

AVALIAÇÃO DE TRÊS CONFIGURAÇÕES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO

Teddy Arturo Melendez – tmelendez@iee.usp.br

Maria Cristina Fedrizzi – fedrizzi@iee.usp.br

Roberto Zilles – zilles@iee.usp.br

Universidade de São Paulo, Instituto de Eletrotécnica e Energia

3.5 Sistemas Fotovoltaicos Autônomos e Híbridos

Resumo. Este trabalho apresenta o desempenho e avaliação econômica de três configurações de sistemas fotovoltaicos de bombeamento que utilizam motobombas com potência entre 0,75 e 1 CV. Dois sistemas são dedicados a energia solar e um adota a configuração proposta por Alonso Abella (2003) e Brito e Zilles (2004), ou seja, motobomba e equipamento de condicionamento de potência de fabricação nacional. Os resultados mostram que a configuração alternativa possui menor eficiência diária do conjunto motobomba. A avaliação econômica revela a competitividade da configuração alternativa frente os sistemas importados dedicados à 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 CV e 8 estágios, trabalha com eficiência diária próxima aos 30% na faixa de operação de 30 a 40 metros. Portanto, com uma adequada escolha da motobomba para a configuração alternativa pode-se obter desempenhos semelhantes aos obtidos com sistemas importados dedicados à fotovoltaica. Para 30 metros a configuração alternativa bombeou somente 1% a menos que o sistema Grundfos.

Palavras-chave: Bombeamento Fotovoltaico, Avaliação Econômica, Conversores de Frequência

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas fotovoltaicos de bombeamento, por não precisarem de dispositivo de acumulação de eletricidade, representam uma das aplicações mais competitivas dos sistemas fotovoltaicos autônomos. As primeiras aplicações em escala comercial dessa modalidade de bombeamento datam da década de 1970, tendo como a principal delas o fornecimento de água às comunidades rurais localizadas em zonas remotas (Perlin, 1999). Desde então, essa tecnologia foi disseminada, principalmente, nos países em desenvolvimento. Com três décadas de utilização, pode-se dizer que é uma tecnologia consolidada tecnicamente. No que tange aos aspectos econômicos, esses sistemas encontram nichos de competitividade quando comparados os fluxos de caixa ao longo da vida útil dos projetos com distintas opções tecnológicas tais como, sistemas a diesel e a gasolina (Posorski, 1996; Fedrizzi 1997; Cota Espericueta et al., 2004; Lorenzo, 2005).

No Brasil foi implantado uma quantidade expressiva de sistemas fotovoltaicos de bombeamento, em sua maioria no âmbito do Programa para o Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM). Estima-se que entre o PRODEEM e as demais iniciativas para o abastecimento de água às populações rurais como entidades privadas, ONGs, e alguns governos estaduais e municipais, foram instalados mais de 3.000 sistemas, totalizando uma potência instalada de cerca de 1.600 kWp.

No país ainda existe grande potencial de expansão, principalmente para o abastecimento de água a localidades remotas onde a extensão da rede elétrica convencional inexistente (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 prematuramente. Em grande parte das vezes isso se deve ao fato de que o subsistema “motobomba-dispositivo de condicionamento de potência” é importado, o que encarece e dificulta a manutenção e a reposição desses equipamentos. Isso foi demonstrado em diferentes avaliações de sistemas fotovoltaicos de bombeamento localizados em comunidades remotas (Fedrizzi e Zilles, 1999; Kaunmuang et al., 2001; Bezerra, 2002; Fedrizzi, 2003; Cota Espiricueta et al., 2004). De certa forma, essa situação reflete a realidade de inúmeros projetos fotovoltaicos no país, os quais não conseguem manter a qualidade técnica de manutenção e reposição de equipamentos no longo prazo, embora a vida útil do gerador fotovoltaico seja superior a 25 anos.

Uma solução para o problema de manutenção e reposição nos sistemas de bombeamento é a utilização de conversores de frequência como unidade de condicionamento de potência para a operação de motores de indução trifásicos e bombas centrífugas convencionais de fabricação nacional (Alonso Abella, 2003; Brito e Zilles, 2004; Brito, 2006). Esses dispositivos ainda têm uma aplicação tímida em sistemas fotovoltaicos de bombeamento, já que, os existentes estão em fase experimental, tal é o caso do sistema instalado no Pontal do Paranapanema (Brito et al, 2007 b). Apesar disso, ainda há vazios para sua difusão e conhecimento, nesse sentido este trabalho apresenta os resultados do

desempenho operacional e da avaliação econômica de três configurações de sistemas bombeamento; dois com motobomba e dispositivo de condicionamento de potência importados e exclusivos para utilização fotovoltaica, e um com equipamentos convencionais de fabricação nacional. A Tab. 1 apresenta as características das três configurações analisadas.

Tabela 1. Características das três configurações de sistemas de bombeamento analisadas.

Tipo de sistema	SISTEMA FOTOVOLTAICO DE BOMBEAMENTO		
	Potência do gerador fotovoltaico	Subsistema	
		Dispositivo de condicionamento de potência	Motobomba
Sistema dedicado à tecnologia fotovoltaica (importado)	1575 Wp	Solartronics1500	Grundfos SP 3A-10 de 0,75CV – 10 estágios
	1575 Wp	PCB – 180C	Solarjack SCS 10 – 230 de 1CV – 10 estágios
Sistema alternativo (fabricação nacional)	1500 Wp	Conversor de frequência Weg CFW08	Somar BMSAF-407/1,0-8 de 1CV – 8 estágios

2. INSTRUMENTAÇÃO E ENSAIOS

Os testes foram realizados na bancada de ensaios do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo. A bancada (diagrama esquemático Fig. 1) funciona de maneira a manter a altura manométrica constante ao longo de todo o ensaio (BRITO et al, 2007 a).

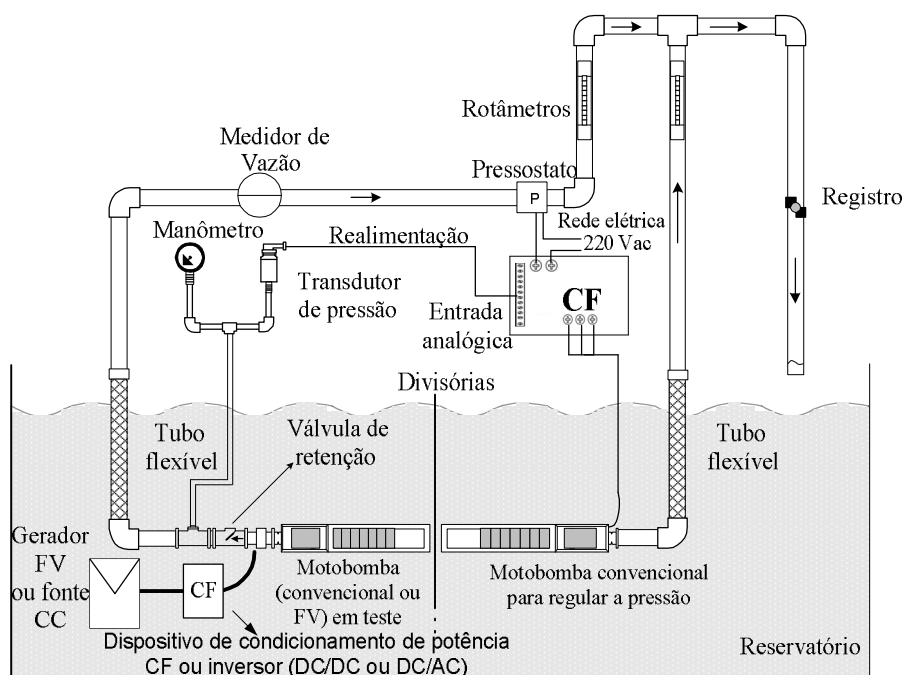


Figura 1: Diagrama esquemático da bancada de ensaios. (Brito et. al., 2007 a)

A Fig. 2 apresenta a bancada de ensaio (direita) incluindo um trocador de calor (inferior esquerda), o qual permite que a temperatura da água não supere os 35°C, valor máximo recomendado para operação dos motores de indução das motobombas.



Figura 2: Foto da bancada de ensaios e trocador de calor.

Durante os ensaios foram registrados, em intervalos de 10 segundos, os seguintes parâmetros: irradiância no plano do gerador fotovoltaico (W/m^2), vazão instantânea (m^3/h), e tensão (V) e corrente (A) do gerador fotovoltaico. O equipamento de aquisição de dados, um *datalogger* HP-34970A, registra os parâmetros medidos com os transdutores apresentados na Tab. 2, com suas respectivas características e escalas de medição.

Tabela 2: Características dos equipamentos de aquisição de dados.

Variáveis monitoradas	Transdutor	Escala de medição
Irradiância	Célula fotovoltaica calibrada	$130.2 \text{ mV} \leftrightarrow 1000 \text{ W/m}^2$
Tensão de entrada	Transdutor de tensão	$0 - 500 \text{ V} \leftrightarrow 0-10 \text{ V}$
Corrente de entrada	Shunt	$100 \text{ mV} \leftrightarrow 10^{\text{a}}$
Pressão nos tubos	Transdutor de pressão	$0-10 \text{ kgf/cm}^2 \leftrightarrow 0-10 \text{ Vcc}$
Vazão	Transdutor de vazão	$0-32 \text{ m}^3/\text{h} \leftrightarrow 0-20 \text{ mA}$
Equipamento de aquisição de dados: <i>datalogger</i> HP-34970 A		

3. RESULTADOS

A Tab. 3 apresenta uma síntese dos resultados obtidos nos ensaios, com a configuração nacional alternativa e com as configurações importados dedicadas à fotovoltaica.

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

AMT	MOTOBOMBA SOMAR: BMSAF-407 / 1,0-8 (1500Wp – 20sx1p)				MOTOBOMBA GRUNDFOS: SP3A-10 (1575Wp – 7sx3p)				MOTOBOMBA SOLARJACK: SCS10-230 (1575Wp – 7sx3p)			
	I_{med}	Q_{dmed}	Q_{dcor}	η_{med}	I_{med}	Q_{dmed}	Q_{dcor}	η_{med}	I_{med}	Q_{dmed}	Q_{dcor}	η_{med}
30	5,16	21,4	20,7	28,4	6,79	28,30	20,9	33,6	6,12	23,63	19,3	31,0
40	5,84	16,3	13,9	27,6	6,27	20,28	16,2	35,2	6,04	21,24	17,6	36,0
50	6,16	12,7	10,3	22,7	6,22	16,31	13,1	33,6	6,28	19,86	15,8	38,8

Através da aplicação da Eq. (1) (Fedrizzi, 2003), se obteve o volume bombeado corrigido para as condições de referência, Irradiação diária de 5 kWh/m^2 .

$$Q_{dcor} = \frac{Q_{dmed} \cdot I_{ref}}{I_{med}} \quad (1);$$

Onde:

Q_{dcor} é o volume diário corrigido, m³/dia,

Q_{dmed} é o volume medido, m³/dia,

I_{med} é a irradiação solar diária medida, kWh/m²/dia,

I_{ref} é a irradiação solar diária de referência, 5 kWh/m²/dia.

E para obter a eficiência diária (η_{med}) do sistema se utiliza a Eq. (2), que representa a relação entre a energia hidráulica produzida e a energia elétrica fornecida pelo arranjo fotovoltaico.

$$\eta_{med} = 2,725 \cdot AMT \cdot \frac{\int_0^t Q \cdot dt}{\int_0^t Vcc \cdot Icc \cdot dt} \quad (2);$$

Onde:

AMT é a altura manométrica total, mca,

Q é a vazão, m³/h,

Vcc é a tensão de operação do gerador fotovoltaico, V

Icc é a corrente de operação do gerador fotovoltaico, A.

A partir dos resultados constata-se que a 30m, o volume corrigido da configuração alternativa é 1% menor do que o sistema Grundfos e 7,3% maior do que o sistema Solarjack. Para altura manométrica de 40m o volume corrigido da configuração alternativa é 14,2% menor do que o sistema Grundfos e 21% menor do que o sistema Solarjack. Para altura manométrica de 50m o volume corrigido do sistema alternativo é 21,4% menor do que o Grundfos e 34,8% menor do que o sistema Solarjack.

Considerando 30% como valor de referência recomendável para a eficiência diária do conjunto motobomba em sistemas fotovoltaicos de bombeamento com bombas centrífugas, pode-se constatar que para 30 m a configuração alternativa está 1,6 pontos percentuais abaixo de 30%, o sistema Grundfos está 3,6 pontos percentuais acima de 30% e o sistema Solarjack 1 ponto percentual acima de 30%. Para a altura manométrica de 40m a configuração alternativa 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%. Para a altura manométrica de 50m a configuração alternativa 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%. As Figs. 3, 4 e 5 apresentam as medidas de eficiência para as três alturas manométricas ao longo de um dia de bombeamento.

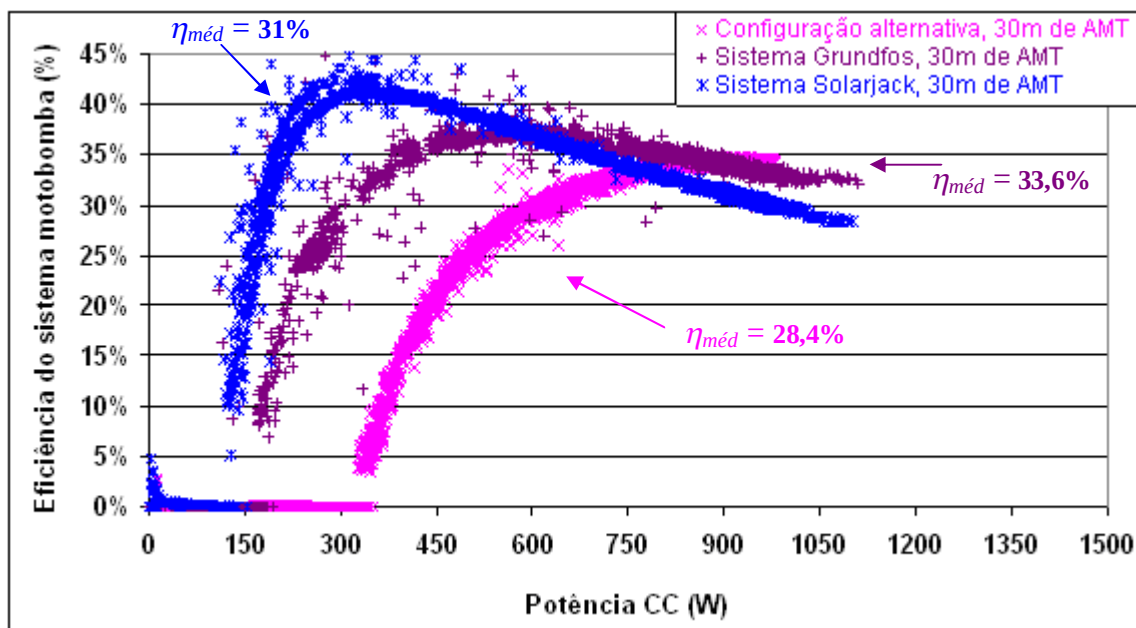


Figura 3- Curvas de eficiência em função da potência do gerador fotovoltaico, para 30m de AMT.

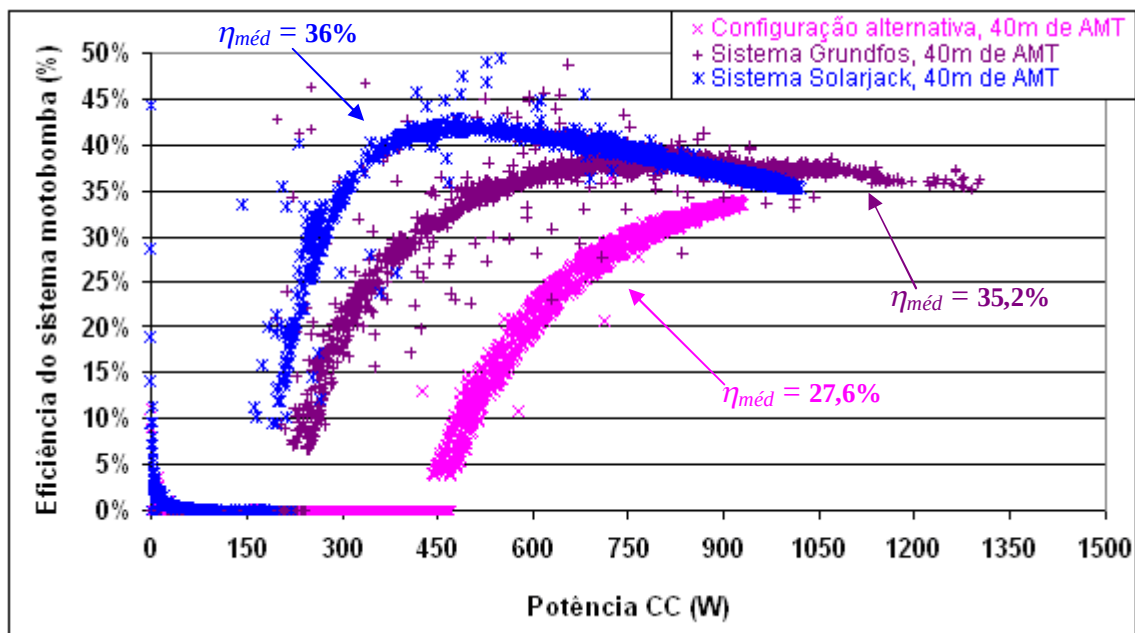


Figura 4- Curvas de eficiência em função da potência do gerador fotovoltaico, para 40m de AMT.

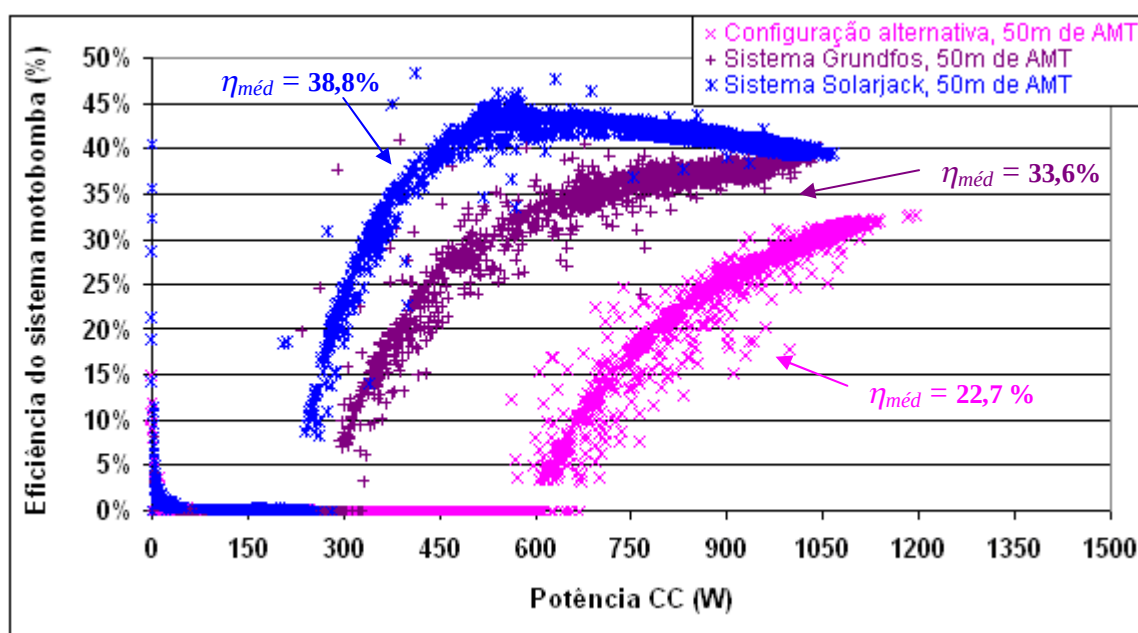


Figura 5- Curvas de eficiência em função da potência do gerador fotovoltaico, para 50m de AMT.

4. AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Para o cálculo da avaliação econômica foi considerado como referência um ciclo de vida do gerador fotovoltaico de 25 anos. Para a reposição dos demais equipamentos foram considerados os seguintes valores para reposição: 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.

Na Tab. 3 são apresentados os preços dos equipamentos da configuração alternativa e das configurações dedicadas à fotovoltaica e o custo do investimento inicial de cada sistema.

Tabela 3: Preços dos equipamentos no mercado brasileiro e custo do investimento inicial de cada sistema.

	SOMAR	GRUNDFOS	SOLARJACK
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	6.025,00
Preço do controlador de potência (R\$)	590,00	3.300,00	1.550,00
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	28.985,50
Investimento inicial (Io) para 40m de AMT (R\$)	23.140,00	27.947,50	29.022,50
Investimento inicial (Io) para 50m de AMT (R\$)	23.177,00	27.984,50	29.059,50

A partir da Tab. 3 pode-se constatar que o arranjo fotovoltaico da configuração alternativa representa 88% do investimento inicial e os equipamentos só representam o 12% do investimento inicial. Já no caso dos sistemas dedicados à tecnologia fotovoltaica o preço do arranjo fotovoltaico representa 76% (sistema Grundfos) e 73% (sistema Solarjack) do investimento inicial e os equipamentos representam 24% (sistema Grundfos) e 27% (sistema Solarjack) do investimento inicial.

Para a avaliação econômica comparativa foi calculado, para cada sistema, o custo do ciclo de vida (CCV), R\$, através da aplicação da Eq. (3).

$$CCV = I_o + CMB \times (1+i)^{-N_{MB}} + CCP \times (1+i)^{-N_{CP}} + CPC \times (1+i)^{-N_{PC}} + PCB \times (1+i)^{-N_{CB}} \quad (3)$$

Onde:

I_o é o investimento inicial para a compra do sistema de bombeamento, R\$,

i é a taxa de desconto anual, %,

CMB é o custo da motobomba, R\$,

CCP é o custo do dispositivo de condicionamento de potência, R\$,

CPC é o custo do quadro elétrico com dispositivos de controle, R\$,

PCB 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_{PC} é a vida útil do painel de controle, anos; e N_{CB} é a vida útil do cabo elétrico.

O custo do ciclo de vida anualizado (CCVA), R\$/ano, foi calculado a partir da Eq (4),

$$CCVA = CCV * FRC \quad (4)$$

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, n , Eq. (5)..

$$FRC = \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}} \quad (5)$$

O custo unitário do volume bombeado (CVB), R\$/m³, para cada sistema utilizado determina o custo anual do projeto e divide pelo volume bombeado ao longo de um ano, Eq. (6).

$$CVB = \frac{CCVA}{VBa} \quad (6)$$

VBa é o volume bombeado por ano, m³/ano.

O custo do volume específico bombeado (CVEB), R\$/m⁴, avalia diferentes tecnologias de bombeamento para situações que envolvam diferentes alturas manométricas e volume bombeado corrigido, ou seja, o custo do m³ bombeado por m de altura manométrica do sistema em questão. Este custo é obtido a partir da Eq. (7).

$$CVEB = \frac{CVB}{AMT} \quad (7)$$

AMT é a altura manométrica total, m.

A Tab. 4 apresenta o custo do ciclo de vida, o custo do ciclo de vida anualizado, os custos anuais para reposição dos equipamentos¹, o custo do volume bombeado e o custo do volume específico bombeado para as três configurações analisadas. Estas figuras de mérito foram calculadas para uma taxa de desconto de 12% ao ano.

Tabela 4: Figuras de mérito da análise econômica financeira, taxa de desconto de 12% ao ano e 25 anos.

	SOMAR	GRUNDFOS	SOLARJACK
30 metros			
Volume bombeado na irradiação de referência (m ³)	20,7	20,9	19,3
CCVA (R\$)	3.256,00	4.221,72	4.687,31
Custo anual para reposição dos equipamentos (R\$)	312,97	665,73	994,25
CVB (R\$/m ³)	0,43	0,55	0,66
CVEB (R\$/m ⁴)	0,014	0,018	0,022
40 metros			
Volume bombeado na irradiação de referência (m ³)	13,9	16,2	17,6
CCVA (R\$)	3.263,74	4.229,45	4.695,04
Custo anual para reposição dos equipamentos (R\$)	315,28	668,04	996,56
CVB (R\$/m ³)	0,64	0,71	0,73
CVEB (R\$/m ⁴)	0,016	0,018	0,018
50 metros			
Volume bombeado na irradiação de referência (m ³)	10,3	13,1	15,8
CCVA (R\$)	3.271,47	4.237,19	4.702,78
Custo anual para reposição dos equipamentos (R\$)	317,59	670,34	998,87
CVB (R\$/m ³)	0,87	0,89	0,81
CVEB (R\$/m ⁴)	0,017	0,018	0,016

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 de 40 e 50 metros - o custo do volume bombeado não apresenta diferenças significativas. Apenas para a altura manométrica de 50 metros o custo do metro cúbico fornecido pelo sistema Solarjack é 6,9% inferior ao da configuração alternativa.

5. CONCLUSÕES

Os resultados mostram que a adoção da configuração alternativa exige cuidados na seleção do conjunto motobomba. Os sistemas importados apresentam maior eficiência diária. Para manter a eficiência diária do conjunto motobomba da configuração alternativa próxima de 30%, para alturas manométricas superiores a 40 metros, exigiria a utilização de mais estágios na motobomba. Verificou-se também que a configuração alternativa, conversor de frequência Weg CFW08 e motobomba Somar de 1 CV e 8 estágios, trabalha com eficiência diária próxima aos 30% na faixa de operação de 30 a 40 metros. Portanto, com uma adequada escolha da configuração alternativa pode-se obter desempenhos semelhantes aos obtidos com os sistemas importados dedicados à fotovoltáica. Para 30 metros a configuração alternativa bombeou somente 1% a menos que o sistema Grundfos.

A avaliação econômica das três configurações revela a competitividade da configuração alternativa frente aos sistemas importados dedicados à fotovoltáica. Alia-se a isso a disponibilidade dos equipamentos de condicionamento de potência e a facilidade de reposição.

Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio da CAPES, FAPESP e FINEP.

REFERÊNCIAS

¹ Custo do ciclo de vida anualizado das reposições previstas nos 25 anos de operação.

- Alonso-Abella M., Lorenzo E., Chenlo F., 2003. PV water pumping systems based on standard frequency converters, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 11: 179-191.
- Bezerra P., 2002. *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, Brasil.
- Brito A.U., Zilles R., 2004. Conversores de frequência, uma solução para diminuir a dependência aos equipamentos importados em aplicações de bombeamento fotovoltaico; IV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético – IV CBPE, Itajubá, Minas Gerais, Brasil.
- 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., Fedrizzi M.C., Zilles R., 2007 a. PV Pumping Systems: A Useful Tool to Check Operational Performance, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 15:41-49;
- Brito, A., Fedrizzi, M. C., Zilles, R. 2007 b . O uso do conversor de frequência como dispositivo de condicionamento de potência em sistema fotovoltaico de bombeamento, I Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, Ceará, Brasil.
- Cota Espericueta A.D., Foster R.E., Gómez Rocha L.M., Ross M.P., Hanley C.J., Gupta V.P., Montúfar Avilez O., Paredes Rubio AR., 2004. Evaluación de 52 Sistemas Fotovoltaicos de Bombeo de Agua Instalados En México a través Del PERM; Congreso Mundial de Energía Renovable, Guanajuato, México.
- EPIA., 1996. Photovoltaics in 2010; In: Commission of the European Communities – Directorate General for Energy, Summary Report.
- Fedrizzi, M.C., 1997. Fornecimento de água com sistemas de bombeamento fotovoltaico, Dissertação apresentada ao Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Fedrizzi M.C., Zilles R., 1999. 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, Brasil.
- Fedrizzi M.C., 2003. Sistemas fotovoltaicos de abastecimento de água para uso comunitário: Lições apreendidas e procedimentos para potencializar sua difusão; Tese apresentada ao Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Kaunmuang, P., et al., 2001. Assessment of photovoltaic systems in Thailand – one decade experience. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 67, pp. 529-534.
- Lorenzo, P., et al., 2005. Boas práticas da implantação de sistemas de bombeamento fotovoltaico. Instituto de Energia Solar. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Perlin J., 1999. From space to earth, Aetec Publications.
- Posorski, R., 1996. Photovoltaic water pumps, an attractive for rural drinking water supply. *Solar Energy*, vol. 58, pp. 155-163.

EVALUATION OF THREE PHOTOVOLTAIC PUMPING CONFIGURATIONS

Abstract. This work presents the operational performance and economic evaluation of three photovoltaic pumping configurations with motor pump power between 0.75 and 1 CV. Two systems are solar energy dedicated and one adopts the configuration proposal for Alonso Abella (2003) and Brito and Zilles (2004), that is, motor pump and conditioning power system from national factory production. The results show that the alternative configuration has smaller motor pump daily efficiency. The economic evaluation reveals the competitiveness of the alternative configuration when compared with imported solar energy dedicated systems. It's worth mention, as additional advantage, the readiness of the conditioning power system equipments and the replacement easiness. It was also verified that the alternative configuration, variable speed drive Weg CFW08 and 1 CV SOMAR motor pump with 8 stages works with daily efficiency close to 30% between 30 and 40 meters head. Therefore, with an appropriate choice of the alternative configuration motor pump similar solar energy dedicated performance could achieve. The alternative configuration pumped only 1% less than the Grundfos system for 30 m operation.

Key words: PV Pumping, Economic Evaluation, Variable Speed-Drive.