

## DESEMPENHO OPERACIONAL DE MOTOBOMBA VIBRATÓRIA PARA PEQUENOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Maria Cristina Fedrizzi, Marcelo Pinho Almeida, Teddy Arturo Meléndez  
Universidade de São Paulo

Instituto de Eletrotécnica e Energia - Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos  
Av. Professor Luciano Gualberto, 1289 – Cidade Universitária – CEP 05508-010 – São Paulo – Brasil  
Tel. +55 11 3091-2638 – Fax +55 11 3816-7828 e-mail: fedrizzi@iee.usp.br

**RESUMO:** Este trabalho apresenta a avaliação do desempenho de um sistema de bombeamento fotovoltaico com bomba submersa vibratória em corrente contínua (CC) de baixa potência. Os ensaios foram realizados em uma bancada desenvolvida para este fim capaz de manter estável a altura manométrica (pressão de trabalho), independente da variação da irradiação solar incidente. Os dados de vazão, altura manométrica, tensão, corrente CC e irradiância foram registrados através de um *datalogger* no intervalo de 06:00 h às 18:00 h, considerado um turno de bombeamento. Apesar de limitações como altura manométrica e diâmetro do poço, o sistema analisado é competitivo com outras opções de bombeamento e apresenta como nicho de mercado localidades rurais com baixa demanda hídrica.

**Palavras chave:** energia solar fotovoltaica, bombeamento de água, bombeamento fotovoltaico.

### INTRODUÇÃO

Apesar de o Brasil deter as maiores reservas de água doce do mundo, milhões de brasileiros não têm acesso a esse recurso na quantidade e qualidade de que necessitam. Além de ser limitadora do crescimento econômico, a escassez hídrica deprime o desenvolvimento social. Grande parte da mortalidade infantil nos países em desenvolvimento está associada a doenças de veiculação hídrica (diarréia, verminose, desidratação, etc.), além disso, ainda que não ocorram óbitos, as crianças têm seu desenvolvimento comprometido em virtude do contato e ingestão de água não potável. Esse cenário é mais grave, principalmente, no meio rural de regiões áridas e semi-áridas onde o desabastecimento hídrico está associado às dificuldades na produção agrícola e ao acesso a fontes energéticas para a captação e transporte da água até o local de consumo.

Nos últimos anos no Brasil, populações rurais de médio e grande porte vem sendo contempladas com a rede elétrica através do Programa Luz para Todos<sup>1</sup> (PLpT, 2011), que viabiliza o fornecimento de eletricidade para a implantação de sistemas de abastecimento de água de uso comunitário. Em outros casos, onde a rede elétrica ainda não chegou, pode-se encontrar sistemas de bombeamento com grupos geradores a diesel ou com energia solar fotovoltaica. No entanto, as maiores dificuldades para o acesso ao abastecimento de água são vivenciadas nas pequenas comunidades rurais, em particular em unidades unifamiliares. Estas, devido a seu isolamento, distância da rede elétrica e baixa demanda, encontram-se em condições favoráveis para a utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento.

Recentemente surgiu no mercado um sistema que pode atender a este tipo de situação, de baixa potência e baixo custo. Trata-se de bomba submersa de deslocamento positivo vibratória, acionada por meio de um solenóide através de um *driver* alimentado em corrente contínua. A bomba mede 300 mm de altura, 143 mm de diâmetro, com saída de 19 mm de diâmetro, sendo fácil instalação e manejo.

Este trabalho apresenta os resultados da caracterização do desempenho operacional da referida bomba, obtidos para o acoplamento através de um *driver* com dois tamanhos de gerador fotovoltaico, 100 Wp e 200 Wp. Para ambos geradores o desempenho foi caracterizado para as alturas manométricas de 10, 20 e 30 metros.

### CARACTERIZAÇÃO DO DESEMPENHO OPERACIONAL

A caracterização de um sistema FV de bombeamento, em termos de altura manométrica, eficiência média e volume diário de água bombeada, é importante para o correto dimensionamento e definição da aplicabilidade desses sistemas. Uma forma bastante confiável para caracterizá-los consiste em realizar ensaios a sol real e registrar parâmetros elétricos, como a tensão e a corrente do gerador FV; hidráulicos, como a vazão e a altura manométrica; e locais, como a irradiância. Com base nesses parâmetros calcula-se a eficiência média e o volume total de água bombeado durante um período desejado.

O sistema ensaiado consistiu de um gerador FV composto por duas séries de dois módulos de 50 Wp cada, sendo possível utilizar apenas uma série (gerador de 100 Wp) ou as duas em paralelo (gerador de 200 Wp), a bomba vibratória e o *driver* de

---

<sup>1</sup> Em 2003 foi lançado o Programa Luz para Todos com a finalidade de alcançar as metas de universalização do atendimento de energia elétrica. Até o momento cerca de 13,9 milhões de pessoas foram atendidas pelo PLpT.

controle e condicionamento de potência fornecido juntamente com a bomba. As especificações elétricas do *driver*, no lado CC, são tensão máxima de 36 V e corrente máxima de 3 A. Os módulos utilizados possuem tensão e corrente no ponto de máxima potência igual a 16,5 V e 3,04 A, respectivamente, sendo bastante adequados para alimentar o *driver*. No entanto, no caso do gerador de 200 Wp, a corrente poderia ultrapassar o limite máximo, porém este possui uma função de proteção para evitar a sobrecorrente: ele provoca a elevação da tensão do gerador FV para reduzir a corrente e, caso a tensão atinja os 36 V, ele interrompe a alimentação.

O ambiente de ensaio foi uma bancada, figura 1, capaz de simular diferentes alturas manométricas equipada com rotâmetro, manômetro, sensores de tensão e corrente CC e uma célula FV para medir a irradiância (Brito et al., 2006). Além disso, foi utilizado um *datalogger* para registrar os dados (vazão, altura manométrica, tensão, corrente CC e irradiância) no intervalo de 06:00 h às 18:00 h, considerado um turno de bombeamento. A medição da altura manométrica serviu apenas como controle durante os ensaios, pois a bancada é capaz de manter constante a altura pré-ajustada.

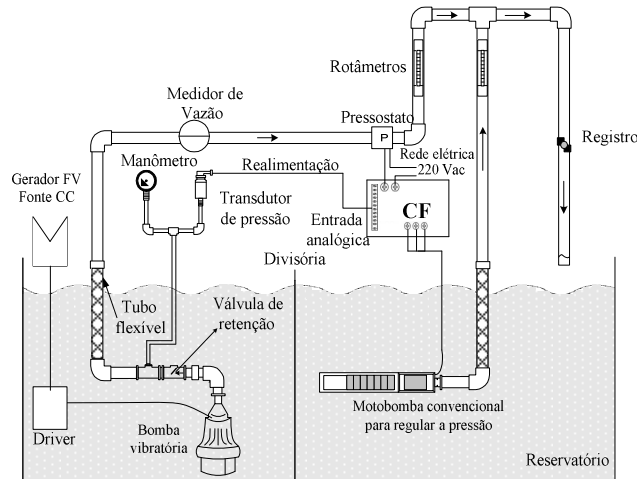


Figura 1. Diagrama esquemático da bancada de ensaios, modificado de Brito et. al (2007).

Como o comportamento da bomba era desconhecido, antes dos ensaios a sol real foram realizados alguns testes com uma fonte de alimentação CC com ajuste de corrente no lugar do gerador FV. As alturas manométricas escolhidas foram 10, 20, 30 e 40 m.c.a, e os resultados dos testes são apresentados na figura 2. Percebe-se um aumento na potência mínima em que se inicia o bombeamento, devido à elevação da altura manométrica ( $\approx 35, 65$  e  $85$  W, respectivamente para 10, 20 e 30 m.c.a.). O sistema não bombeou em 40 m.c.a, sendo assim, não foram realizados ensaios a esta altura manométrica a sol real. Além disso, constatou-se que a potência máxima média foi  $\approx 115$  W, o que condiz com as especificações do *driver*. É importante dizer que o *driver* desligava a alimentação quando se tentava elevar a potência acima desse valor.

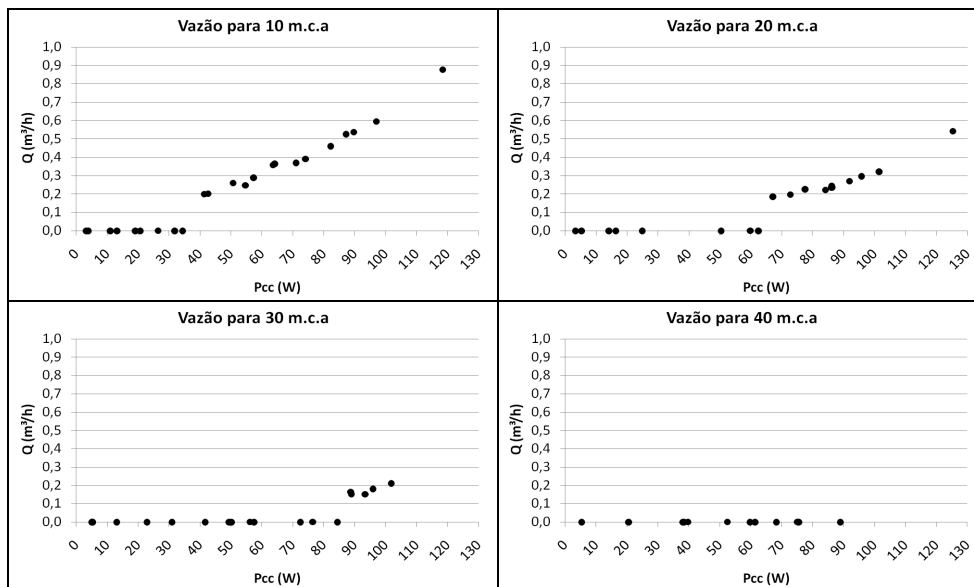


Figura 2. Curvas potência CC x vazão para alturas manométricas de 10, 20, 30 e 40 m, com fonte CC.

Devido à limitação da potência máxima e o crescimento da potência mínima em função da altura manométrica, a vazão, que apresentou comportamento linear com a potência, teve um crescimento acentuado para 10 m.c.a (de 0,2 para 0,9 m³/h), moderado para 20 m.c.a (de 0,2 para 0,55 m³/h) e quase nulo para 30 m.c.a. Diante disso, conclui-se, inicialmente, que a bomba seria tecnicamente adequada para alturas manométricas abaixo de 30 m.c.a.

De posse de maiores detalhes do funcionamento do sistema de bombeamento, realizaram-se os ensaios a sol real para 10, 20 e 30 m.c.a, sendo que para cada altura foram utilizadas as configurações de 100 e 200 Wp do gerador FV. Como a irradiância no período dos ensaios não alcançou os 1.000 W/m², ficando o pico em torno de 800 W/m², as potências máximas para as configurações do gerador foram ≈80 e 160 W, respectivamente. A figura 3 mostra os perfis de irradiância e tensão CC e a figura 4 os valores de eficiência e vazão instantâneas para os seis ensaios. Os valores de potência e vazão mínima e máxima para cada altura manométrica estão bastante parecidos com os dos testes com a fonte CC, respeitada a limitação de 80 W para o gerador de 100 Wp.

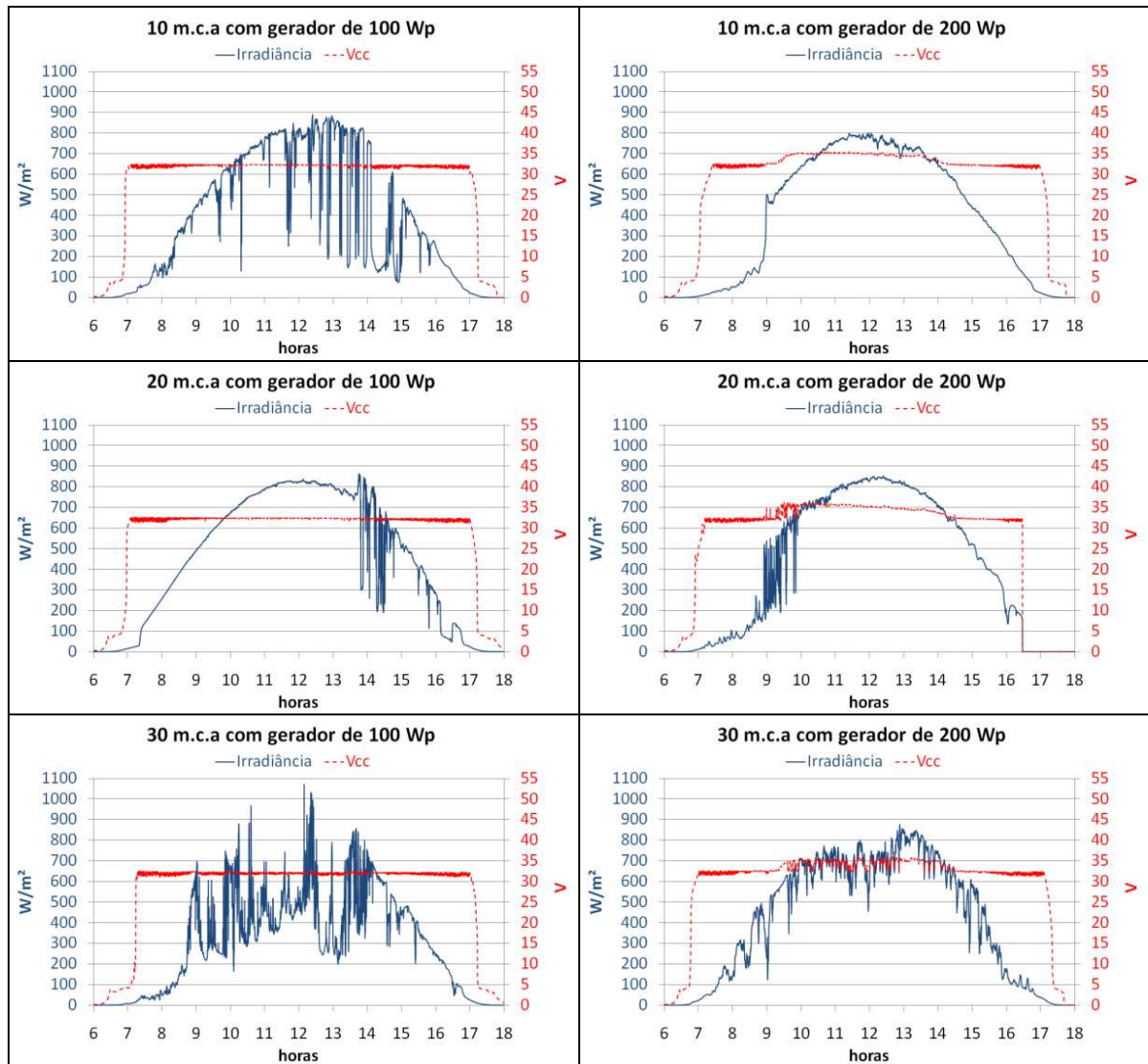


Figura 3. Perfis de irradiância e tensão CC para alturas manométricas de 10, 20 e 30 m, com 100 e 200 Wp.

A eficiência considerada no trabalho corresponde à eficiência total do sistema bomba-driver, calculada como a razão entre a energia hidráulica obtida e a energia elétrica proveniente do gerador FV em um dado período T, conforme mostra a equação 1. A eficiência instantânea apresentada na figura 4 foi obtida com períodos de 10 segundos.

$$\eta_T = \frac{E_{HT}}{E_{ET}} = \frac{2,725 \times H \times Q_T \times T}{P_T \times T} = \frac{2,725 \times H \times Q_T}{P_T} \quad (1)$$

Onde:

- $\eta_T$  é a eficiência total do sistema no período T
- $E_{HT}$  é a energia hidráulica obtida no período T

$E_{ET}$  é a energia elétrica proveniente do gerador FV no período T  
H é a altura manométrica  
 $Q_T$  é a vazão média no período T  
 $P_T$  é a potência média do gerador FV no período T

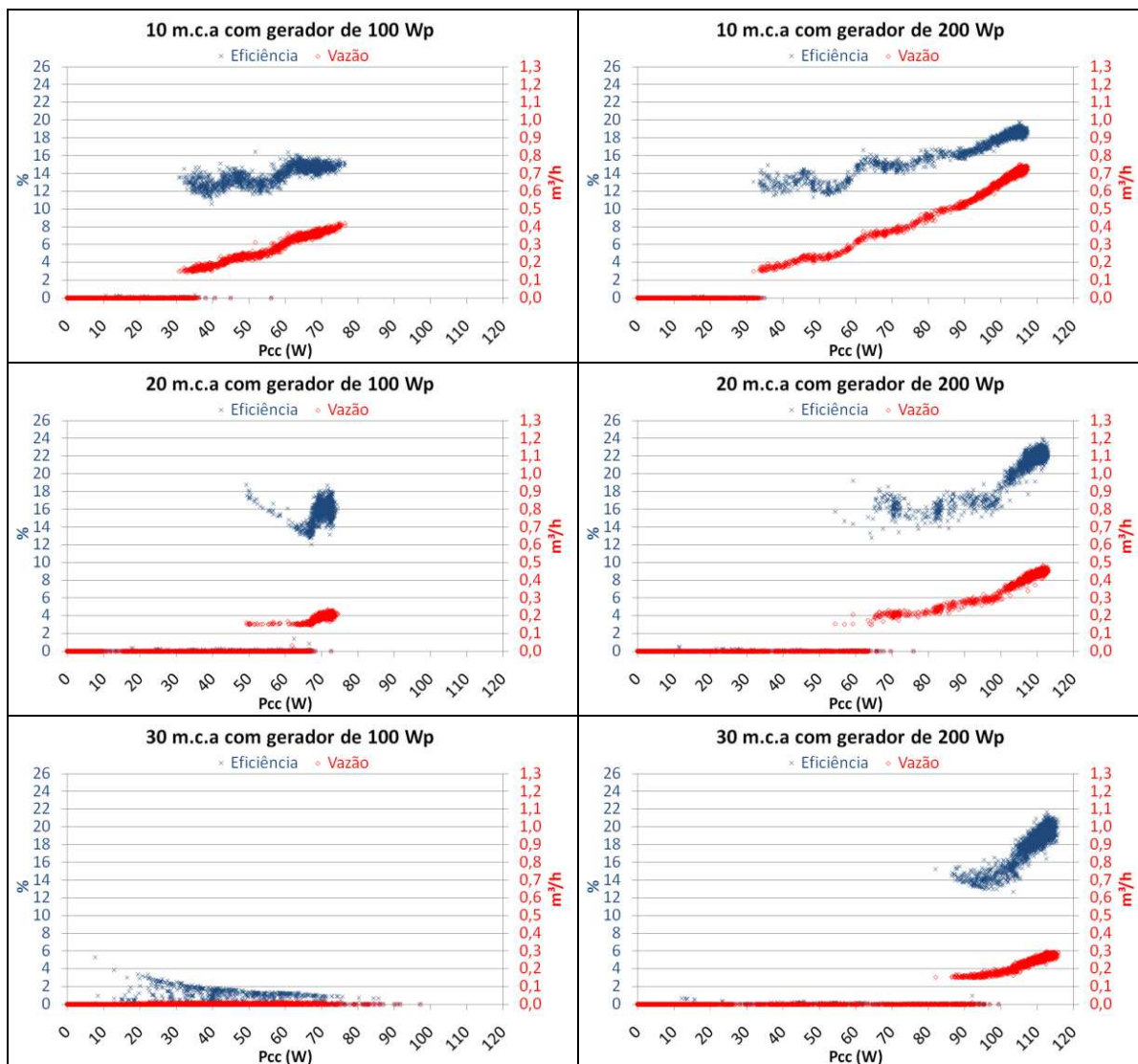


Figura 4. Curvas de eficiência e vazão instantânea para as alturas manométricas de 10, 20 e 30 m, para 100 e 200 Wp.

Para 30 m.c.a com o gerador de 100 Wp não houve vazão significativa e a eficiência apresentou um comportamento diferente dos demais casos. Isso pode ser explicado pelo próprio funcionamento do *driver* juntamente com a irradiância relativamente baixa durante o dia do ensaio. O *driver* possui um condensador na entrada CC que armazena energia para acionar a bomba. Após carregá-lo, o *driver* descarrega-o para fazer a membrana da bomba oscilar. Esse processo é repetido diversas vezes, e quanto mais energia for disponibilizada pelo gerador, maior é a frequência da oscilação e mais água é bombeada. Quando há pouca energia, como no dia do ensaio, o condensador demora a carregar e a frequência diminui. Dessa forma, houve uma quantidade pequena de água bombeada em momentos esporádicos, resultando em um pequeno valor de energia hidráulica frente a um valor bem maior de energia elétrica, com a conseqüente redução da eficiência. Nos cinco demais casos, eficiências instantâneas entre 12% e 24% foram observadas. A tabela 1 resume os valores de eficiência média ( $\eta_m$ ), volume bombeado (V) e irradiância (H) diários para cada um dos seis casos. A eficiência média foi obtida através da equação 2.

$$\eta_m = \frac{\sum E_{HT}}{\sum E_{ET}} \quad (2)$$

Onde o somatório corresponde à soma de todos os valores de energia hidráulica ou elétrica obtidos durante o dia, calculados em períodos de 10 segundos conforme a equação 1.

	Gerador de 100 Wp (máximo 80 W)			Gerador de 200 Wp (máximo 160 W)		
	H (kWh/m <sup>2</sup> .dia)	$\eta_m$ (%)	V (l/dia)	H (kWh/m <sup>2</sup> .dia)	$\eta_m$ (%)	V (l/dia)
10 m.c.a	4,44	12	1.660	4,65	17	4.290
20 m.c.a	5,28	8	640	4,92	19	2.450
30 m.c.a	3,53	0,3	10*	4,87	15	1.390

\*Situação considerada fora das especificações técnicas.

Tabela 1. Eficiência média, volume bombeado e irradiação diários para as alturas manométricas de 10, 20 e 30 m, para 100 e 200 Wp.

O baixo desempenho do sistema para 30 m.c.a com o gerador de 100 Wp pode, em parte, ser justificado pela reduzida incidência solar no dia do ensaio, porém, observando o comportamento da eficiência e volume bombeado nos demais casos, fica claro que, mesmo com uma irradiação mais elevada, o desempenho seria baixo.

O fabricante da bomba informa que um gerador de 100 Wp é ideal para a operação do sistema. Apesar de os ensaios mostrarem que há bombeamento com um gerador desse tamanho, os valores são bastante inferiores se comparados aos do sistema operando com o gerador de 200 Wp. Contudo, para aplicações domésticas e com pequenas alturas manométricas (até 20 m.c.a), o gerador de 100 Wp poderia ser utilizado com bons resultados. Caso a aplicação necessite de volumes maiores de água, é recomendável utilizar o gerador de 200 Wp

Em linhas gerais, o conjunto bomba+driver apresentou resultados satisfatórios, principalmente com o dobro da potência de gerador FV indicada pelo fabricante. A quantidade de água, nesse caso, superou os 1.000 l/dia para a maior altura manométrica (30 m.c.a) e os 4.000 l/dia para a menor (10 m.c.a), possibilitando uma grande variedade de aplicações a custos muito competitivos.

## ANÁLISE ECONÔMICA

Após avaliação do desempenho do sistema para determinadas faixas de potência e alturas manométricas, foi feita uma análise da viabilidade econômico-financeira para os cenários avaliados. As figuras de mérito adotadas foram:

- Investimento inicial (US\$);
- Custo do ciclo de vida (US\$);
- Custo do ciclo de vida anualizado (US\$/ano);
- Custo do volume bombeado (US\$/m<sup>3</sup>).

Os parâmetros utilizados para cálculo são apresentados na tabela 2 e os resultados obtidos são apresentados na tabela 3 e ilustrados na figura 5. Os custos considerados para os cálculos são os relacionados diretamente com os equipamentos de geração e bombeamento. Não foram computados os custos com obras civis, rede hidráulica e elétrica ou reservatório, pois variam significativamente em função das características específicas de cada situação, ou seja, esses custos estão atrelados ao tipo de material utilizado, aos preços do mercado local e à logística de transporte. Os custos de operação e manutenção também não foram considerados porque dependem, em grande medida, da necessidade ou não de assistência técnica externa e dos custos de deslocamento dessa mão-de-obra. Pode-se dizer que quanto mais distante dos centros urbanos, maiores serão esses custos em geral.

- Período de análise	24 anos
- Taxa de desconto	12 % ao ano
- Irradiação de referência	5 kWh/m <sup>2</sup> .dia
- Custo de geração fotovoltaica	4,50 US\$/Wp
- Custo bomba-driver	656,00 US\$
- Cotação do dólar	1,00 US\$ = 1,57 R\$

Tabela 2. Parâmetros utilizados para a análise econômica.

Potência Gerador (Wp)	Custo Gerador (US\$)	Custo Bomba (US\$)	Investimento Inicial (US\$)	Custo Ciclo Vida (US\$)	Custo Ciclo Vida Ano (US\$/a)	Altura manométrica (m.c.a.)	Custo Vol. Bombeado (US\$/m <sup>3</sup> )
100	446,71	656,03	1.102,74	1.688,78	216,94	10	0,36
						20	0,93
						30	59,44*
200	893,43	656,03	1.549,46	2.135,49	274,33	10	0,18
						20	0,31
						30	0,54

\*Situação desconsiderada para análise por estar fora das especificações técnicas.

Tabela 3. Resultado dos cálculos das figuras de mérito.

Como era de se esperar, o custo do volume bombeado é diretamente proporcional à altura manométrica e inversamente proporcional à potência utilizada. A situação de bombeamento a 30 m.c.a. com 100 Wp de potência deve ser desconsiderada, uma vez que se encontra fora dos requisitos técnicos de funcionamento do sistema, bombeando cerca de 10 litros de água por

dia com um custo de US\$ 59,44 por metro cúbico. Os demais cenários tiveram a variação do custo de bombeamento de US\$ 0,18 a US\$ 0,93 por metro cúbico.

Apesar do custo de geração ser o dobro de um sistema para outro, de 100 Wp para 200 Wp, e, conseqüentemente, o investimento inicial e o custo do ciclo de vida mais elevados neste caso, a configuração de maior potência apresentou os menores custos do volume bombeado, chegando a ser 1/3 do custo para o bombeamento a 20 m.c.a. O menor custo do volume bombeado foi obtido na situação de 200 Wp e 10 m.c.a., com 0,18 US\$/m<sup>3</sup>, e o maior custo foi obtido na de 100 Wp e 20 m.c.a., com 0,93 US\$/m<sup>3</sup>.

O menor custo de bombeamento obtido com este sistema (0,18 US\$/m<sup>3</sup>) é inferior aos custos de bombeamento obtidos em estudo anterior que envolvia dois sistemas de bombeamento fotovoltaico e um sistema com rede elétrica convencional com bombas centrífugas, que variaram de 0,29 US\$/m<sup>3</sup> a 2,12 US\$/m<sup>3</sup> (Fedrizzi et al., 2009).

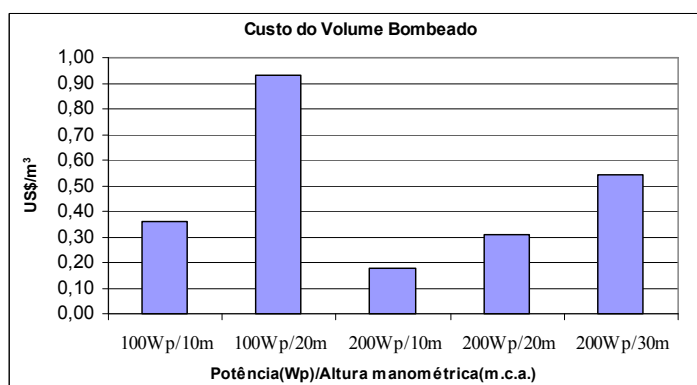


Figura 5. Custo do volume bombeado para os cinco cenários considerados.

## CONCLUSÕES

O sistema de bombeamento analisado é de fácil instalação e manejo, podendo ser instalado por uma só pessoa em virtude de suas dimensões e peso. Tem a limitação de potência/altura manométrica e diâmetro do poço, no entanto, há um grande nicho de mercado para pequenas demandas para poços tipo cacimba ou tubulares com diâmetro superior a 150 mm, em comunidades rurais que não contam com rede elétrica, ou em locais das propriedades rurais onde os custos de estender algumas centenas de metros de rede de distribuição e a tarifa elétrica não compensam economicamente a conexão com a rede.

As eficiências obtidas foram consideradas médias ou baixas se comparadas com motobombas centrífugas ou helicoidais, no entanto, o custo do volume bombeado é compatível com o dos bons sistemas de bombeamento fotovoltaico e com rede elétrica, conforme comparação com estudos anteriores. A indicação do fabricante de que o sistema bombeia a altura manométrica de até 40 m.c.a. não se confirmou nos ensaios a sol real, nem com fonte de alimentação CC. Constatou-se, também, que o melhor dimensionamento do gerador foi com 200 Wp de potência, para alturas manométricas inferiores a 30 m.c.a.

O conjunto bomba-driver é de fabricação brasileira, com ampla rede de distribuidores e assistência técnica no país, além disso, apresenta baixo custo de investimento inicial o que deverá favorecer sua disseminação no meio rural.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia – INCT-EREEA.

## REFERÊNCIAS

- Anauger. (2011). Bomba submersa vibratória – Bombear água com sol, Catálogo obtido no *website* - consulta em 22/07/2011. <http://www.anauger.com.br/>.
- Brito A. U. (2006). Otimização de acoplamento de geradores fotovoltaicos a motores de corrente alternada através de conversores de frequência comerciais para acionar bombas centrífugas. Tese apresentada ao Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Brito, A. U. Zilles, R. (2006). Systematized procedure for parameter characterization of a variable-speed drive used in photovoltaic pumping applications, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol.14, n. 3, pp.249-260.
- Brito, A.U., Fedrizzi M. C., Zilles R. (2007). PV pumping systems: a useful tool to check operational performance, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 15:41-49.
- Fedrizzi M. C., Ribeiro, F. S., Zilles R. (2009). Bombeamento de água no meio rural, análise econômica de duas configurações fotovoltaicas e uma elétrica convencional. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v13, p. 117-123.

#### **ABSTRACT**

This paper presents the performance evaluation of a photovoltaic pumping system with submerged vibrating pump for direct current (DC) low power application. The tests were performed on a bench designed for this purpose which can provide stable head (working pressure), regardless of the variation in incident solar radiation. Flow, head, DC voltage and current, and irradiance data were recorded using a datalogger from 06:00 h to 18:00 h, considered to be a pumping shift. In spite of limitations such as the head and the diameter of the well, the system under consideration is competitive with other pumping options and features as niche market rural areas with low water demand.

**Keywords:** photovoltaic solar energy, water pumping, photovoltaic pumping.

#### **RESUMEN**

Este trabajo presenta la evaluación del desempeño de un sistema fotovoltaico de bombeo con bomba sumergible vibratoria para aplicaciones de baja potencia en corriente continua (CC). Las pruebas se realizaron en un banco diseñado para este propósito, proporcionando altura manométrica estable (presión de trabajo) independientemente de la variación de la radiación solar incidente. Los datos de caudal, altura manométrica, tensión continua, corriente continua e irradiación solar se registraron con un sistema de adquisición de datos en el periodo de 06:00 h a 18:00 h, considerado como un ciclo de bombeo. A pesar de las limitaciones de la altura manométrica y del diámetro del pozo, el sistema en cuestión es competitivo con otras opciones de bombeo y tiene como nicho de mercado las zonas rurales que necesitan menores cantidades de agua.

**Palabras clave:** energía solar fotovoltaica, bombeo de agua, bombeo fotovoltaico.