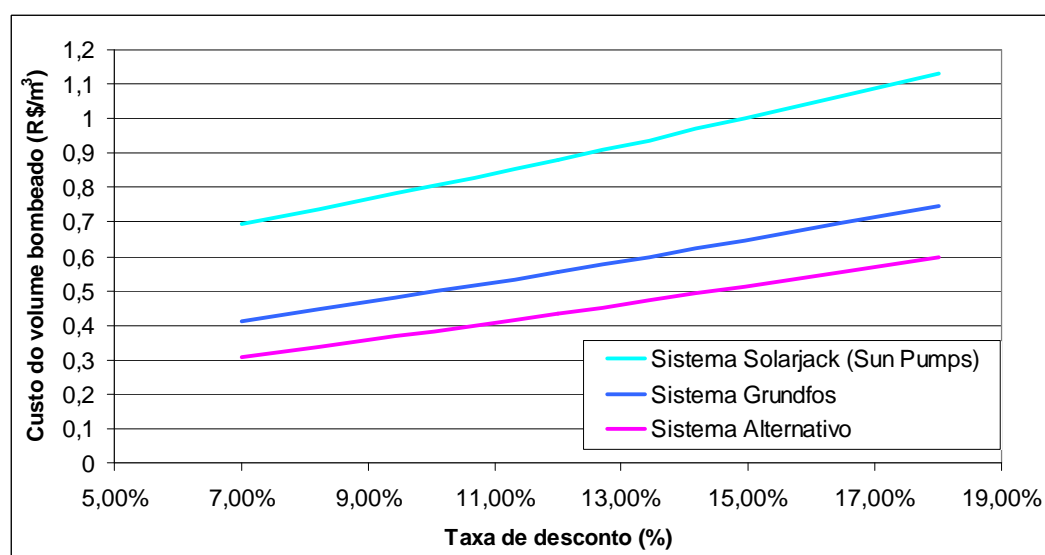


Figura 4. 2: Custo do volume bombeado em função das diferentes taxas de desconto, exemplo para 30 m de AMT e ciclo de vida de 25 anos

Para realizar a avaliação econômica, precisa-se conhecer os preços dos dispositivos e equipamentos no mercado brasileiro. Segundo informações da Kyocerasolar¹¹, o preço do módulo fotovoltaico está em torno de R\$ 13,5/Wp. Entretanto, segundo a IEA-PVPS¹², o preço internacional está por volta de US\$ 4,6/Wp; esse valor é mais caro do que o preço

¹⁰ Instaladora de Redes Elétricas Real Ltda. Rua Mário Angelo Sereghetti, 1322, Pirapozinho, SP. Visita de campo em 15 de maio de 2008.

¹¹ Kyocerasolar, 2007. isabelle.loys@kyocerasolar.com.br. Recebido em 26 de fev. 2008. Cotação em 26 de fev. US\$ 1,00 = R\$ 1,68

¹² Trends in Photovoltaic Application, 2007. http://www.iea-pvps.org/products/download/rep1_16.pdf: Acesso em 08 de abril de 2008.

estimado em 2004, que era de US\$ 3,5/Wp. Isso se deve aos efeitos sobre os custos e preços causados pela dinâmica da demanda do mercado (procura de módulos fotovoltaicos, sobretudo para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica), já que, no período de 2004 a 2006, o mercado fotovoltaico dobrou de tamanho em comparação aos anos anteriores (IEA-PVPS, 2007); contribuem também para esse aumento a limitada reposição do estoque de silício grau solar (silício com refinamento ligeiramente menor do que o grau eletrônico) e a concorrência na indústria. É preciso ainda observar que a maior parte dos custos de produção dos módulos fotovoltaicos se deve também aos materiais exigidos, tais como o alumínio, cobre e outros minérios, que na verdade não foram estocados prudentemente pelas empresas. Assim, elas não puderam garantir as matérias-primas necessárias, as quais são compradas num mercado aberto, a custos elevados.

Foram solicitadas cotações dos preços das motobombas dedicadas à tecnologia fotovoltaica no mercado brasileiro. Somente foi encontrado o preço do sistema Grundfos¹³; o preço da motobomba SP 3A-10 é R\$ 3.200,00; e o preço do dispositivo de condicionamento de potência controlador SA 1500 é R\$ 3.300,00. Não foram encontrados preços do sistema SolarJack (Sun Pumps), pelo fato de este não ser mais comercializado pelos revendedores. Porém, teve-se que fazer uma estimativa de seu valor de venda no Brasil a partir dos preços FOB¹⁴. A motobomba SCS 10-230 atualmente é fabricada e comercializada pela Sun Pumps. Segundo a página web do fabricante da Sun Pumps¹⁵, o preço FOB da motobomba SCS 10-230 é US\$ 2.600,00; e o preço do dispositivo de condicionamento de potência controlador PCB 180 é US\$ 696,00. Portanto, para se obter o preço final do sistema Solarjack (Sun Pumps) no mercado brasileiro, deve ser feita uma avaliação do preço de venda.

Além disso, para estimar o preço de venda do sistema SolarJack (Sun Pumps), precisa-se conhecer algumas taxas. O fabricante recomenda uma taxa de transporte e seguro de 10% do FOB; a taxa das despesas com alfândega é estimada em 10% do FOB; e uma taxa para *os impostos de importação* em torno de 20% do FOB. Além disso, devem-se contemplar as

¹³ Solaris, 2008. Hélio R. Alves solaristecno@uol.com.br: Recebido em 10 de abr. 2008.

¹⁴ Free on bord – “Livre a bordo” (Significa que o vendedor responde pela mercadoria até que ela transponha a amurada do navio no porto de embarque e, a partir de aí o comprador é responsável pelo transporte, seguro da carga e outros custos e riscos). http://en.wikipedia.org/wiki/Free_On_Board: Acesso em 11 de abr 2008.

¹⁵ Fabricante de equipamentos para sistemas fotovoltaicos de bombeamento. <http://www.sunpumps.com/ProductsClient.aspx?ProductRootNodeId=54&ProductRootNodeText=Solar%20Pumps>. Acesso em 04 de maio de 2009. Cotação em 04 de mai. US\$ 1,00 = R\$ 2,13

porcentagens das despesas fixas e variáveis e do lucro líquido. A estimativa do preço de venda é expressa pela equação (12)¹⁶.

$$\text{Preço de Venda} = \frac{(\text{FOB} + \text{Transp. e Seguro} + \text{Alfândega} + \text{Impostos Importação})}{100 - (\text{Despesas Fixas} + \text{Despesas Variáveis} + \text{Lucro Líquido})} (\text{R\$}), \quad (12)$$

Despesas Fixas: são as despesas realizadas pela empresa, independentemente do volume de vendas, tais como: aluguel, salários e encargos, água, luz, telefone, manutenção, depreciação, contador, pró-labore, etc. Estima-se em 15% do faturamento previsto.

Despesas Variáveis: são as despesas realizadas e que dependem do volume de vendas, tais como: impostos sobre vendas (ICMS, Programa de Integração Social, Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social, Imposto de Renda, Contribuição Social ou Simples), comissões sobre vendas, etc. Estima-se em 7% do faturamento, sem considerar o ICMS¹⁷.

A legislação tributária brasileira isenta do ICMS os componentes e equipamentos para o aproveitamento das energias solar e eólica, isto segundo o convênio ICMS 101/97, de 12 de dezembro de 1997, modificado pelo convênio ICMS 46, de 18 de abril de 2007 (DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2007), em que as motobombas em corrente contínua até 2HP estão classificadas pela NBM/SH¹⁸ com o código 8413.81.00. Por conseguinte, a motobomba Solarjack (Sun Pumps) e seu dispositivo de condicionamento de potência estão contemplados dentro de essa legislação.

Considerando-se um lucro líquido de 10%, o valor de preço de venda do sistema Solarjack (Sun Pumps) no mercado brasileiro fica em torno de R\$ 13.463,91 (motobomba SCS 10-230, R\$ 10.620,80; e PCB-180, R\$ 2.843,11), considerando-se US\$ 1 = R\$ 2.13 (em 04 de maio de 2009).

Em relação ao sistema alternativo, as pesquisas realizadas apresentaram os seguintes preços: motobomba SOMAR¹⁹ BMSAF-407/ 1,0-8, R\$ 1.665,00, e conversor de frequência WEG²⁰ CFW-1CV/220V, R\$ 590,00.

¹⁶ Fórmula para o cálculo do preço de venda, obtida da SEBRAE/SP, site: www.sebraesp.com.br :Acesso em 8 de abril de 2008.

¹⁷ Imposto sobre circulação de mercadorias e prestação de serviços.

¹⁸ Nomenclatura Brasileira de Mercadorias / Sistema Harmonizado.

¹⁹ Portal das motobombas hidráulicas Ltda. www.somar.com.br. Recebido em: abril de 2008.

²⁰ Eletro Buscarioli Ltda. www.buscarioli.com.br. Recebido em: abril de 2008.

Os custos de operação e manutenção de um sistema fotovoltaico de bombeamento são difíceis de estimar com precisão, pois variam em função da região ou lugar de instalação, tipo de transporte e pessoal qualificado, no entanto, em Barlow (1993) e em Sandia National Laboratories (2001), os custos de operação e manutenção ao ano são considerados aproximadamente entre 1% e 3% do custo do investimento inicial do sistema instalado. Essas porcentagens só podem ser obtidas e avaliadas na maioria dos casos mediante experiências realizadas em campo. Portanto, não serão consideradas no presente trabalho.

As tarefas que geralmente são executadas para obter-se o bom desempenho do sistema fotovoltaico de bombeamento estão mais ligadas ao módulo fotovoltaico, como, por exemplo: manter limpa a superfície do módulo, mediante a limpeza semanal empregando-se um pano úmido; verificação periódica dos quadros elétricos e circuitos, utilizando-se um multímetro, se necessário; e lubrificação das partes em movimento, se for requerido.

Nesta dissertação, só serão considerados os custos de reposição da motobomba e do dispositivo de condicionamento de potência.

Na tabela 4.1 são apresentados os preços dos equipamentos da configuração alternativa e das configurações dedicadas à tecnologia fotovoltaica, e o custo do investimento inicial de cada sistema para cada AMT.

Nesta Tabela, pode-se constatar que o preço do arranjo fotovoltaico da configuração alternativa representa 88% do investimento inicial e os equipamentos representam apenas o 12% desse investimento. Já no caso dos sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica, o preço do arranjo fotovoltaico representa 76% (sistema Grundfos) e 61% (sistema Solarjack) do investimento inicial e os equipamentos representam 24% (sistema Grundfos) e 39% (sistema Solarjack) desse investimento.

Tabela 4. 1: Preços dos equipamentos no mercado brasileiro e custo do investimento inicial de cada sistema

	Alternativo	Grundfos	Solarjack (Sun Pumps)
Preço do módulo (R\$/Wp)	13,50	13,50	13,50
Preço total do arranjo Fotovoltaico (R\$)	20.250,00	21.262,50	21.262,50
Preço da motobomba (R\$)	1.665,00	3.200,00	10.620,80
Preço do dispositivo de condicionamento de potência (R\$)	590,00	3.300,00	2.843,11
Preço do quadro elétrico com dispositivos de controle (R\$)	450,00	0,00	0,00
Preço do cabo elétrico (R\$/m)	3,70	3,70	3,70
Investimento inicial (Io), para 30m de AMT (R\$)	23.103,00	27.910,50	34.874,41
Investimento inicial (Io), para 40m de AMT (R\$)	23.140,00	27.947,50	34.911,41
Investimento inicial (Io), para 50m de AMT (R\$)	23.177,00	27.984,50	34.948,41

Nas subseções 4.2.1 e 4.2.2 são realizadas as avaliações econômicas, para as quais se estabelecem dois cenários. O primeiro cenário considera um ciclo de vida do sistema fotovoltaico de bombeamento de 25 anos e o segundo cenário considera um ciclo de vida do sistema fotovoltaico de bombeamento de 30 anos.

4.2.1 Figuras-de-mérito da análise econômico-financeira para um ciclo de vida de 25 anos

Na tabela 4.2, são apresentados os resultados das figuras-de-mérito do custo de ciclo de vida, o custo de ciclo de vida anualizado, o custo de ciclo de vida bombeado e o custo do volume específico bombeado, para as alturas manométricas de 30 m, 40 m e 50 m. Além disso, é apresentado o custo do ciclo de vida anualizado da reposição dos equipamentos. As figuras-de-mérito foram avaliadas considerando-se uma taxa de desconto de 12% ao ano.

A vida-útil do módulo fotovoltaico é de 25 anos e o período da reposição dos equipamentos é: motobomba, a cada 5 anos; dispositivo de condicionamento de potência, a cada 10 anos; quadro elétrico com dispositivos de controle, a cada 10 anos; e cabo elétrico da motobomba até o dispositivo de condicionamento de potência, a cada 10 anos.

Tabela 4. 2: Figuras-de-mérito da análise econômico-financeira, taxa de desconto 12%a.a. e 25 anos

	Alternativa	Grundfos	Solarjack (Sun Pumps)
30 metros			
Volume bombeado na irradiação de referência (m ³)	20,7	20,9	19,3
CCV (R\$)	25.566,31	33.140,55	48.635,09
CCVA (R\$)	3.259,70	4.225,42	6.200,97
Custo anual para reposição dos equipamentos (R\$)	314,07	666,83	1.754,49
CVB (R\$/m ³)	0,43	0,55	0,88
CVEB (R\$/m ⁴)	0,014	0,018	0,029
40 metros			
Volume bombeado na irradiação de referência (m ³)	13,9	16,2	17,6
CCV (R\$)	25.619,05	33.193,30	48.687,84
CCVA (R\$)	3.266,43	4.232,14	6.207,70
Custo anual para reposição dos equipamentos (R\$)	316,08	668,84	1.756,49
CVB (R\$/m ³)	0,64	0,72	0,97
CVEB (R\$/m ⁴)	0,016	0,018	0,024
50 metros			
Volume bombeado na irradiação de referência (m ³)	10,3	13,1	15,8
CCV (R\$)	25.671,80	33.246,05	48.740,59
CCVA (R\$)	3.273,15	4.238,87	6.214,42
Custo anual para reposição dos equipamentos (R\$)	318,09	670,85	1.758,50
CVB (R\$/m ³)	0,87	0,89	1,08
CVEB (R\$/m ⁴)	0,017	0,018	0,022

Na figura 4.3 é apresentado um gráfico de colunas do custo do volume bombeado para uma taxa de desconto de 12 % a.a e período de análise de 25 anos. Para 30 m de altura manométrica, o CVB do sistema alternativo é 21,8% mais barato do que o sistema Grundfos e 51% mais barato do que o sistema Solarjack; para 40 m de altura manométrica, o CVB do sistema alternativo é 11% mais barato do que o sistema Grundfos e 34% mais barato do que o

sistema Solarjack. Já para 50 m de AMT, o CVB do sistema alternativo é 2,3% mais barato do que o sistema Grundfos e 19,4% mais barato do que o sistema Solarjack..

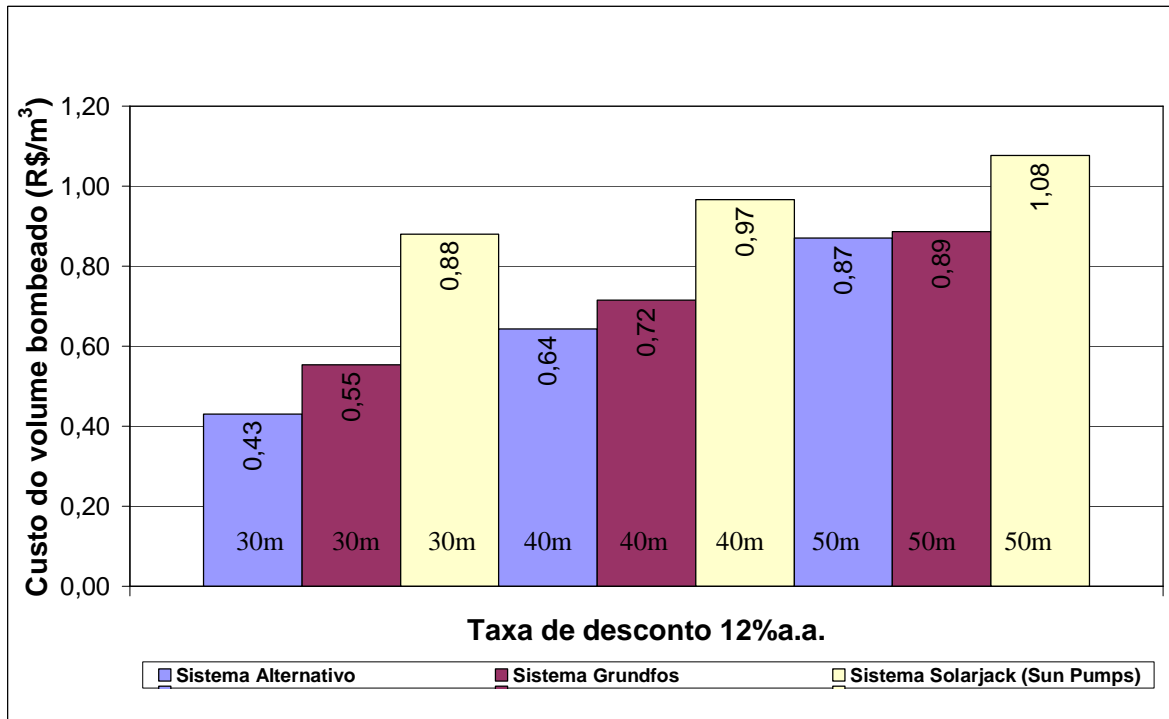


Figura 4. 3: Custo do volume bombeado, ciclo de vida, 25anos, para 30 m, 40 m e 50 m de AMT

Na figura 4.4 é apresentado um gráfico de colunas do custo do volume específico bombeado para uma taxa de desconto de 12% a.a. Para 30 m de altura manométrica, o CVEB do sistema alternativo é 22,2% mais barato do que o sistema Grundfos e 51,7% mais barato do que o sistema Solarjack; para 40 m de AMT, o CVEB do sistema alternativo é 11,1% mais barato do que o sistema Grundfos e 33,3% mais barato do que o sistema Solarjack; e para 50 m de AMT, o CVEB do sistema alternativo é 5,6% mais barato do que o sistema Grundfos e 22,7% mais barato do que o sistema Solarjack.

Finalmente, das figuras 4.3 e 4.4, constata-se que o sistema alternativo é economicamente competitivo para as alturas manométricas de 30, 40 e 50 m, em relação aos sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica. Alia-se a isto a sua fácil aquisição no mercado brasileiro e imediata reposição.

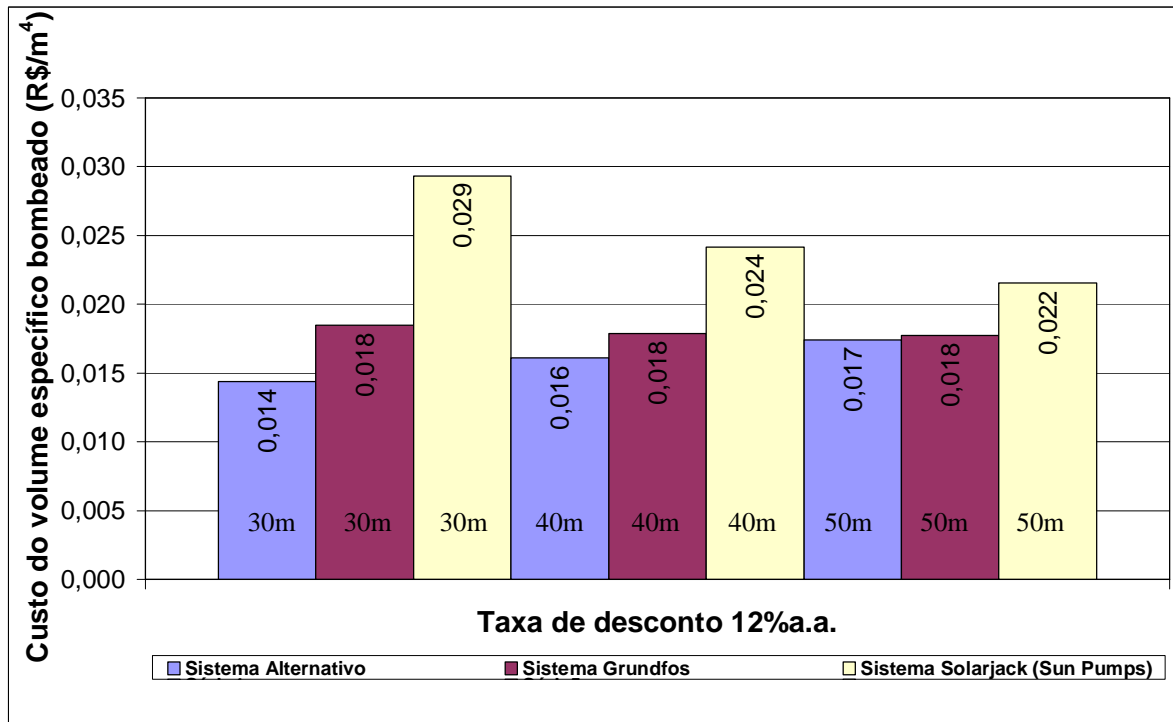


Figura 4. 4: Custo do volume específico bombeado, ciclo de vida, 25 anos, para 30 m, 40 m e 50 m de AMT

4.2.2 Figuras-de-mérito da análise econômico-financeira para um ciclo de vida de 30 anos

Na tabela 4.3 são apresentados os resultados das figuras-de-mérito do custo de ciclo de vida, o custo de ciclo de vida anualizado, o custo de ciclo de vida bombeado e o custo do volume específico bombeado, para as alturas manométricas de 30 m, 40 m e 50 m. Além disso, apresenta-se o custo do ciclo de vida anualizado da reposição dos equipamentos. As figuras-de-mérito foram avaliadas considerando-se uma taxa de desconto de 12% ao ano.

Neste cenário, se considera uma vida-útil do módulo fotovoltaico de 30 anos e o período de reposição dos equipamentos é: motobomba, a cada 5 anos; dispositivo de condicionamento de potência, a cada 10 anos; quadro elétrico com dispositivos de controle, a cada 10 anos; e cabo elétrico da motobomba até o dispositivo de condicionamento de potência, a cada 10 anos.

Tabela 4. 3: Figuras-de-mérito da análise econômico-financeira, taxa de desconto 12%a.a. e 30 anos

	Alternativa	Grundfos	Solarjack (Sun Pumps)
30 metros			
Volume bombeado na irradiação de referência (m ³)	20,7	20,9	19,3
CCV (R\$)	25.664,25	33.328,78	49.259,84
CCVA (R\$)	3.186,05	4.137,56	6.115,30
Custo anual para reposição dos equipamentos (R\$)	317,96	672,65	1.785,86
CVB (R\$/m ³)	0,42	0,54	0,87
CVEB (R\$/m ⁴)	0,014	0,018	0,029
40 metros			
Volume bombeado na irradiação de referência (m ³)	13,9	16,2	17,6
CCV (R\$)	25.717,00	33.381,53	49.312,59
CCVA (R\$)	3.192,60	4.144,11	6.121,85
Custo anual para reposição dos equipamentos (R\$)	319,92	674,60	1.787,82
CVB (R\$/m ³)	0,63	0,70	0,95
CVEB (R\$/m ⁴)	0,016	0,018	0,024
50 metros			
Volume bombeado na irradiação de referência (m ³)	10,3	13,1	15,8
CCV (R\$)	25.769,74	33.434,28	49.365,34
CCVA (R\$)	3.199,15	4.150,65	6.128,39
Custo anual para reposição dos equipamentos (R\$)	321,87	676,56	1.789,77
CVB (R\$/m ³)	0,85	0,87	1,06
CVEB (R\$/m ⁴)	0,017	0,017	0,021

Na figura 4.5 é apresentado em gráfico de colunas o custo do volume bombeado para uma taxa de desconto de 12 % ao ano e ciclo de vida de 30 anos. Neste caso, para 30 m de AMT, o CVB do sistema alternativo é 22% mais barato do que o sistema Grundfos e 51,7% mais barato do que o sistema Solarjack; para 40 m de AMT, o CVB do sistema alternativo é 10% mais barato do que o sistema Grundfos e 33,7% mais barato do que o sistema Solarjack;

e para 50 m de AMT, o CVB do sistema alternativo é 2,3% mais barato do que o sistema Grundfos e 19,8% mais barato do que o sistema Solarjack.

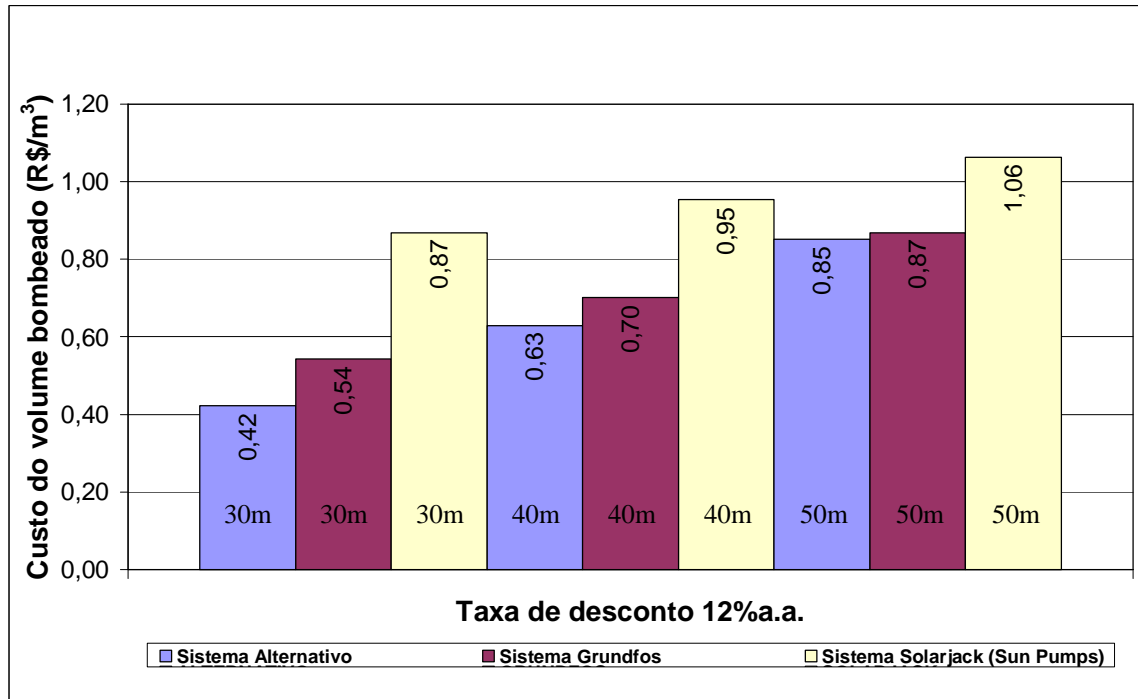


Figura 4. 5: Custo do volume bombeado, ciclo de vida 30 anos, para 30 m, 40 m e 50 m de AMT

Na figura 4.6 é apresentado o gráfico de colunas do custo do volume específico bombeado para uma taxa de desconto de 12% a.a. e período de análise do ciclo de vida de 30 anos. Para 30 m de AMT, o CVEB do sistema alternativo é 22% mais barato do que o sistema Grundfos e 51,7% mais barato do que o sistema Solarjack; para 40 m de AMT, o CVEB do sistema alternativo é 11% mais barato do que o sistema Grundfos e 33% mais barato do que o sistema Solarjack; e para 50 m de AMT, o CVEB do sistema alternativo é 2% mais barato do que o sistema Grundfos e 19% mais barato do que o sistema Solarjack.

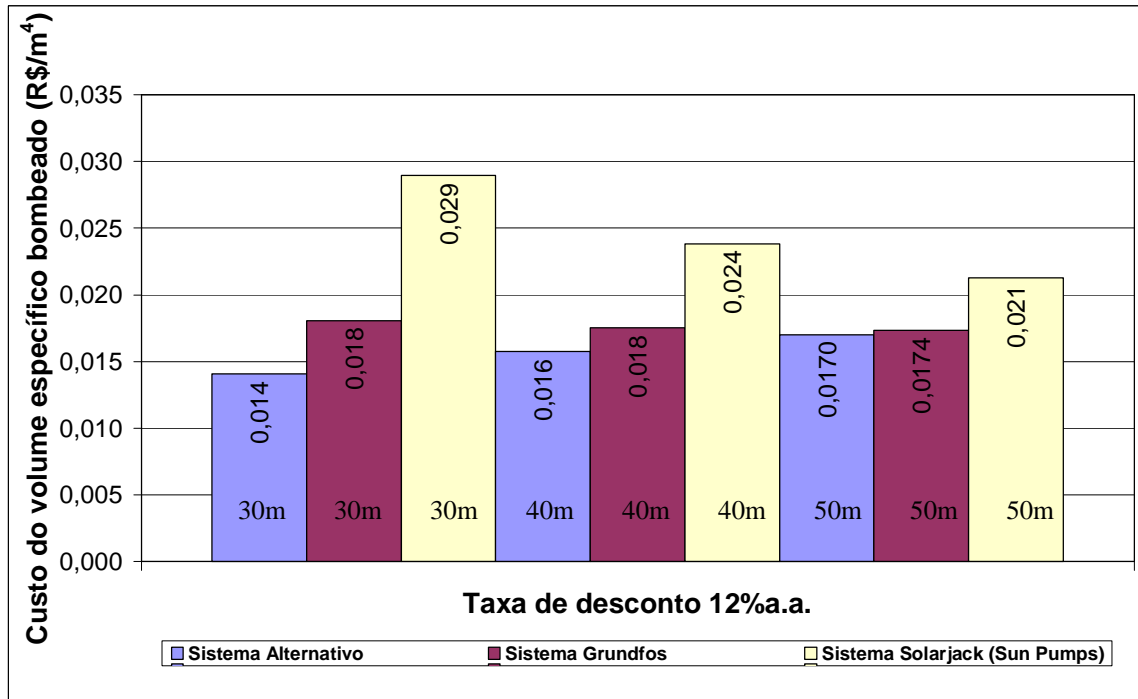


Figura 4. 6: Custo do volume específico bombeado, ciclo de vida 30 anos, para 30 m, 40 m e 50 m de AMT

A partir dos dados obtidos da análise econômico-financeira, pode-se constatar que, mesmo nas situações em que a eficiência diária da configuração alternativa é baixa, alturas manométricas na faixa de 40 m e 50 m, o custo do volume bombeado não apresenta diferenças significativas, nem o custo do volume específico bombeado. Portanto, a configuração alternativa é competitiva, garantindo assim a reposição dos equipamentos em caso de falhas. Dessa forma, se estará fomentando o encorajamento do uso de sistemas fotovoltaicos de bombeamento.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

1. Conclusões

O desempenho do sistema alternativo e dos dedicados à tecnologia fotovoltaica foi avaliado mediante a comparação da eficiência diária de cada sistema e mediante a comparação do volume bombeado nas condições de referência, 5 kWh/m²/dia. Salienta-se que o resultado da eficiência instantânea de cada sistema não é um bom indicador de avaliação, pois varia em relação à irradiância solar ao longo do dia.

Nas avaliações realizadas, constatou-se que os sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica alcançaram as melhores eficiências diárias para as três alturas manométricas. O sistema alternativo, motobomba SOMAR de 1CV e 8 estágios mais conversor de frequência da WEG CFW08, para alturas manométricas de 20 m a 40 m, atingiu uma eficiência diária de aproximadamente 30%. No entanto, para alturas manométricas acima de 40m, o sistema alternativo tornou-se ineficiente: 22,5%. Uma possibilidade para atingir uma eficiência diária que fique perto de 30% seria escolher uma motobomba da mesma potência com maior número de estágios. Os resultados demonstram que o sistema alternativo exige cuidados na seleção de seus componentes.

A avaliação econômica e financeira demonstra a competitividade do sistema alternativo em relação aos sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica, Alia-se à vantagem econômica do sistema alternativo sua fácil aquisição no mercado brasileiro, o que garante a confiabilidade do sistema fotovoltaico de bombeamento.

2. Recomendações

1- Realizar um acompanhamento em campo (mediante aquisição de dados) dos novos empreendimentos que utilizem equipamentos de fabricação nacional, consolidando a utilização destes equipamentos em sistemas fotovoltaicos de bombeamento.

2- Desenvolver um manual para escolha e seleção dos equipamentos de fabricação nacional.

3- Desenvolver e propor um procedimento para qualificação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento, para emissão de um certificado de capacidade de bombeamento.

4- Padronizar o uso dos equipamentos de fabricação nacional, mediante teste em bancada de ensaios, para uma adequada seleção, que facilite aos fabricantes das motobombas inserir no seu catálogo as características quando o equipamento for utilizado com módulos fotovoltaicos.

5- Inserir um circuito eletrônico seguidor de ponto de máxima potência (MPPT, na sigla em inglês) no conversor de frequência, para melhorar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento.

6- Testar novas alternativas que melhorem o desempenho dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento. Essas alternativas podem ser os geradores fotovoltaicos que empregam sistemas com seguidor solar (Solar Tracking) de um ou dois eixos e geradores de alto rendimento que empregam concentradores solares, ou uma combinação de ambos.

7- Encaminhar parcerias com as empresas fabricantes de conversores de frequência, para tornarem o mesmo à aplicação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento.

8- Avaliar sistemas alternativos que usam motobombas de deslocamento positivo.

9- Finalmente, empregar a configuração alternativa para revitalizar os sistemas fotovoltaicos de bombeamento inoperantes que existem no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGILENT TECHNOLOGIES. Data Logger Agilent 34970A. Manual em Inglês. Estados Unidos, 2000. Disponível em: <
http://www.metrictest.com/catalog/pdfs/product_pdfs/hp_34970a.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2008.

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.

BARLOW, R.; McNELIS, B.; DERRICK, A. **Solar pumping: An introduction and update on the technology, performance, costs, and economics**. World Bank Technical, v. 168, p. 153, Washington, DC, USA, 1993..

BEZERRA, P. **Bombeamento de água fotovoltaico – problemas na implantação de um programa de utilização ampla: PRODEEM**. VIII Seminário Ibero-Americano de energia solar – Abastecimento de água em áreas rurais mediante bombeamento fotovoltaico, Recife, 2002.

BRITO, A.U.; ZILLES, R. **Conversores de frequência, uma solução para diminuir a dependência aos equipamentos importados em aplicações de bombeamento fotovoltaico**. In: IV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético – IV CBPE, Itajubá, Minas Gerais, 2004.

BRITO, A.U. **Otimização de acoplamento de geradores fotovoltaicos a motores de corrente alternada através de conversores de frequência comerciais para acionar bombas centrífugas**. São Paulo, 2006. 99p. Tese (Doutorado em Energia) Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BRITO, A.U.; ZILLES, R. **Systematized procedure for parameter characterization of a variable-speed drive used in photovoltaic pumping applications**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v.14, p. 249-260, 2006.

BRITO, A.U.; FEDRIZZI, M.C.; ZILLES, R. **Bancada de Ensaio para Averiguação operacional de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento**. In: 6^o Congresso Internacional Sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural - AGRENER, Campinas, São Paulo, 2006.

BRITO, A.U.; FEDRIZZI, M.C.; ZILLES, R. **PV pumping systems: an useful tool to check operational performance**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v.15, p.41-49, mai. 2007 a.

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.

COTA ESPERICUETA, A.D., et al. **Evaluación de 52 sistemas fotovoltaicos de bombeo de agua instalados en México a través del PERM.** In: Congreso Mundial de Energía Renovable, Guanajuato, México, 2004.

CRUZ, T.; VILELA, O.; FRAIDENRAICH, N. **Estudo da utilização de conversores de frequência convencionais em sistemas de bombeamento fotovoltaico.** In: I Congresso Brasileiro de Energia Solar – ABENS, Fortaleza, 2007.

DANCOR. Fabricante de motobombas submersas multiestágios. 2007. Disponível em: < <http://www.dancor.com.br/produtos/dimens/SPP-TSRdim.htm> >. Acesso em: 01 oct 2007.

DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. O convênio ICMS 46, de 18 de abril de 2007, altera o Convênio ICMS 101/97, que concede isenção do ICMS nas operações com equipamentos e componentes para o aproveitamento das energias solar e eólica. Diário Oficial da União, Brasília, N° 74, p. 33, sexta-feira, 20 de abril de 2007.

DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A. **Solar engineering of thermal processes**, New York, USA, 2ª edição: John Wiley and Sons, 1991.

EPIA. Photovoltaics in 2010; In: Commission of the European Communities – Directorate General for Energy, Summary Report, 1996.

FEDRIZZI, M.C. **Fornecimento de água com sistemas de bombeamento fotovoltaicos: Dimensionamento simplificado e análise de competitividade para sistemas de pequeno porte.** São Paulo. 150p. Dissertação (Mestre em Energia) Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

FEDRIZZI, M.C. **Sistemas fotovoltaicos de abastecimento de água para uso comunitário: Lições apreendidas e procedimentos para potencializar sua difusão.** São Paulo. 201p. Tese (Doutorado em Energia) Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

FEDRIZZI, M.C.; BRITO, A.U.; ZILLES, R. **Procedimentos para realização de ensaios com sistemas de bombeamento fotovoltaico em bancada de teste.** In: I Congresso Brasileiro de Energia Solar – ABENS, Fortaleza, 2007.

FRAIDENRAICH, N.; VILELA, O.C. **Dynamic behavior of water Wells coupled to PV pumping systems.** Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 15, p. 317-330, jan. 2007.

GHONEIM, A. **Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems.** Energy Conversion & Management, v. 47, p. 1449–1463, out. 2005.

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

HAMIDAT, A.; BENYOUCEF, B. **Mathematic models of photovoltaic motor-pump systems**. *Renewable Energy*, v. 33, p. 933-942, jun. 2007.

HADJ ARAB, A.; BENGHANEM M.; CHENLO, F. **Motor-pump system modelization**. *Renewable Energy*, v. 31, p. 905-913, jul. 2005.

HOFFMANN, W. **PV solar electricity industry: Market growth and perspective**. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, v. 90, p. 3285-3311, jan. 2006.

IEC-61725. **Analytical expression for daily solar profiles**. International Electrotechnical commission. First edition, 1997.

IEA-PVPS. **Trends in photovoltaic applications: Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2006**. p. 37. Report IEA-PVPS T1-16: 2007. < http://www.iea-pvps.org/products/download/rep1_16.pdf >. Acesso em: 08 de abril de 2008.

KAUNMUANG, P., et al. **Assessment of photovoltaic systems in Thailand – one decade experience**. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, v. 67, p. 529-534, mar. 2001.

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

LORENZO, E. **Energy collected and delivered by PV modules**. In. LUQUE, A.; HEGEDUS, S. (Ed.). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Wiley, p. 947-953, 2002.

LORENZO, P.; et. al. **Boas práticas da implantação de sistemas de bombeamento fotovoltaico**. Instituto de Energia Solar. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2005.

MARTINS, F.R.; et al. **Mapas de irradiação solar para o Brasil – Resultados do Projeto SWERA**. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, 2005.

MATHEUS, H. **Curso completo sobre conversores de frequência**. p. 33. 2006. Disponível em: < <http://www.ejm.com.br/download/Inversores.pdf> >. Acesso em: 31 mai 2007.

MERMOUD, A. **Pumping system sizing and modeling tool**. In. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, Junho 7-11, 2004 a.

MERMOUD, A. **Pump behavior modeling for use in a general PV simulation software**. In. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, Junho 7-11, 2004 b.

NARVARTE, L.; POZA, F.; LORENZO, E. **Specification and testing of PV pumps for a Moroccan project**. . *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 14, p. 733-741, may. 2006.

OMS. In. **La meta de los ODM relativa al agua potable y el saneamiento: El reto del decenio para zonas urbanas y rurales**. Organização Mundial da Saúde e UNICEF. New York, EUA, 2007. Disponível em:

<http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/mdg_es.pdf>. Acesso em 17 de oct 2007.

POSORSKI, R. **Photovoltaic water pumps, an attractive for rural drinking water supply.** Solar Energy, v. 58, n. 4-6, p. 155-163, 1996.

SANDIA NATIONAL LABORATORIES. **Guía para el desarrollo de proyectos de bombeo de agua con energía fotovoltaica.** In. Southwest Technology Development Institute, New Mexico State University, New Mexico, EUA. v.1, 2001.

WEG. Manual do inversor de frequência, Série: CFW-08 Plus, Software: V3.9X. São Paulo, WEG automação, 2005. p. 22.

WHO; UNICEF. Joint Monitoring Programme for Water Supply and Sanitation. Coverage Estimates Improved Drinking Water. Atualizado até Junho de 2006. disponível em: <http://www.wssinfo.org/pdf/country/BRA_wat.pdf>. Acesso em 29 set 2008.

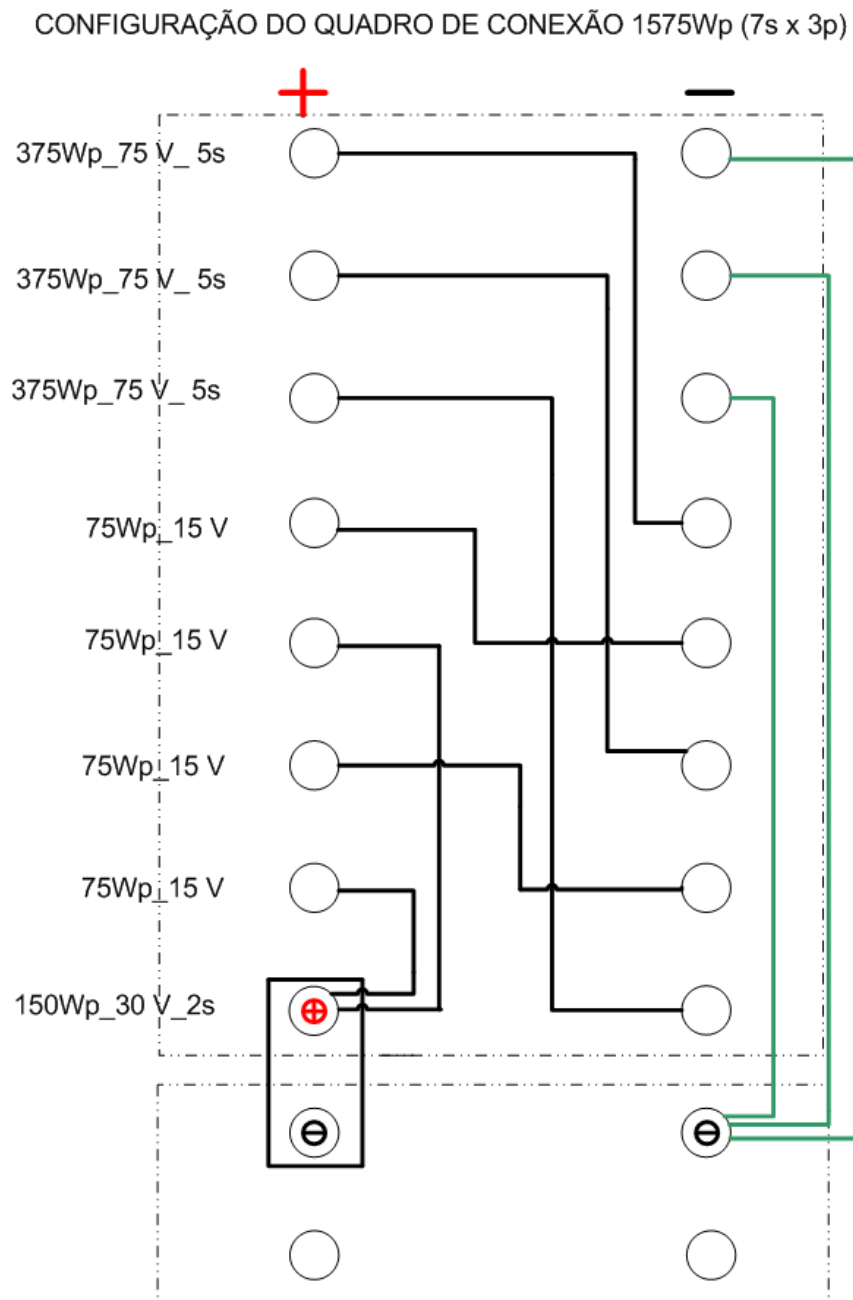
ZILLES, R.; et. al. **Avaliação dos sistemas de bombeamento fotovoltaico – Pontal do Paranapanema – PRODEEM Fase I.** Instituto de Eletrotécnica e Energia, Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos, Universidade de São Paulo, 1999.

ANEXOS

ANEXO A

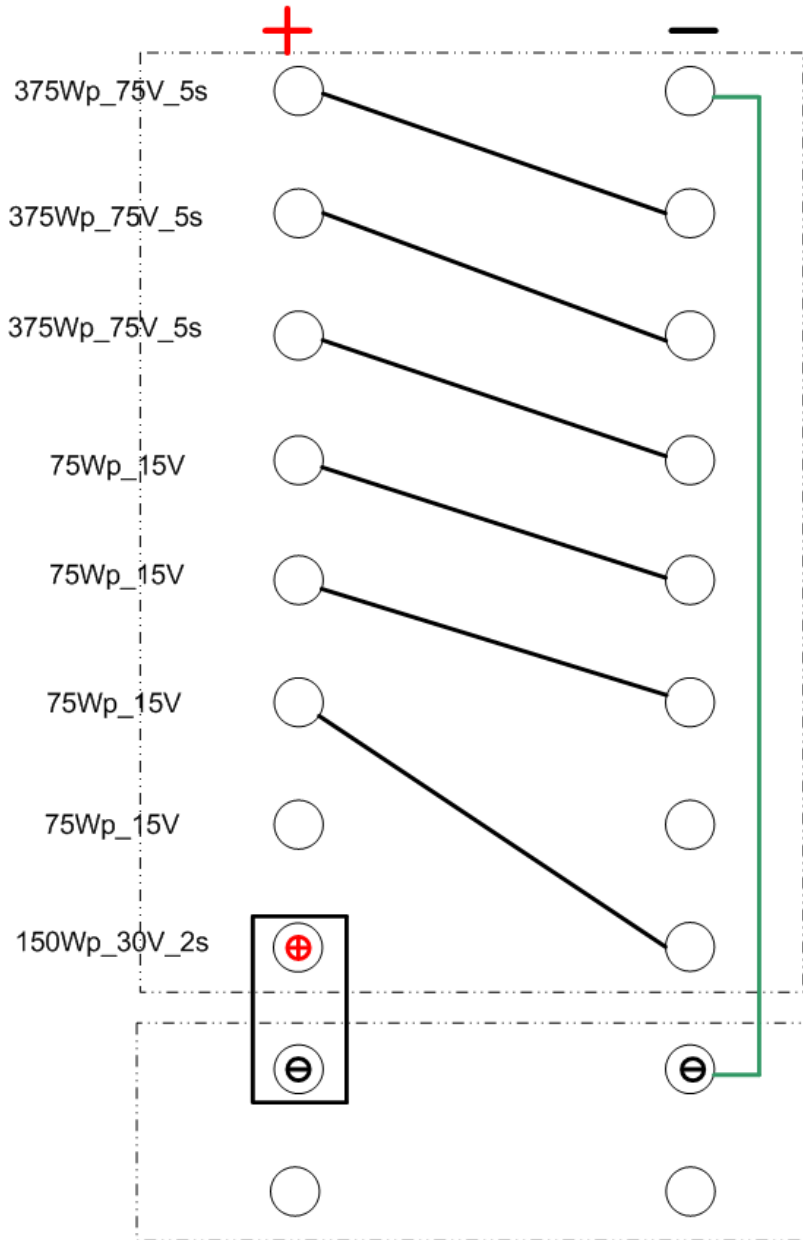
DIAGRAMA DE COMUTAÇÃO DAS CONEXÕES DO QUADRO ELÉTRICO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A.1 Configuração para os sistemas Grundfos e Solarjack



A.2 Configuração do sistema alternativo

CONFIGURAÇÃO DO QUADRO DE CONEXÃO 1500Wp (20s x 1p)



ANEXO B

Tabela B. 1: Figuras-de-mérito da análise econômico-financeira, para 30 m de altura manométrica e 25 anos de ciclo de vida

AMT 30m		Alternativo (Td= 12%a.a.)	Grundfos (Td= 12%a.a.)	Solarjack (Sun Pumps) (Td= 12%a.a.)
	ANO	Valor presente		
Investimento Inicial (I ₀)	0	23.103,00	27.910,50	34.874,41
Troca de Equipamentos				
Troca da Motobomba	5	944,77	1.815,77	6.026,53
Troca do controlador de potência	5	-	-	-
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	5	-	-	-
Troca do cabo elétrico	5	-	-	-
Troca da Motobomba				
Troca da Motobomba	10	536,09	1.030,31	3.419,61
Troca do controlador de potência	10	189,96	1.062,51	915,41
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	10	144,89	0,00	0,00
Troca do cabo elétrico	10	47,65	47,65	47,65
Troca da Motobomba				
Troca da Motobomba	15	304,19	584,63	1.940,38
Troca do controlador de potência	15	-	-	-
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	15	-	-	-
Troca do cabo elétrico	15	-	-	-
Troca da Motobomba				
Troca da Motobomba	20	172,61	331,73	1.101,02
Troca do controlador de potência	20	61,16	342,10	294,74
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	20	46,65	0,00	0,00
Troca do cabo elétrico	20	15,34	15,34	15,34
Valor presente da O&M	a cada ano	0,00	0,00	0,00
CCV (R\$) (25 anos)		25.566,31	33.140,55	48.635,09
CCVA (R\$/ano)		3.259,70	4.225,42	6.200,97
VBd (m ³ /dia)		20,7	20,9	19,3
Vba (m ³ /ano)		7555,5	7628,5	7044,5
CVB ((R\$/m³)		0,43	0,55	0,88
CVEB (R\$/m⁴)		0,014	0,018	0,029

Custo do ciclo de vida anualizado da reposição dos equipamentos (30 m de AMT e 25 anos)

CCV (R\$) (25 anos)	2.463,31	5.230,05	13.760,68
CCVA (R\$/ano)	314,07	666,83	1.754,49

Tabela B. 2: Figuras-de-mérito da análise econômico-financeira, para 30 m de altura manométrica e 30 anos de ciclo de vida

AMT 30m		Alternativo (Td= 12%a.a.)	Grundfos (Td= 12%a.a.)	Solarjack (Sun Pumps) (Td= 12%a.a.)
	ANO	Valor presente		
Investimento Inicial (I ₀)	0	23.103,00	27.910,50	34.874,41
Troca de Equipamentos				
Troca da Motobomba	5	944,77	1.815,77	6.026,53
Troca do controlador de potência	5	-	-	-
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	5	-	-	-
Troca do cabo elétrico	5	-	-	-
Troca da Motobomba				
Troca da Motobomba	10	536,09	1.030,31	3.419,61
Troca do controlador de potência	10	189,96	1.062,51	915,41
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	10	144,89	0,00	0,00
Troca do cabo elétrico	10	47,65	47,65	47,65
Troca da Motobomba				
Troca da Motobomba	15	304,19	584,63	1.940,38
Troca do controlador de potência	15	-	-	-
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	15	-	-	-
Troca do cabo elétrico	15	-	-	-
Troca da Motobomba				
Troca da Motobomba	20	172,61	331,73	1.101,02
Troca do controlador de potência	20	61,16	342,10	294,74
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	20	46,65	0,00	0,00
Troca do cabo elétrico	20	15,34	15,34	15,34
Troca da Motobomba	25	97,94	188,23	624,75
Troca do controlador de potência	25			
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	25			
Troca do cabo elétrico	25			
Valor presente da O&M	a cada ano	0,00	0,00	0,00
CCV (R\$) (30 anos)		25.664,25	33.328,78	49.259,84
CCVA (R\$/ano)		3.186,05	4.137,56	6.115,30
VBd (m ³ /dia)		20,7	20,9	19,3
Vba (m ³ /ano)		7555,5	7628,5	7044,5
CVB ((R\$/m³)		0,42	0,54	0,87
CVEB (R\$/m³)		0,014	0,018	0,029

Custo do ciclo de vida anualizado da reposição dos equipamentos (30 m de AMT e 30 anos)

CCV (R\$) (30 anos)	2.561,25	5.418,28	14.385,43
CCVA (R\$/ano)	317,96	672,65	1.785,86

Tabela B. 3: Figuras-de-mérito da análise econômico-financeira, para 40 m de altura manométrica e 25 anos de ciclo de vida

AMT 40m		Alternativo (Td= 12%a.a.)	Grundfos (Td= 12%a.a.)	Solarjack (Sun Pumps) (Td= 12%a.a.)
	ANO	Valor presente		
Investimento Inicial (I ₀)	0	23.140,00	27.947,50	34.911,41
Troca de Equipamentos				
Troca da Motobomba	5	944,77	1.815,77	6.026,53
Troca do controlador de potência	5	-	-	-
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	5	-	-	-
Troca do cabo elétrico	5	-	-	-
Troca da Motobomba				
Troca da Motobomba	10	536,09	1.030,31	3.419,61
Troca do controlador de potência	10	189,96	1.062,51	915,41
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	10	144,89	0,00	0,00
Troca do cabo elétrico	10	59,57	59,57	59,57
Troca da Motobomba				
Troca da Motobomba	15	304,19	584,63	1.940,38
Troca do controlador de potência	15	-	-	-
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	15	-	-	-
Troca do cabo elétrico	15	-	-	-
Troca da Motobomba				
Troca da Motobomba	20	172,61	331,73	1.101,02
Troca do controlador de potência	20	61,16	342,10	294,74
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	20	46,65	0,00	0,00
Troca do cabo elétrico	20	19,18	19,18	19,18
Valor presente da O&M	a cada ano	0,00	0,00	0,00
CCV (R\$) (25 anos)		25.619,05	33.193,30	48.687,84
CCVA (R\$/ano)		3.266,43	4.232,14	6.207,70
VBd (m ³ /dia)		13,9	16,2	17,6
Vba (m ³ /ano)		5073,5	5913	6424
CVB ((R\$/m³)		0,64	0,72	0,97
CVEB (R\$/m³)		0,016	0,018	0,024

Custo do ciclo de vida anualizado da reposição dos equipamentos (40 m de AMT e 25 anos)

CCV (R\$) (25 anos)	2.479,05	5.245,80	13.776,43
CCVA (R\$/ano)	316,08	668,84	1.756,49

Tabela B. 4: Figuras-de-mérito da análise econômico-financeira, para 40 m de altura manométrica e 30 anos de ciclo de vida

AMT 40m		Alternativo (Td= 12%a.a.)	Grundfos (Td= 12%a.a.)	Solarjack (Sun Pumps) (Td= 12%a.a.)
	ANO	Valor presente		
Investimento Inicial (I ₀)	0	23.140,00	27.947,50	34.911,41
Troca de Equipamentos				
Troca da Motobomba	5	944,77	1.815,77	6.026,53
Troca do controlador de potência	5	-	-	-
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	5	-	-	-
Troca do cabo elétrico	5	-	-	-
Troca da Motobomba				
Troca da Motobomba	10	536,09	1.030,31	3.419,61
Troca do controlador de potência	10	189,96	1.062,51	915,41
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	10	144,89	0,00	0,00
Troca do cabo elétrico	10	59,57	59,57	59,57
Troca da Motobomba				
Troca da Motobomba	15	304,19	584,63	1.940,38
Troca do controlador de potência	15	-	-	-
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	15	-	-	-
Troca do cabo elétrico	15	-	-	-
Troca da Motobomba				
Troca da Motobomba	20	172,61	331,73	1.101,02
Troca do controlador de potência	20	61,16	342,10	294,74
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	20	46,65	0,00	0,00
Troca do cabo elétrico	20	19,18	19,18	19,18
Troca da Motobomba				
Troca da Motobomba	25	97,94	188,23	624,75
Troca do controlador de potência	25			
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	25			
Troca do cabo elétrico	25			
Valor presente da O&M	a cada ano	0,00	0,00	0,00
CCV (R\$) (30 anos)		25.717,00	33.381,53	49.312,59
CCVA (R\$/ano)		3.192,60	4.144,11	6.121,85
VBd (m3/dia)		13,9	16,2	17,6
Vba (m3/ano)		5073,5	5913	6424
CVB ((R\$/m³)		0,63	0,70	0,95
CVEB (R\$/m⁴)		0,016	0,018	0,024

Custo do ciclo de vida anualizado da reposição dos equipamentos (40 m de AMT e 30 anos)

CCV (R\$) (30 anos)	2.577,00	5.434,03	14.401,18
CCVA (R\$/ano)	319,92	674,60	1.787,82

Tabela B. 5: Figuras-de-mérito da análise econômico- financeira, para 50 m de altura manométrica e 25 anos de ciclo de vida

AMT 50m		Alternativo (Td= 12%a.a.)	Grundfos (Td= 12%a.a.)	Solarjack (Sun Pumps) (Td= 12%a.a.)
	ANO	Valor presente		
Investimento Inicial (Io)	0	23.177,00	27.984,50	34.948,41
Troca de Equipamentos				
Troca da Motobomba	5	944,77	1.815,77	6.026,53
Troca do controlador de potência	5	-	-	-
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	5	-	-	-
Troca do cabo elétrico	5	-	-	-
Troca da Motobomba	10	536,09	1.030,31	3.419,61
Troca do controlador de potência	10	189,96	1.062,51	915,41
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	10	144,89	0,00	0,00
Troca do cabo elétrico	10	71,48	71,48	71,48
Troca da Motobomba	15	304,19	584,63	1.940,38
Troca do controlador de potência	15	-	-	-
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	15	-	-	-
Troca do cabo elétrico	15	-	-	-
Troca da Motobomba	20	172,61	331,73	1.101,02
Troca do controlador de potência	20	61,16	342,10	294,74
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	20	46,65	0,00	0,00
Troca do cabo elétrico	20	23,01	23,01	23,01
Valor presente da O&M	a cada ano	0,00	0,00	0,00
CCV (R\$) (25 anos)		25.671,80	33.246,05	48.740,59
CCVA (R\$/ano)		3.273,15	4.238,87	6.214,42
VBd (m3/dia)		10,3	13,1	15,8
Vba (m3/ano)		3759,5	4781,5	5767
CVB ((R\$/m³)		0,87	0,89	1,08
CVEB (R\$/m³)		0,017	0,018	0,022

Custo do ciclo de vida anualizado da reposição dos equipamentos (50 m de AMT e 25 anos)

CCV (R\$) (25 anos)	2.494,80	5.261,55	13.792,18
CCVA (R\$/ano)	318,09	670,85	1.758,50

Tabela B. 6: Figuras-de-mérito da análise econômico-financeira, para 50 m de altura manométrica e 30 anos de ciclo de vida

AMT 50m		Alternativo (Td= 12%a.a.)	Grundfos (Td= 12%a.a.)	Solarjack (Sun Pumps) (Td= 12%a.a.)
	ANO	Valor presente		
Investimento Inicial (Io)	0	23.177,00	27.984,50	34.948,41
Troca de Equipamentos				
Troca da Motobomba	5	944,77	1.815,77	6.026,53
Troca do controlador de potência	5	-	-	-
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	5	-	-	-
Troca do cabo elétrico	5	-	-	-
Troca da Motobomba				
Troca da Motobomba	10	536,09	1.030,31	3.419,61
Troca do controlador de potência	10	189,96	1.062,51	915,41
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	10	144,89	0,00	0,00
Troca do cabo elétrico	10	71,48	71,48	71,48
Troca da Motobomba				
Troca da Motobomba	15	304,19	584,63	1.940,38
Troca do controlador de potência	15	-	-	-
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	15	-	-	-
Troca do cabo elétrico	15	-	-	-
Troca da Motobomba				
Troca da Motobomba	20	172,61	331,73	1.101,02
Troca do controlador de potência	20	61,16	342,10	294,74
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	20	46,65	0,00	0,00
Troca do cabo elétrico	20	23,01	23,01	23,01
Troca da Motobomba	25	97,94	188,23	624,75
Troca do controlador de potência	25			
Troca do quadro elétrico, mais dispositivos de controle	25			
Troca do cabo elétrico	25			
Valor presente da O&M	a cada ano	0,00	0,00	0,00
CCV (R\$) (30 anos)		25.769,74	33.434,28	49.365,34
CCVA (R\$/ano)		3.199,15	4.150,65	6.128,39
VBd (m3/dia)		10,3	13,1	15,8
Vba (m3/ano)		3759,5	4781,5	5767
CVB ((R\$/m³)		0,85	0,87	1,06
CVEB (R\$/m³)		0,017	0,017	0,021

Custo do ciclo de vida anualizado da reposição dos equipamentos (50 m de AMT e 30 anos)

CCV (R\$) (30 anos)	2.592,74	5.449,78	14.416,93
CCVA (R\$/ano)	321,87	676,56	1.789,77