

COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE DOIS SISTEMAS DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO

Marco Antônio Steigleder – steigled@unisinis.br

Mário Henrique Macagnam – mhmam@unisinis.br

Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinis – Ciências Exatas e Tecnológicas

Arno Krenzinger – arno@mecanica.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS - Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

3.5 – Sistemas Fotovoltaicos Autônomos e Híbridos

Resumo. *Para a realização desse trabalho foi construída uma bancada destinada a realizar experimentos que permitissem medir e comparar o desempenho de dois sistemas de bombeamento diretamente acoplados a geradores fotovoltaicos. Um dos sistemas usou uma bomba centrífuga acoplada a um gerador fotovoltaico formado por três módulos fotovoltaicos. O outro, utilizou uma bomba de diafragma acoplada a um só módulo fotovoltaico. Os experimentos foram realizados em duas etapas distintas. A primeira foi realizada com os motores acoplados a uma fonte de potência em corrente contínua e serviu para a determinação das curvas de desempenho de cada uma das bombas, das curvas dos sistemas, assim como das curvas características $I \times V$ de cada um dos motores que acionavam as bombas. A segunda foi feita com os sistemas acoplados diretamente aos geradores fotovoltaicos. A determinação da configuração dos geradores fotovoltaicos destinados a acionar os diferentes sistemas de bombeamento em análise nesse trabalho foi feita por meio da sobreposição das curvas características $I \times V$ dos motores e dos módulos fotovoltaicos. A parte experimental, estando os sistemas acoplados aos geradores, constou de medidas realizadas em intervalos de tempo de cinco segundos, para cada bomba e em várias alturas, das seguintes variáveis: temperatura ambiente, irradiância, temperatura dos módulos, corrente e tensão do motor, da rotação do motor, da temperatura da água, do diferencial de pressão entre entrada e saída da bomba e da vazão. As diversas alturas foram simuladas por meio da abertura e/ou fechamento de uma válvula de controle de vazão colocada na extremidade tubulação de descarga. De posse dos dados medidos foi possível calcular, para cada bomba, as eficiências dos sistemas.*

Palavras-chave: Sistemas fotovoltaicos, bombeamento de água, acoplamento motor-bomba, energia solar.

1. INTRODUÇÃO

O uso da energia solar fotovoltaica para bombeamento de água é uma forma bastante eficaz de utilização desta tecnologia, pois apresenta uma relação natural entre a disponibilidade de radiação solar e a demanda de água tanto para irrigação como para consumo. A necessidade de água aumenta durante os períodos mais quentes quando os níveis de radiação solar são mais elevados e a potência gerada pelo sistema fotovoltaico é maior. Estes sistemas são particularmente adequados para o fornecimento de água em locais remotos onde não existe a disponibilidade de fornecimento de energia elétrica.

As duas maiores desvantagens destes sistemas são o elevado custo inicial e a baixa eficiência de conversão. Para otimização de seu uso, a potência elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos deve ser eficientemente utilizada.

Para maximizar a transferência de potência elétrica do gerador fotovoltaico ao motor, o grupo motor-bomba e o gerador devem ser escolhidos de tal modo que suas curvas características $I \times V$ se interceptem o mais próximo possível do ponto de máxima potência do gerador fotovoltaico.

Uma das formas mais utilizadas de sistemas de bombeamento fotovoltaico é a do acoplamento direto entre gerador e o sistema motor-bomba, eliminando a presença de baterias de acumulação e,

com isso, aumentando a robustez do sistema. Inúmeros trabalhos foram publicados neste assunto, como por exemplo, os de Roger (1979) e Appelbaum (1979, 1981 e 1986).

No intuito de colaborar para o desenvolvimento de formas mais eficientes de utilização de energias não convencionais para a satisfação de necessidades prementes de comunidades isoladas, este trabalho propõe-se a analisar, de forma mais detalhada, os sistemas de bombeamento de água utilizando energia solar fotovoltaica.

Desta forma, será apresentada a análise experimental do desempenho de dois sistemas de bombeamento de água utilizando o acoplamento direto entre gerador e o conjunto motor-bomba sem a utilização de qualquer dispositivo de controle regulador de potência entre gerador e carga.

Foram analisadas duas configurações do sistema: a primeira utilizando uma bomba centrífuga radial e a segunda, uma bomba volumétrica do tipo diafragma. As duas bombas foram acionadas por motores de corrente contínua e o número de painéis do gerador foi obtida a partir da análise da potência gerada.

Esse trabalho foi realizado no Laboratório de Energia Solar da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Unisinos, em São Leopoldo, RS. Sua localização geográfica é: latitude de 29° 47' sul; longitude de 51° 09' oeste e altitude de 60 m.

2. ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Para análise experimental foi projetada e construída uma bancada composta dos seguintes dispositivos: gerador fotovoltaico, formado por módulos Siemens SP 75; circuito hidráulico; circuito elétrico; conjunto motor e bomba centrífuga, formado por um motor marca Bosch de imã permanente com tensão nominal 12 VDC e corrente nominal de 18 A e bomba centrífuga marca Beck com impelidor fechado de 6 pás inclinadas para trás; conjunto motor e bomba volumétrica de diafragma marca Shurflo, modelo 8000 com tensão nominal de 12 VDC e corrente nominal de 7 A; medidor eletromagnético de vazão da marca Danfoss; medidor de pressão diferencial da marca ABB; piranômetro Eppley modelo PSP; medidores de tensão e corrente; medidor ótico de rotação; medidores de temperatura dos módulos, do ambiente e da água do reservatório; sistema de aquisição de dados HP 34970 A com multiplexador controlado por um microcomputador e uma fonte de potência de corrente contínua Kepco modelo BOP 20-20M. As medidas foram realizadas em intervalos de 5 segundos, sendo estes dados armazenados para posterior tratamento e utilização. Para as análises, efetuou-se média destes dados em intervalos de 60 segundos.

O circuito hidráulico foi projetado para elevar água desde o reservatório, colocado no nível do piso do laboratório, até uma altura estática constante de 1,30 metros. Em sua trajetória a água era conduzida pela tubulação de sucção até a bomba e dessa era direcionada para a tubulação de recalque, por onde escoava até ser liberada livre na atmosfera. A água retornava ao tanque através de um funil. Completava-se com isso um ciclo, permitindo que o nível da água no reservatório se mantivesse constante.

A Fig. 1 mostra o arranjo dos equipamentos e instrumentos de medidas usados nos experimentos suas correspondentes vinculações com o sistema de aquisição de dados. Os números colocados dentro dos retângulos correspondem aos canais do multiplexador.

Os experimentos foram realizados ao longo de vários períodos durante os anos de 2004 e 2005, abrangendo várias condições climáticas. A análise experimental pode ser dividida em três etapas: na primeira foram determinadas as curvas características $I \times V$ das duas bombas, utilizando-se a bancada experimental e uma fonte de potência para o controle das condições de alimentação dos motores. Para a realização dos ensaios, seguiram-se os procedimentos apresentados na NBR 6401 (ABNT, 1989). Mostram-se, na Fig. 2, exemplos de curvas para as duas bombas testadas, observando-se os picos de corrente durante o arranque do motor e os pontos de início de vazão. A segunda parte deste experimento, utilizando as curvas características do conjunto motor-bomba, analisa a melhor configuração dos módulos fotovoltaicos e finalmente, na terceira parte, estuda-se o desempenho do sistema em condições reais de funcionamento.

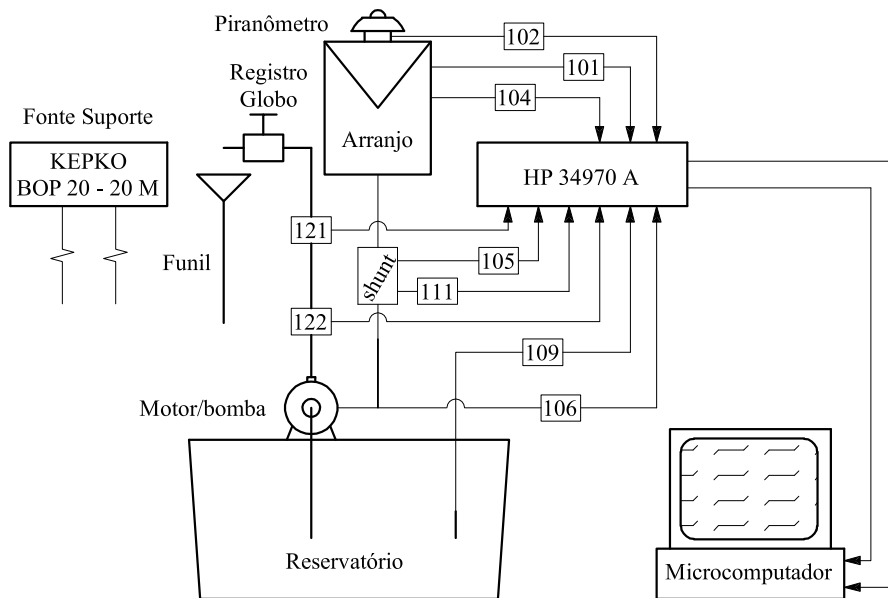


Figura 1 – Arranjo dos equipamentos e instrumentos de medidas usados nos experimentos.

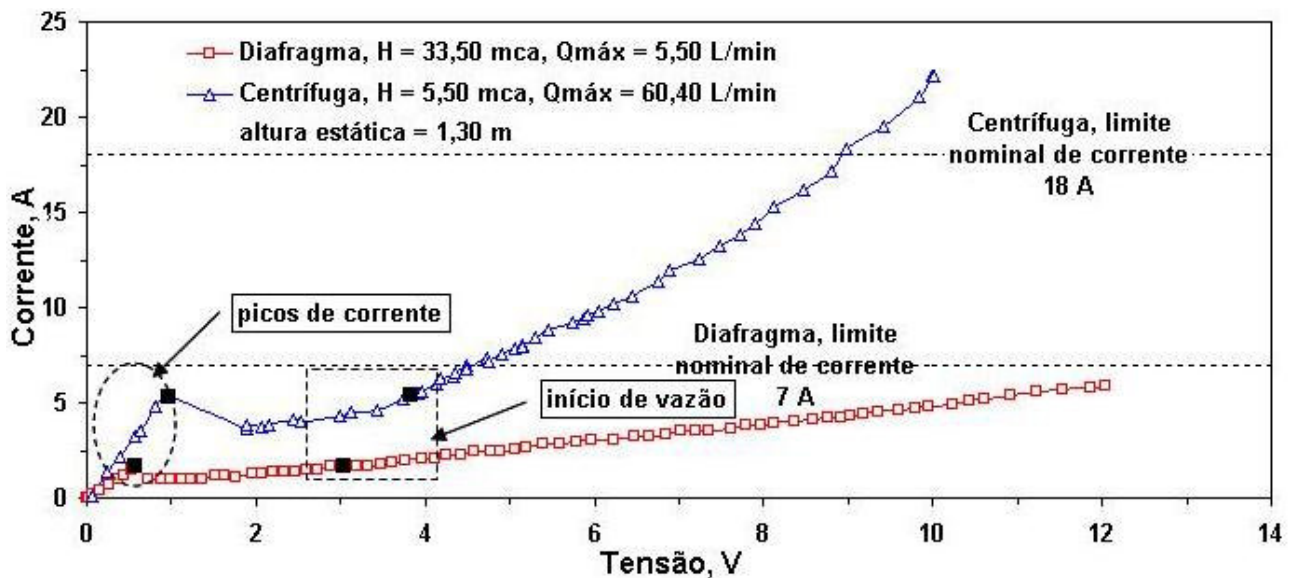


Figura 2 - Curvas características $I \times V$ das bombas centrífuga e volumétrica, obtidas a partir de ensaios em bancada com condições controladas.

3. ANÁLISE DOS ACOPLAMENTOS

A determinação da configuração do arranjo fotovoltaico mais adequado para operar uma dada carga consiste em fazer a sobreposição das curvas $I \times V$ da carga com as curvas $I \times V$ dos arranjos fotovoltaicos. A transferência de potência do gerador à carga será maximizada quando as curvas $I \times V$ da carga e do gerador se interceptarem o mais próximo possível do ponto de máxima potência do gerador (Roger, 1978). A análise realizada consistiu, basicamente, em sobrepor a curva $I \times V$ do conjunto motor-bomba sobre as curvas do gerador fotovoltaico para diversos valores de irradiação solar, corrigidas pela temperatura do módulo.

A condição limite aplicada para esta análise foi a recomendação dos fabricantes dos motores no sentido de operar com tensão máxima na ordem de $12 \text{ V} \pm 10\%$ e corrente máxima de 18 A para o motor da bomba centrífuga e de 7 A para o motor da bomba volumétrica. Cabe lembrar mais uma vez que nestes experimentos não foi utilizado nenhum tipo de controlador de carga para o conjunto motor-bomba.

3.1 Escolha do arranjo para a bomba centrífuga

A interseção da curva do conjunto motor-bomba com a curva do gerador, para uma dada irradiação solar, caracteriza o ponto de trabalho do sistema. Considerando que a eficiência máxima de conversão acontece quando esta interseção acontece justamente no ponto de máxima eficiência do gerador, define-se a eficiência de acoplamento como a relação existente entre a potência no ponto de trabalho em determinada curva do arranjo fotovoltaico e a máxima potência na mesma curva, conforme a Eq. 1:

$$\eta_{\text{acoplamento}} = \frac{P_{\text{PT}}}{P_{\text{MAX}}} \quad (1)$$

onde, P_{PT} é a potência no ponto de trabalho e P_{MAX} é a potência máxima na curva $I \times V$. Assim, pode-se definir também o desacoplamento, conforme a Eq. 2, como a diferença entre o ponto de trabalho e o ponto de máxima potência.

$$\text{desacoplamento} = 1 - \eta_{\text{acoplamento}} \quad (2)$$

O arranjo com um módulo não gera potência suficiente para acionar o motor e para a condição de dois módulos, o desacoplamento é de 47,8%. Nas Fig. 3 e 4 são mostradas, como exemplo desta análise, as curvas dos arranjos fotovoltaicos, formados por três e quatro módulos, respectivamente, e para várias condições de irradiação solar e as curvas $I \times V$ do conjunto motor-bomba. É possível verificar que qualquer um destes arranjos entrega potência suficiente para gerar a corrente de pico ou de arranque do motor, assim como para realizar o bombeamento. Entretanto, em todos os casos existe um desacoplamento entre os pontos de máxima potência das curvas dos arranjos e os pontos de trabalho do sistema. Esse desacoplamento é responsável, entre outros, pela redução da eficiência da conversão fotovoltaica e do conjunto motor e bomba. Portanto, é de se esperar que a escolha do arranjo mais adequado deva recair sobre aquele em que o desacoplamento é menor, em todos os níveis de irradiação.

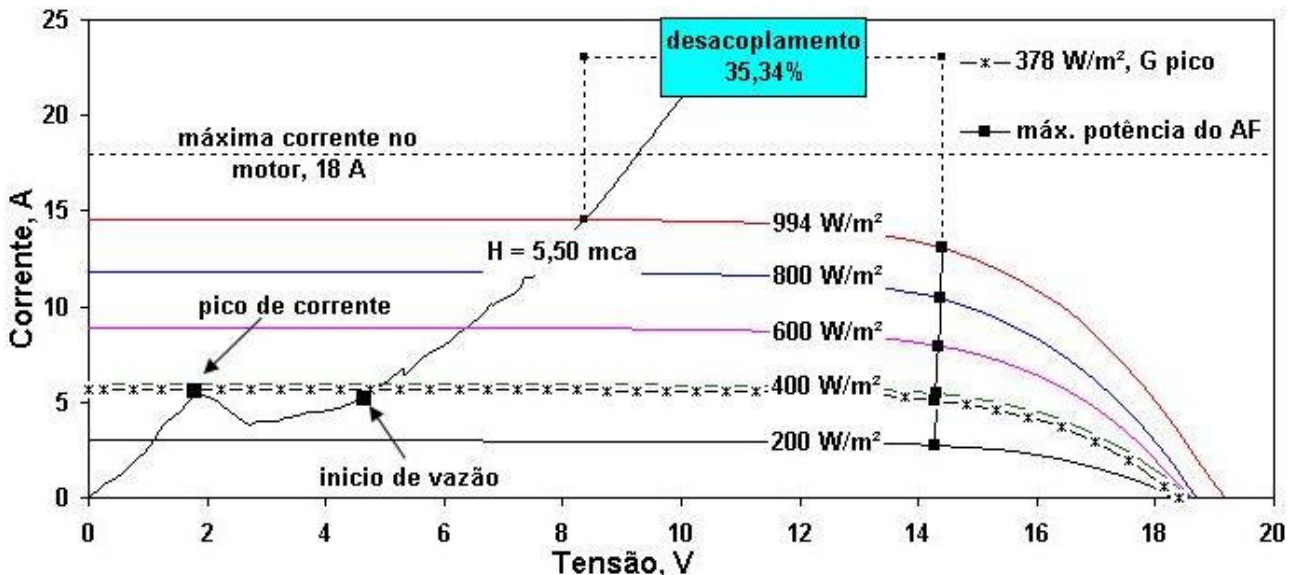


Figura 3 - Curvas $I \times V$ do conjunto motor-bomba centrífuga e curvas $I \times V$ do gerador fotovoltaico formado por três módulos conectados em paralelo.

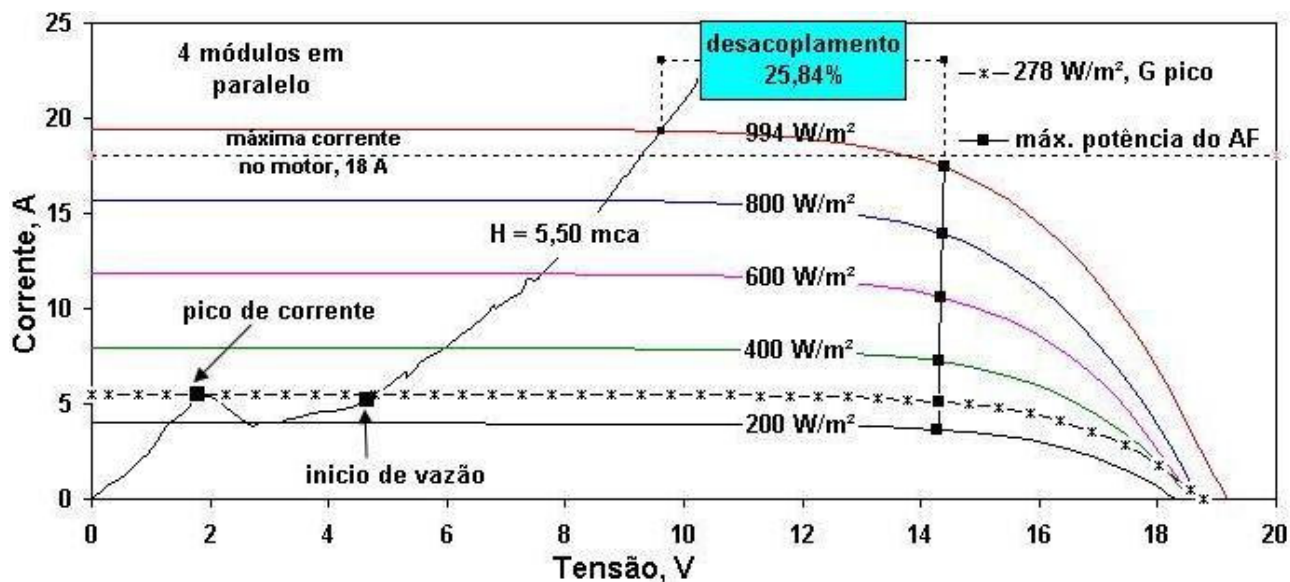


Figura 4 - Curvas I x V do conjunto motor-bomba centrífuga e curvas I x V do gerador fotovoltaico formado por quatro módulos conectados em paralelo.

Por esta análise, conclui-se que o acoplamento mais adequado é com um arranjo formado por quatro módulos fotovoltaicos. Entretanto, para irradiancias superiores a 920 W/m^2 , esse arranjo pode produzir correntes superiores a 18 A e que ultrapassam o limite de segurança recomendado pelo fabricante do motor.

Nesse trabalho faz-se a análise do acoplamento direto e sem o uso de dispositivos que protejam o motor de sobrecorrentes e/ou sobretensões. Assim sendo, a escolha do arranjo adequado recai sobre aquele formado por três módulos fotovoltaicos, pois o desacoplamento é menor em relação ao arranjo formado por dois módulos fotovoltaicos.

3.2 Escolha do arranjo para a bomba de diafragma

Nas Figuras 5 e 6 são apresentadas as curvas I x V do conjunto motor-bomba volumétrica e as curvas I x V dos arranjos fotovoltaicos para um e dois módulos, respectivamente e para diferentes níveis de irradiação solar.

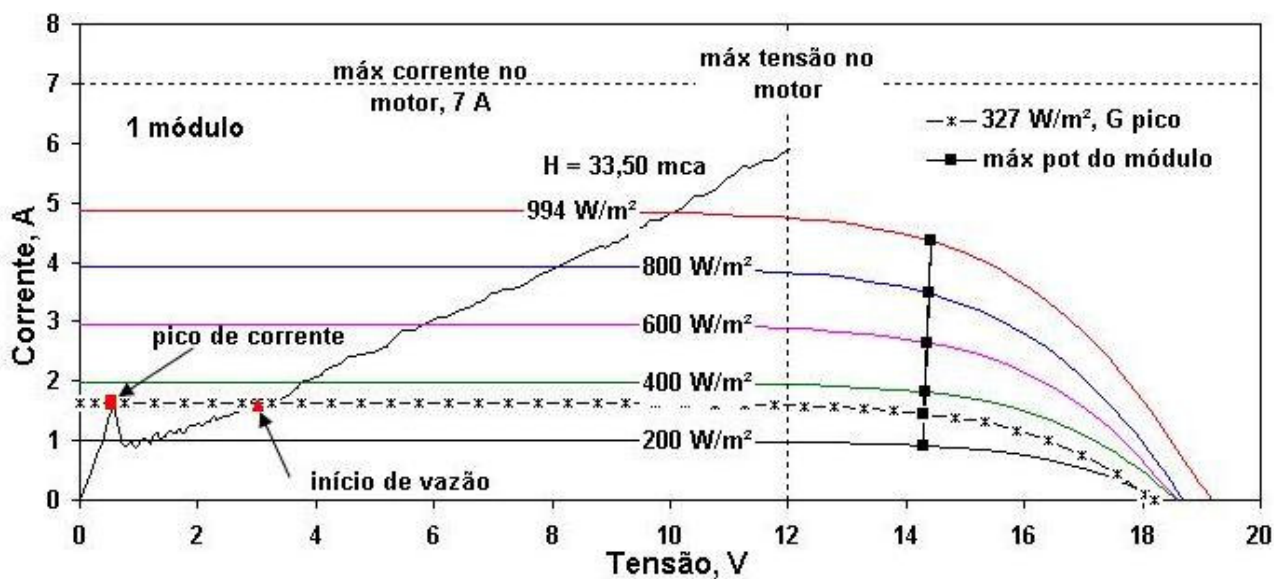


Figura 5 - Curvas I x V do conjunto motor-bomba volumétrica e curvas I x V do gerador fotovoltaico formado por um módulo.

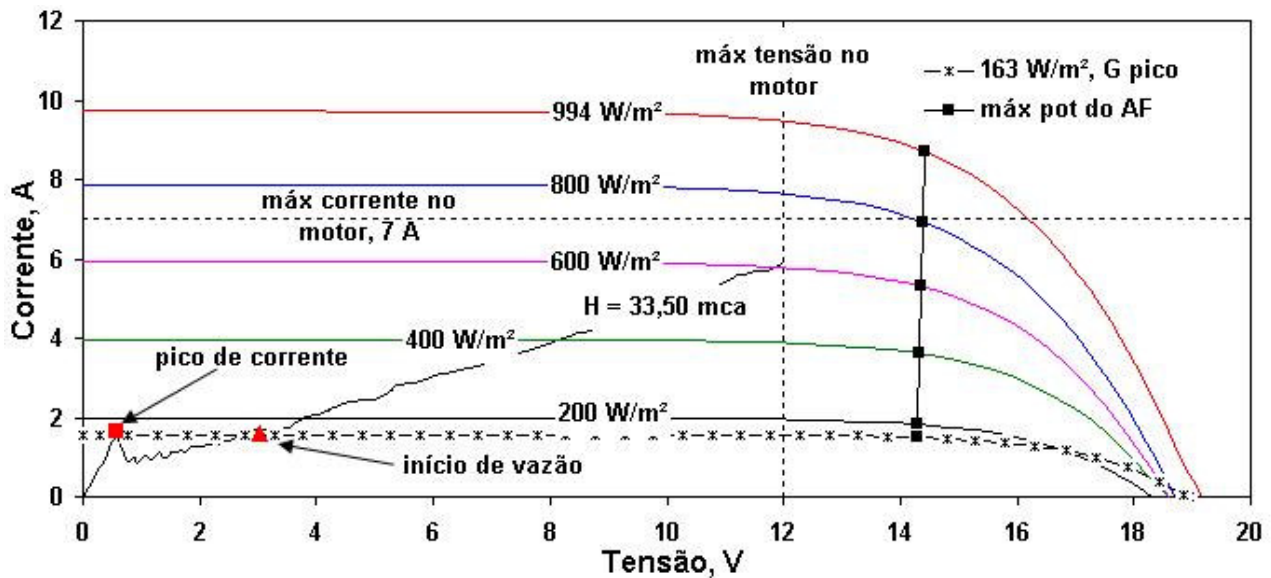


Figura 6 - Curvas I x V do conjunto motor-bomba volumétrica e curvas I x V do gerador fotovoltaico formado por dois módulos conectados em paralelo.

Os dois arranjos entregam potências suficientes para gerar a corrente de arranque do motor e realizar o bombeamento. O desacoplamento do arranjo de um módulo é maior do que o de dois módulos. Sabendo-se que o fator desacoplamento é determinante na escolha do gerador mais adequado, a mesma deveria recair sobre o arranjo de dois módulos. Entretanto, a partir da irradiância de 600 W/m^2 , esse arranjo gera tensões muito acima da máxima recomendada, que é de 12 V, o que pode causar danos elétricos no motor se não forem usados dispositivos de segurança e proteção. Assim sendo, a escolha do arranjo mais adequado recai sobre aquele formado por um só módulo fotovoltaico.

4. ANÁLISE DOS DESEMPENHOS

O processo de escolha de uma bomba para determinada aplicação depende, tecnicamente, da análise de seu desempenho quando submetida a determinadas condições operacionais.

4.1 Curvas de eficiência e vazão – $\eta \times Q$

A relação existente entre a eficiência do conjunto motor-bomba e a vazão é mostrada pela curva de eficiência e vazão. A eficiência com que o conjunto formado pelo motor e bomba opera é expressa pela relação entre a potência hidráulica produzida e potência elétrica solicitada pelo motor, conforme a Eq. 3.

$$\eta = \frac{\text{Pot}_h}{\text{Pot}_e} \quad (3)$$

A potência hidráulica produzida pela bomba, Pot_h pode ser calculada pela Eq. 4:

$$\text{Pot}_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (4)$$

onde ρ é a massa específica da água, kg/m^3 ; g é a aceleração da gravidade, $9,81 \text{ m/s}^2$; Q é a vazão em m^3/s e H é altura em mca (metro de coluna de água).

O cálculo da potência elétrica solicitada, Pot_e , para motores alimentados por corrente contínua, é dado pela Eq. 5:

$$\text{Pot}_e = V \cdot I \quad (5)$$

onde V é a tensão e I é a corrente.

Na Fig. 7 são representadas, qualitativamente, as eficiências dos dois conjuntos motor-bomba. Nota-se que para a bomba centrífuga a eficiência do conjunto motor-bomba aumenta com a vazão enquanto que para a bomba volumétrica a eficiência diminui com a vazão.

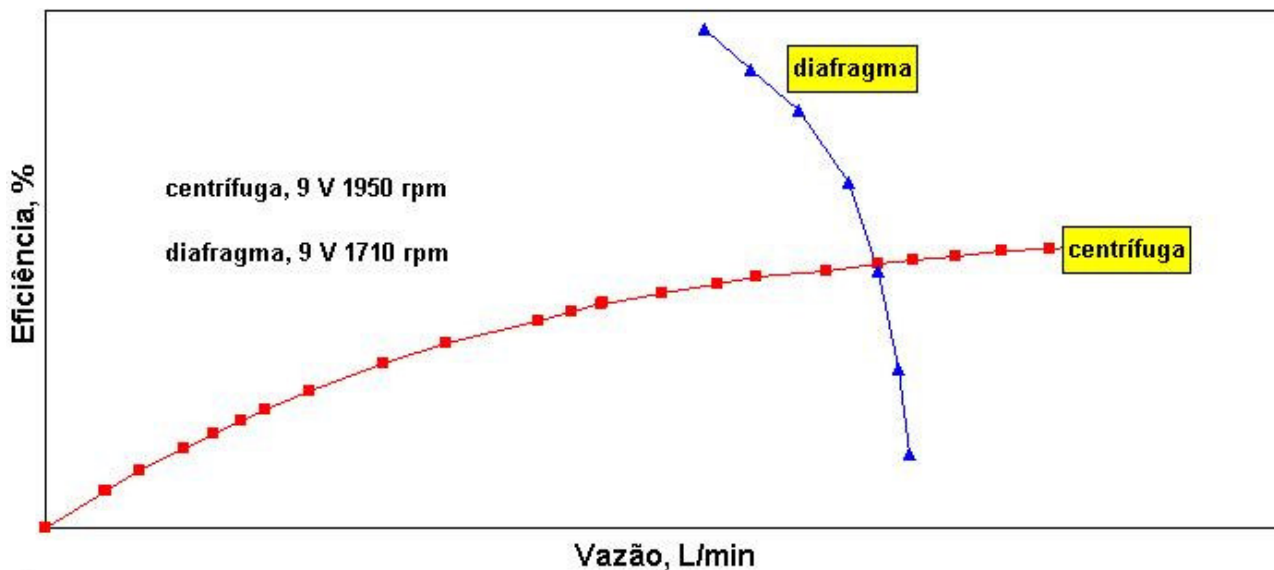


Figura 7 - Curvas $\eta \times Q$ das bombas centrífuga e volumétrica.

4.2 Eficiência em condições reais de operação

Na Fig. 8 são apresentadas as curvas de eficiências dos conjuntos motores e bombas em função da hora local, em diferentes alturas.

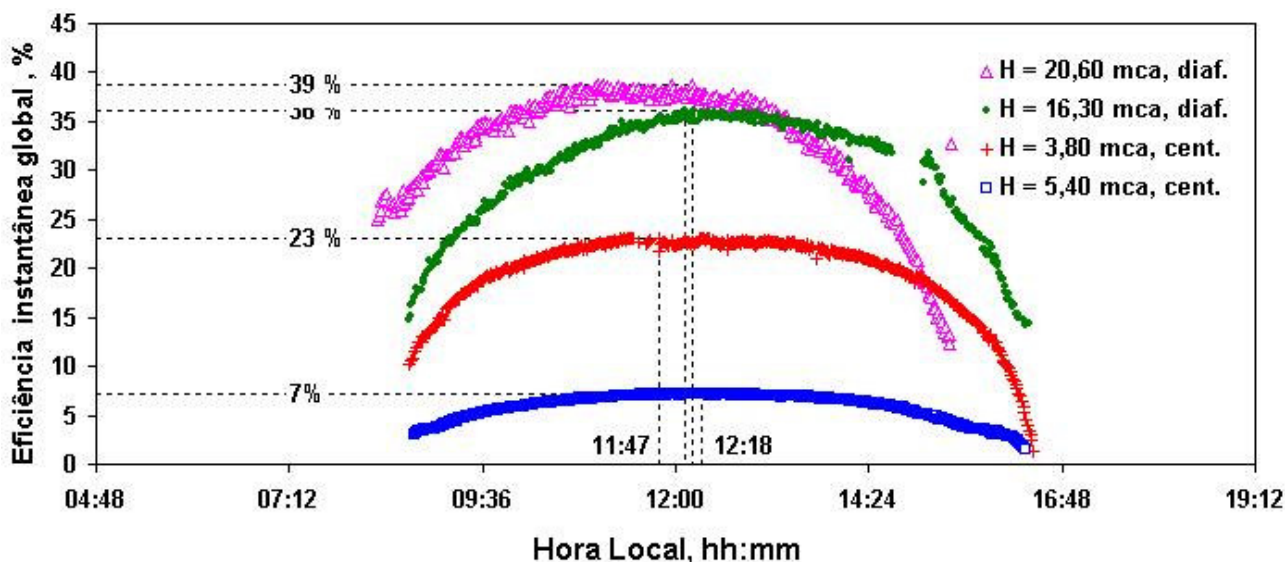


Figura 8 – Curvas de eficiência para os dois conjuntos motor-bomba, em função da hora local, para duas diferentes alturas.

As faixas de alturas foram definidas pelas características operacionais da bancada experimental. Nota-se que para a bomba centrífuga as melhores eficiências ocorrem para a menor altura, enquanto que para a bomba de diafragma as melhores eficiências ocorrem para as maiores alturas. Para ambas as bombas, as máximas eficiências dos conjuntos motores e bombas ocorrem por volta do meio-dia, horário em que a incidência de radiação no plano dos módulos fotovoltaicos é maior. Ao comparar as diferenças entre as eficiências máximas alcançadas por cada uma das bombas, nas diferentes

alturas, verifica-se que para a bomba de diafragma é da ordem de 3 %, enquanto que para a bomba centrífuga é da ordem de 16 %.

A eficiência da conversão fotovoltaica, η_{fv} , é definida como a relação entre a potência elétrica e a irradiância incidente no gerador fotovoltaico, conforme a Eq. 6.

$$\eta_{fv} = \frac{Pot_e}{Ag.G} \quad (6)$$

A energia elétrica diária, E_{ed} , em J, é obtida por meio da integração da potência elétrica instantânea Pot_e , ao longo do tempo t , resultando na Eq. 7:

$$E_{ed} = \int_{dia} Pot_e . dt \quad (7)$$

A irradiação diária recebida pelo gerador fotovoltaico, E_{dgf} , é obtida por meio da integração da irradiância incidente no plano do arranjo fotovoltaico, G , ao longo do tempo t , multiplicada pela área do gerador, Ag . Desta forma, o cálculo da eficiência diária da conversão fotovoltaica pode ser feito conforme a Eq. 8:

$$\eta_{fv \text{ diária}} = \frac{E_{ed}}{E_{dgf}} \quad (8)$$

A Fig. 9 mostra a eficiência da conversão fotovoltaica, instantâneas máximas e diárias, calculadas para duas alturas diferentes para cada bomba.

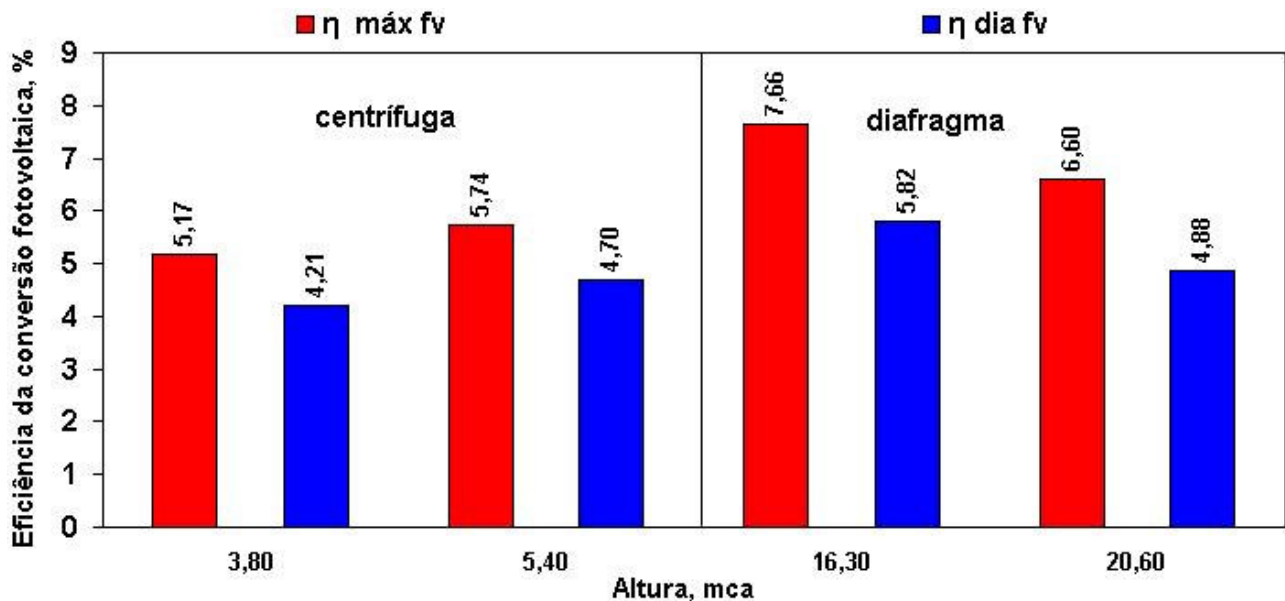


Figura 9 - Eficiências máximas e diárias da conversão fotovoltaica para duas diferentes alturas para cada bomba.

A eficiência diária do conjunto motor-bomba é definida como o quociente entre a energia hidráulica diária e a energia elétrica diária consumida. A energia hidráulica diária, E_{hd} , em J, é obtida por meio da integração do produto da vazão instantânea, Q , m^3/s , pela altura instantânea H , mca, ao longo do tempo t , s, conforme a Eq. 9:

$$E_{hd} = \rho . g . \int_{dia} (Q.H) . dt \quad (9)$$

Assim, o cálculo da eficiência diária do conjunto motor-bomba é obtido através da Eq. 10:

$$\eta_{ehd} = \frac{E_{hd}}{E_{ed}} \quad (10)$$

A Fig. 10 mostra as eficiências instantâneas, máximas e diárias dos conjuntos de motores e bombas, calculadas para duas alturas diferentes para cada bomba.

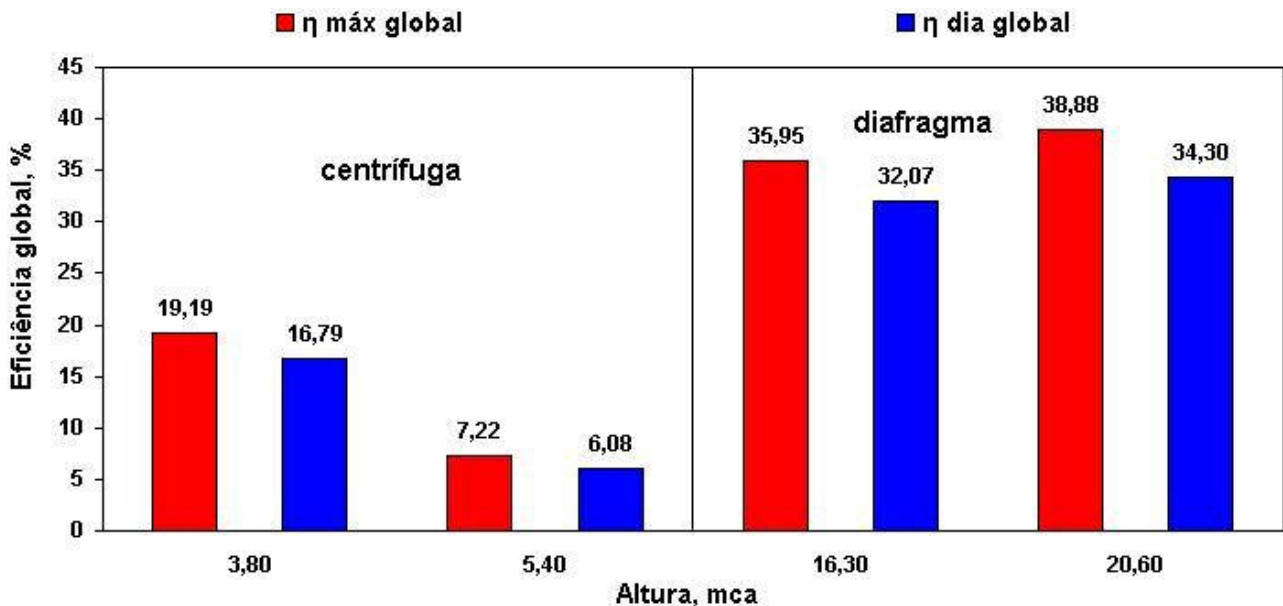


Figura 10 - Eficiências instantâneas máximas e diárias dos conjuntos motores e bombas verificadas em duas alturas diferentes para cada bomba.

Os valores encontrados nestes testes estão de acordo com dados de literatura. Segundo Alonso (1992), para bombas centrífugas de superfície, com motores de ímãs permanentes, com ou sem escovas, os valores para eficiências instantâneas estão na ordem de 30%, enquanto que os valores para eficiências diárias estão na ordem de 25%. Os valores encontrados para o caso da bomba centrífuga estão um pouco aquém destes resultados. A justificativa para tal fato deve-se à utilização de uma bomba centrífuga projetada para rotações nominais da ordem de 3500 rpm que operam em condições reais com velocidades bem menores que esta.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentadas análises experimentais sobre o desempenho de dois sistemas de bombeamento utilizando energia solar fotovoltaica. Um dos sistemas utilizou uma bomba centrífuga radial enquanto o outro uma bomba volumétrica do tipo diafragma. Os dois motores de acionamento operam com corrente contínua, tensão de 12 V, e foram diretamente acoplados ao gerador sem nenhum tipo de controlador de potência. Desta forma, o procedimento inicial foi caracterizar cada um destes sistemas e analisar a melhor configuração do gerador para fornecer a potência adequada para estes conjuntos. Para o sistema operando com bomba centrífuga a melhor configuração foi de três módulos enquanto que para a bomba de diafragma, a melhor configuração foi com apenas um módulo.

Quando operando em condições reais, com as configurações adotadas, a eficiência de conversão fotovoltaica para o conjunto motor-bomba centrífuga foi de 5,74% para a eficiência instantânea máxima e de 4,70% para a eficiência diária, ambas para a altura de 5,40 mca.

Para o conjunto motor-bomba volumétrica de diafragma, a eficiência instantânea máxima foi de 7,66 % e a eficiência diária foi de 5,82 %, ambas para a altura de 16,30 mca.

A eficiência do conjunto motor-bomba centrífuga apresentou valores de 19,2% para a eficiência instantânea máxima e a diária foi de 16,8 %, na altura de 3,80 mca. Para o conjunto motor-bomba de diafragma, a eficiência instantânea foi de 38,9 % e a eficiência diária foi de 34,3 %, ambas para a altura de 20,6 mca.

Também se conclui que para um mesmo conjunto de motor e bomba, o limiar de irradiância para início de vazão foi sempre maior do que o limiar de irradiância para o final de vazão; para o conjunto motor e bomba centrífuga os valores de limiares de irradiância para início de vazão, independentemente da altura, apresentaram valores muito próximos. Para o conjunto motor e bomba de diafragma, os limiares de irradiância para início de vazão se mostraram dependentes da altura, aumentando à medida que a altura também aumenta.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), FINEP e Fapergs pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1989, NBR 6400/MB-1032 Bombas Hidráulicas de Fluxo (Classe C) – Ensaio de Desempenho e Cavitação”, Rio de Janeiro – RJ, Brasil.
- Alonso, M., Chenlo, F., 1992. “Diseño y Dimensionado de Sistemas de Bombeo Fotovoltaico”, Laboratorio del Instituto de Energia Renovables, Editorial CIEMAT, Madrid, España.
- Appelbaum, J., 1979, Performance analysis of dc-motor-photovoltaic converter system – I. Solar Energy, vol. 22, pp.439-445.
- Appelbaum, J., 1981, Performance analysis of dc-motor-photovoltaic converter system – II. Solar Energy, vol. 27, pp.421-431.
- Appelbaum, J., 1986, Starting and steady-state characteristics of DC motors powered by solar cells generators. IEEE Transactions on Energy Conversion, EC-1, vol. 1, pp.17-25.
- Roger, J.A., 1979, Theory of the direct coupling between D.C. motor and photovoltaic solar arrays. Solar Energy, vol. 23, pp.193-198.

PERFORMANCE COMPARISON OF TWO PUMPS DIRECTLY COUPLED TO PHOTOVOLTAIC GENERATORS

Abstract. *A laboratory test facility destined to measure and compare the performance of two pumping systems directly coupled to photovoltaic generators was design and built. One of the systems used a centrifugal pump directly coupled to a set of three photovoltaic modules. The other system used a volumetric diaphragm pump directly coupled to only one photovoltaic module. The experiences were made in two stages. On the first stage the motors and pumps were coupled to a DC power source. In this stage all the experiments and data were used to determine the performance curves of the pumps, the curves of the systems, as well as the characteristic $I \times V$ curves of the motors. On the second stage the motors and pumps were directly coupled to the photovoltaic generators. The determination of the configuration of the generators to be used to drive the different sets of motors and pumps were made by superimposing the characteristic $I \times V$ curves of the motors to the characteristic $I \times V$ curves of the photovoltaic modules. The experimental part, being the systems coupled to the generators, consisted of measures accomplished in intervals of time of five seconds, for each pump and in several heights, of the following variables: weather temperature, solar radiation, module temperature, current and voltage of the motors, velocity of the motors in rpm, water temperature, differential pressure between entrance and exit of the pump and water flow. The several heights were simulated by means of the opening and/or closing of a flow control valve placed at the extremity of the discharge pipe. Using the measured data it was possible to calculate, for each pump, the system efficiencies.*

Key words: Photovoltaic systems, water pumping, pump and motor coupling, solar energy.