

ESTIMATIVA DA VARIABILIDADE DO BOMBEAMENTO D'ÁGUA EM SISTEMA ACIONADO POR ENERGIA FOTOVOLTAICA NA CIDADE DE BOTUCATU-SP, PARA O ANO DE 2014

Tiago Aparecido Vicentin – tvicentin08@gmail.com

Odivaldo José Seraphim – seraphim@fca.unesp.br

Arilson J. Oliveira Júnior – arilsonjr@outlook.com

Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP, Botucatu-SP.

Radames Juliano Halmeman – rjhalmeman@gmail.com

UFPR – Campo Mourão-PR.

Resumo. *Ensaio em campo de sistemas de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica se tornam necessários quando se tem como objetivo avaliar o desempenho de tais sistemas. Uma vez avaliados os sistemas a partir de trabalhos experimentais se obtêm as comumente chamadas curvas características de operação. Este trabalho apresenta o procedimento de obtenção das equações de regressão de curvas características de operação referentes à avaliação de dois sistemas de bombeamento de água submetidos a uma perda de carga de 13,5 mca – alimentados de forma direta por painéis fotovoltaicos. Os sistemas foram testados no Sítio Modelo na Faculdade de Ciências Agronômicas – FCA/UNESP de Botucatu-SP, no qual se obteve as equações de regressão por meio da análise das curvas de desempenho. Como resultado, foi obtida a estimativa da variabilidade do volume de bombeamento de água mensal, para os 12 meses do ano de 2014, aplicando as equações de regressão em função da irradiância ($W.m^{-2}$). A média diária do volume de água bombeado experimentalmente, comparado com os valores obtidos através das curvas de regressão de cada configuração, apresentou desvios relativos em torno de 1%.*

Palavras-chave: *sistemas de bombeamento d'água, sistemas fotovoltaicos, curvas características de operação.*

1. INTRODUÇÃO

O recurso hídrico é tido como um dos recursos de maior importância para a produção de alimentos, porém, de nada vale o recurso hídrico se não existir a possibilidade de trabalhar-lo com segurança e eficiência. Segundo Vicentin (2014), conectado à questão da água está à questão da disponibilidade de energia no meio, sua ausência torna o trabalho no campo desgastante e arriscado. Atualmente o aumento dos custos da energia e as longas estiagens estão entre os principais desafios enfrentados pelos produtores rurais do Sudeste e do Centro-Oeste. De acordo com Presenço (2007), uma quantidade de recursos financeiros pode ser poupada quando se bombeia água usando sistemas fotovoltaicos, visto que a mais de uma década o conceito de trabalhar o recurso hídrico com eficiência tem tendenciado à exploração de recursos energéticos renováveis. A tecnologia da conversão fotovoltaica da energia solar tem como principal aplicação no meio rural o bombeamento comunitário de água (FEDRIZZI, 2003). Sistemas de bombeamento de água com energia solar podem ser utilizados na pecuária, na irrigação de culturas, entre outras aplicações, pois, se tratam de sistemas duráveis e flexíveis que apresentam benefícios econômicos em longo prazo (VAN PELT et al., 2012). Produtores rurais que possuam um curso d'água, represa, açude, nascente ou cisterna dentro ou em condomínio de sua propriedade, poderá através de um sistema de bombeamento por energia solar trabalhar este recurso hídrico com eficiência. Esse sistema dispensa o uso de baterias, considerando que durante um período de radiação solar elevada a água pode ser armazenada em reservatórios e utilizada posteriormente em momentos que o sistema de bombeamento não esteja em operação.

Alinhado ao exposto, um experimento de campo montado nas dependências do Sítio Modelo na Faculdade de Ciências Agronômicas – FCA/UNESP de Botucatu-SP (-22,85°S -48,48°W, 777 m), teve como objetivo avaliar dois sistemas de bombeamento d'água acionados por energia solar fotovoltaica, traçando as curvas características de resposta (Irradiância x Vazão) para três cargas distintas de recalque (medidas em mca: metros de coluna d'água) quando submetidas à diferentes níveis de radiação solar. Apresenta-se neste trabalho, a obtenção das curvas características e regressões para a perda de carga de 13,5 mca aplicadas em cada sistema, tal como o gráfico do resultado da aplicação das equações para estimativa da variabilidade do volume de água mensal em função da irradiância $w.m^{-2}$ para os 12 meses do ano de 2014.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Cada sistema é composto de uma motobomba, o primeiro sistema denominado SBF1 (Sistema de Bombeamento Fotovoltaico 1) é composto de uma motobomba de diafragma tipo motorrotativa (Vazão de 396 l/h a 35 mca e 792 l/h a 0mca). O segundo sistema, denominado SBF2 (Sistema de Bombeamento Fotovoltaico 2), possui uma motobomba de

diafragma tipo motovibratória (Vazão de 150 l/h a 40 mca e 840 l/h a 0 mca) dotada de um conversor de potência (driver) específico para o sistema em questão sendo compatível apenas com o motor empregado. O fabricante não fornece maiores informações a respeito dos detalhes construtivos e funcionais do conjunto motoconversor.

O sistema de energia utilizou ao todo 4 módulos solares de Silício Policristalino 130 Wp. A partir dos módulos disponíveis, foram configurados dois painéis fotovoltaicos contendo dois módulos por painel, sendo que, dois módulos foram conectados em paralelo para compor o painel do sistema SBF1 (tensão em 12 V) e outros dois foram conectados em série para o painel do sistema SBF2 (tensão em 24 V) – os painéis foram utilizados para a alimentação direta de suas respectivas motobombas hidráulicas. O objetivo desses painéis foi fornecer energia para as motobombas de forma constante, fazendo-as realizar trabalho de bombeamento enquanto houvesse o mínimo necessário de energia solar incidente sobre os painéis. Uma chave boia foi instalada no circuito de comando de cada motobomba visando protegê-las caso o nível da água a ser bombeado ficasse abaixo do mínimo (o que não ocorreu durante esse experimento).

Para a leitura da vazão foram utilizados sensores de vazão tipo turbina efeito hall $\frac{1}{2}$ '' com capacidade máxima de 30 l/min, a leitura da pressão de coluna foi feita por manômetros devidamente calibrados em mca. Para a coleta e gravação dos dados lidos pelos sensores de vazão, utilizou-se um equipamento baseado no trabalho de Helmeman (2014), desenvolvido exclusivamente para processar os dados dos sensores de vazão e enviá-los para um microcomputador utilizando uma plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre de placa única, projetada com um microcontrolador ATmega 328, 14 pinos de entrada/saída digital, 6 entradas analógicas, um cristal oscilador de 16 MHz e uma conexão USB. O microcontrolador ATmega 328 utiliza uma linguagem de programação padrão, baseado em Wiring e C/C++ (ARDUINO, 2015).

Para a leitura da radiação solar incidente no plano dos painéis, foi utilizado um sensor de irradiação modelo PVS1-Carlo Gavazzi, $65 \text{ mV}/1000\text{W.m}^{-2}$, em conjunto com o módulo de leitura de variáveis ambientais VMU-P que teve a função de conectar o módulo de leitura PVS1 ao módulo de dados Carlo Gavazzi VMU-C. Para ler os dados de corrente e tensão consumidos pelas motobombas, ou seja, medição das variáveis instantâneas: Volts (V), Ampère (A) e Watts (W), foi utilizado o módulo de leitura de variáveis elétricas VMU-S- Carlo Gavazzi, com limites de medição de tensão de até 1000 Vcc e corrente contínua direta até 16 A. O módulo de dados Carlo Gavazzi VMU-C é a CPU do sistema e teve como função principal gerenciar e armazenar a leitura das variáveis dos módulos VMU-S e VMU-P.

2.2 Métodos

O procedimento para obtenção das curvas características baseou-se em dois conjuntos distintos de medidas instantâneas, envolvendo parâmetros de referência, como volume diário de água bombeada, ($\text{m}^3.\text{dia}^{-1}$) vazão ($\text{l}.\text{min}^{-1}$); a disponibilidade diária do recurso solar local (irradiância plano horizontal em $\text{W}.\text{m}^{-2}$), altura manométrica total (mca); e potência das motobombas consumida diariamente dada em Watts (W).

Os valores de irradiância plano horizontal foram coletados pela estação meteorológica da Fazenda Lageado UNESP.

Segundo Vilela (2010), para a obtenção das curvas características (Vazão x Irradiância) que permitam boa representação, são necessários no mínimo 3 dias de ensaio com o sistema operando em condições reais. A Fig. 1 apresenta o diagrama geral dos sistemas que foram ensaiados.

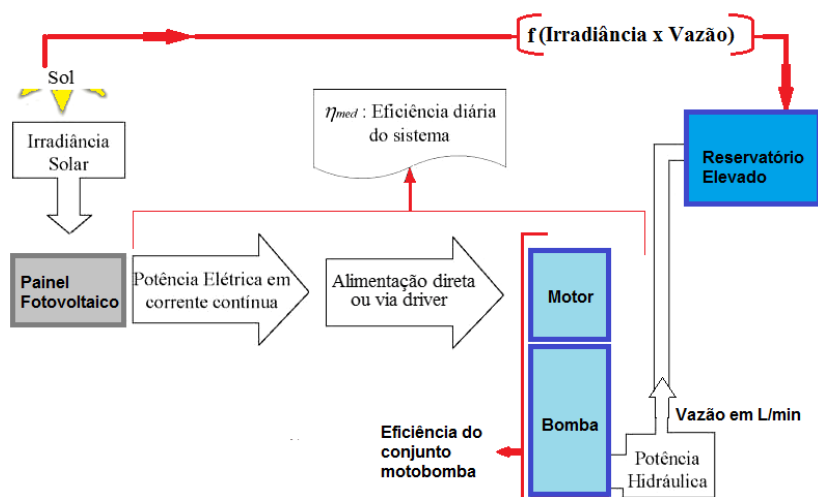


Figura 1 - Diagrama geral dos sistemas ensaiados.

As motobombas foram instaladas e conectadas a um circuito hidráulico de recalque que permitia ensaiá-las em diferentes alturas manométricas de trabalho. Deste modo, as motobombas foram submetidas aos seguintes valores de perda de carga: 2,5 mca, 7,5 mca e 13,5 mca. Assim, o experimento foi executado no mês de junho de 2014 sendo do dia 08 ao dia 12 de junho com os sistemas trabalhando na pressão de 2,5 mca; de 19 a 23 com os sistemas trabalhando na pressão de 7,5 mca; de 13 a 17 com os sistemas trabalhando na pressão de 13,5 mca. Os dois sistemas SBF1 e SBF2 executaram a mesma função, ou seja, bombear água de forma contínua e simultânea enquanto houvesse o mínimo de

radiação solar incidente no plano de seus respectivos painéis, sendo esta suficiente para efetuar o acionamento das bombas d'água.

Cada valor medido de Potência consumida (P_c) corresponde a um valor de Irradiância (R_s) e um valor de Vazão (Q). Para Vilela (2001), valores de vazão correspondentes podem ser determinados usando do valor de irradiância de um conjunto de dados medidos.

Os sistemas ensaiados receberam a mesma quantidade de energia solar em seus painéis e efetuaram trabalho submetido à mesma perda de carga. Os valores medidos de irradiância (R_s), energia consumida (E_c), energia disponível (E_d) e vazão (Q), foram utilizados para gerar dois gráficos com três curvas: 1. Energia disponível X Energia consumida; 2. Energia consumida X Vazão, sendo, uma curva para cada perda de carga conforme ilustrado na Fig. 2.

Para cada uma das curvas obteve-se uma equação de regressão que correspondem aos valores de vazão em função da Irradiância, o que permitiu a construção de um terceiro gráfico que denominamos como gráfico das curvas de regressão para estimativa da vazão dia a dia, conforme apresentado na Fig. 2.

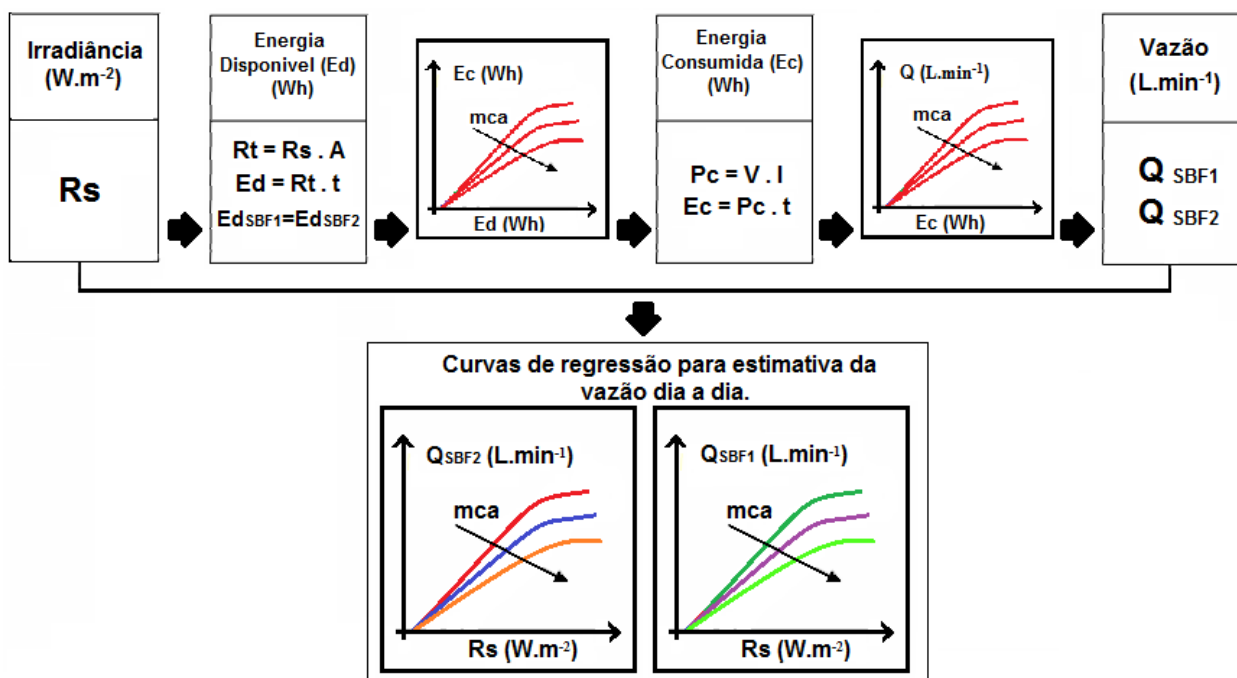


Figura 2 - diagrama do procedimento de obtenção das curvas características.

Para a estimativa dos valores de volume bombeado em todo o ano de 2014, os dados diários de Irradiância ($W.m^{-2}$) foram inseridos nas equações das curvas de regressão conforme proposto no método, porém, apenas os dados para a perda de carga de 13,5 mca foram apresentados e discutidos nesse trabalho.

O cálculo da estimativa da vazão de água bombeada foi realizado por meio da aplicação dos valores de medições de Irradiância local nas equações obtidas a partir das curvas. Essas vazões foram somadas ao longo do dia obtendo assim o volume diário de água bombeada. A estimativa mensal do volume de água bombeada foi calculada pela somatória dos valores de volume obtidos diariamente ao longo do mês de referencia.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os gráficos das Fig. 3 e 4, apresentam as curvas “Irradiância (R_s) X Vazão (Q)” no período de ensaio dos sistemas submetidos a perda de carga de 13,5 mca. As vazões instantâneas medidas para os conjuntos denominados SBF1 e SBF2 correspondem, respectivamente, às legendas “ Q_{SBF1} ” e “ Q_{SBF2} ”, e são pontualmente apresentadas em cada gráfico.

As legendas “ Q Sistema1 Estimado” e “ Q Sistema2 Estimado”, correspondem aos valores que foram calculados pelas equações de estimativa obtidas pela aplicação do método. Ou seja, valores de vazão correspondentes que foram determinados utilizando dos valores de Irradiância ($W.m^{-2}$) de um conjunto de dados medidos.

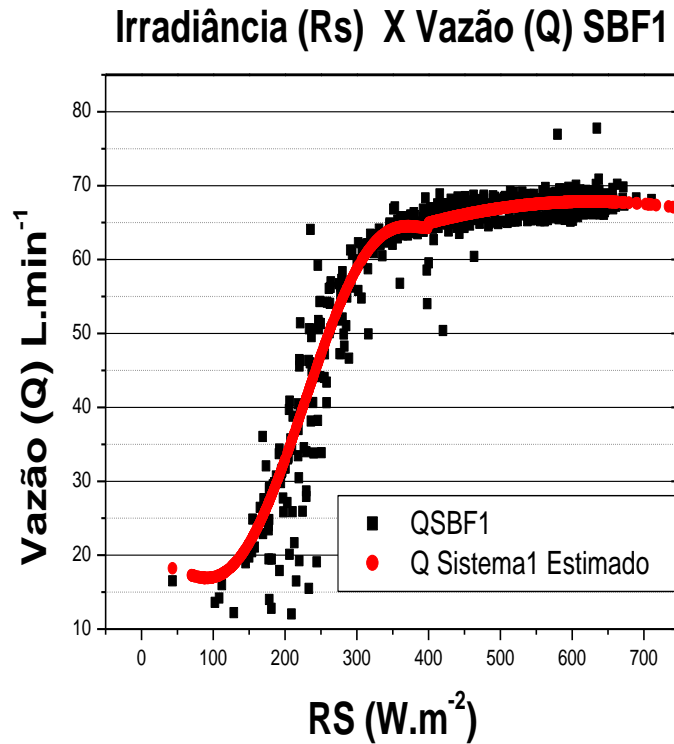


Figura 3 - Curva (Irradiância Rs X Vazão Q) para o sistema SBF1.

Os gráficos das Fig. 3 e Fig. 4 apresentam as curvas (Irradiância Rs X Vazão Q), no qual pode ser observado uma superposição das curvas estimadas por equações em relação à curva dos valores medidos. A apresentação dos gráficos permitiu visualizar o comportamento da curva dos valores estimados em relação aos valores reais medidos em campo.

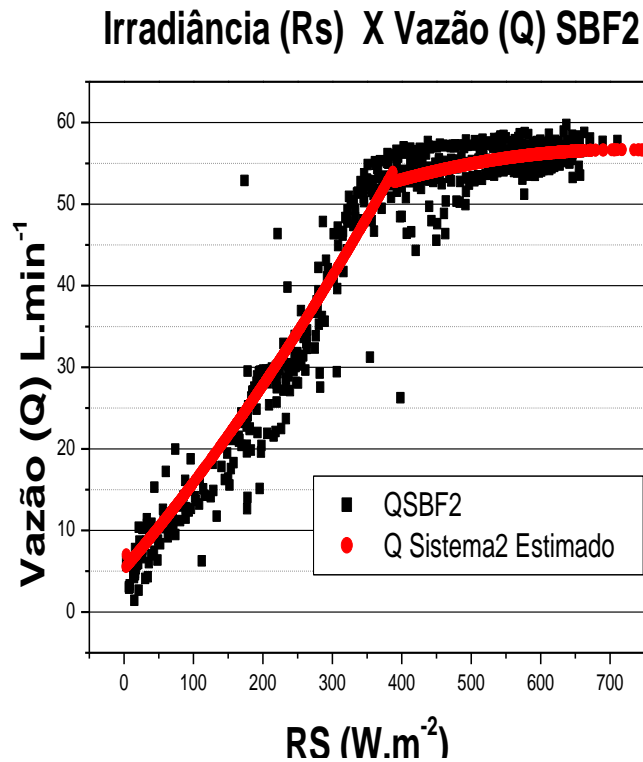


Figura 4 - Curva (Irradiância Rs X Vazão Q) para o sistema SBF2.

As equações de regressão Eq. (1), Eq. (2), Eq. (3) e Eq. (4), tiveram origem nas curvas de regressão de cada gráfico, e foram utilizadas para calcular a estimativa dos valores instantâneos de vazão a partir dos dados de irradiância local incidente no plano horizontal obtido pela estação meteorológica.

As curvas de regressão obtidas pelas interações das grandezas apresentaram coeficiente r^2 próximos de 1 (grau de fidelidade).

É importante ressaltar que a tendência polinomial, observada para os dois casos, é válida para valores de irradiância solar entre 0 e 400 $W.m^{-2}$. A partir desses valores de irradiância, a tendência da curva é manter-se horizontal e constante, sendo necessária a aplicação de outra equação para estimativa. Esse fato levou à adoção dos seguintes critérios na hora de aplicar as equações:

1. Na estimativa dos valores de vazão dos conjuntos de bombeamento denominados SBF1 (Q1) e SBF2 (Q2), sendo os valores de irradiância abaixo ou iguais a 400 $W.m^{-2}$, ou seja, ($x \leq 400 W.m^{-2}$), utiliza se, respectivamente, das Eq. (1) e Eq. (2).

$$Q1 = [15,23174+(0,20713. x)+(-0,00463. x^2)+(3,62817e-5. x^3)+(-9,79042e-8. x^4)+(8,70421e-11. x^5)] \quad (1)$$

$$r^2=0,99838$$

$$Q2 = [5,26372503+ (0,09879. x) + (6,94401e-5. x^2)] \quad (2)$$

$$r^2=0,99999$$

2. Na estimativa dos valores de vazão dos conjuntos de bombeamento denominados SBF1 (Q1) e SBF2 (Q2), sendo os valores de irradiância maiores que 400 $W.m^{-2}$, ou seja, ($x > 400 W.m^{-2}$), utiliza se respectivamente das Eq. (3) e Eq. (4).

$$Q1 = [45,59289+ (0,07107. x)+(-5,67555e-5. x^2)] \quad (3)$$

$$Q2 = [38,04272 +(0,05184. x)+(-3,6069e-5. x^2)] \quad (4)$$

A Tab. 1 apresenta as interações estatísticas entre os valores reais de volume e os valores de volumes estimados pelas equações para o mesmo período. Calculando-se a média diária do volume de água bombeada experimentalmente e comparando-se com os valores obtidos por meio das curvas de regressão de cada configuração, verificou-se que os desvios relativos ficaram em torno de 1%, sendo: 1,02% (SBF1) e 0,99% (SBF2).

Tabela 1- Interações estatísticas entre os valores reais de volume e os valores estimados.

Sistema	Média	Sd (yEr+-)	Se (yEr+-)	Min.	Max.	Soma
QSBF1 Medido	59,36	14,48	0,632	12,05	77,79	31164,27
QSBS1 Calculado	58,11	15,16	0,647	16,91	67,84	31902,05
QSBF2 Medido	43,23	17,25	0,701	1,43	66,35	26157,09
QSBS2 Calculado	43,49	16,34	0,663	5,56	56,67	26440,39

A Fig. 5 apresenta o gráfico de estimativa mensal do volume bombeado para o ano de 2014 na região de Botucatu-SP, em função das medidas locais de Irradiância ($W.m^{-2}$) para uma altura manométrica de 13,5 mca.

Os dados dos valores de irradiância utilizados na estimativa da vazão e do volume d'água bombeados não consideram média histórica, apenas valores de irradiância registradas no período de 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2014. Esse procedimento permitiria pressupor os valores de volume d'água bombeados nos 12 meses do ano de 2014, caso os sistemas estivessem em operação no mesmo período.

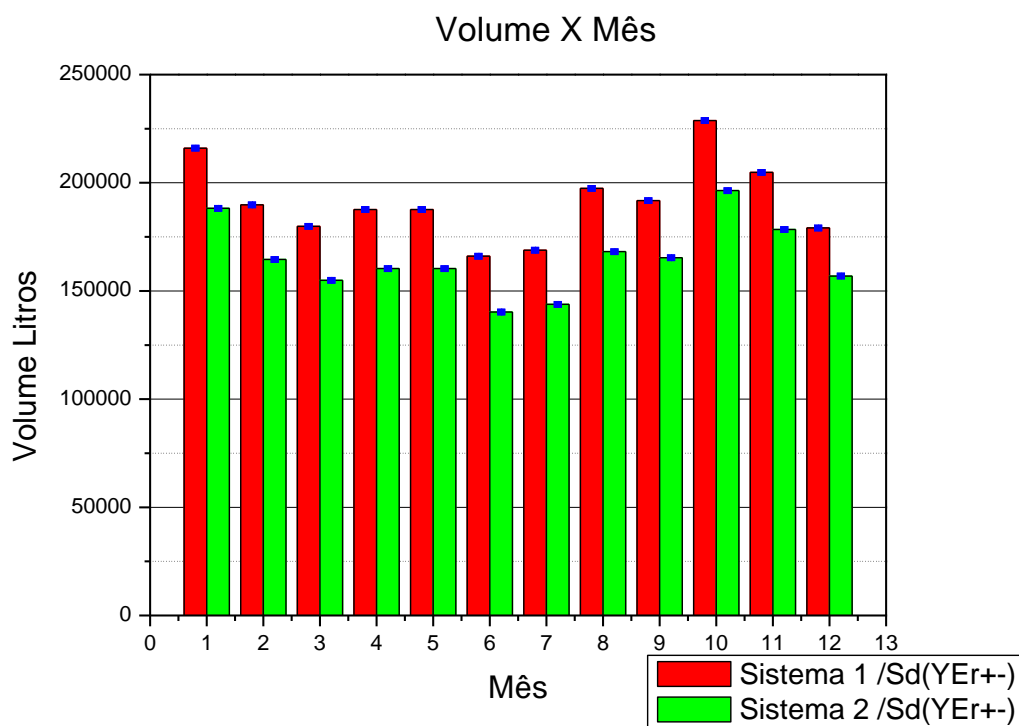


Figura 5 - Estimativa mensal do volume bombeado para o ano de 2014 na região de Botucatu-SP

4. CONCLUSÃO

Considerando as características da radiação solar local e os valores de vazão medidos em campo, tal procedimento descrito nesse trabalho permitiu obter as curvas características de trabalho dos dois sistemas de bombeamento fotovoltaico que foram ensaiados.

A perda de carga testada permite que esse volume d'água bombeado seja armazenado em reservatórios elevados, e posteriormente possa ser utilizado em momentos que o sistema de bombeamento não esteja em operação.

A média diária do volume d'água bombeado experimentalmente, comparado com os valores obtidos através das curvas de regressão de cada configuração, apresentou desvios em torno de 1%. Isso valida o procedimento adotado no método.

As vazões, e conseqüentemente os valores diários dos volumes d'água calculados com base nas equações obtidas, consideram limites reais de desempenho dos sistemas ensaiados. Nessas condições, bombear menor ou maior volume d'água no período submetido à mesma perda de carga depende única e exclusivamente de suas características construtivas.

Em regiões onde estatisticamente a disponibilidade de energia solar se equipara aos valores da região onde o sistema foi ensaiado, as equações de regressão propostas poderão ser utilizadas para prever, com grau de precisão aceitável, o volume teórico de água bombeado que poderá ser disponibilizado naquela região, desde que se utilize os mesmos equipamentos nas mesmas configurações.

Existe uma notável diferença entre os valores de volume entregues por cada sistema mês a mês, porém, segundo Tiago Filho (2002), considerando uma pequena propriedade rural típica onde residem 6 pessoas que cuidam de 30 aves, 5 bovinos, 10 suínos e ainda tem uma área cultivada de 200 m², é estimado um consumo médio diário aproximado de 2000 litros de água.

Os valores médios de volume estimados ao longo dos dias no ano de 2014 utilizando a metodologia proposta apresentaram um volume médio de 6295 litros de água para SBF1 e 5417 litros para SBF2. Isso indica que os dois sistemas testados apresentam potencial para atender as necessidades hídricas de uma pequena propriedade rural.

Este trabalho não tem como objetivo indicar um ou outro equipamento para aplicações em campo. Cabe a cada projetista avaliar as características intrínsecas de cada equipamento e decidir qual equipamento melhor atende suas necessidades dentro de seus limites de operação.

Como trabalhos futuros pode se executar a aplicação de procedimentos matemáticos específicos para caracterizar o modelo proposto.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a agencia CAPES pelo apoio financeiro a esta pesquisa e ao Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP, Botucatu-SP, pela área de pesquisa disponibilizada.

REFERÊNCIAS

- Arduino, What is Arduino. Disponível em: <<http://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 27 mar. 2015.
- Fedrizzi, M. C., 2003. Sistemas fotovoltaicos de abastecimento de água para uso comunitário: lições apreendidas e procedimentos para potencializar sua difusão. Tese de Doutorado, Programa Interunidades de Pós-graduação da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Helmeman, Radames J., 2014. Desenvolvimento de um sistema para monitoramento remoto em centrais de microgeração fotovoltaica. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista UNESP, Botucatu.
- Presenço, J. F., 2007. Desenvolvimento de um sistema de controle para avaliação de fontes de energias renováveis no bombeamento de água, Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista UNESP, Botucatu.
- R. Van Pelt, C. Weiner e R. Waskom, 2012. Solar-powered Groundwater Pumping Systems, USA Colorado. _Disponivel_em:<<http://www.ext.colostate.edu/pubs/natres/06705.html>>. Acesso em: 01 mar. 2014.
- Tiago Filho, G. L., 2002. Carneiro hidráulico: o que é e como construí-lo. CERPCH - Centro Nacional de Referência em Pequenos Aproveitamentos Hidroenergéticos. Disponível em: <<http://tecnociencia.inf.br/comunidade/arqautor/diversos/bombacarneiro.swf>> Acesso em: 20 dez. 2012.
- Vicentin, Tiago A., 2014. Acionamento de dois sistemas de bombeamento alimentados por uma central de microgeração fotovoltaica, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista UNESP, Botucatu.
- Vilela O. C.; Fraindenraich N., 2001. A methodology for the design of photovoltaic water supply systems. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 9, PP 349-361.
- Vilela O. C.; Fraindenraich N.; Galdino M. A., 2010. Metodologia de levantamento de características de sistemas fotovoltaicos d'água utilizando fontes de alimentação cc, Pernambuco, III CEBENS – III Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belén.

ANNUAL VARIABILITY ESTIMATION OF THE WATER PUMPING IN A SYSTEM MOVED BY PHOTOVOLTAIC AT BOTUCATU-SP CITY IN 2014.

Abstract. *Evaluations in environments of water pumping systems moved by solar photovoltaics are necessary when the aim is to test the performance of this systems. When the system evaluations are performed from experimental works it is possible to have the called characteristic bends of operation. This work reports the procedure of obtaining of the regression equations of characteristic bends of operation referred to evaluations of two water pumping systems with a charge subtraction of 13,5mca - charged directly by photovoltaic panels. The systems were evaluated at farm-model of the College of Agronomic Science, UNESP/Botucatu-SP in which was obtained the regression equations through the analysis of the performance bends. As part of results were performed variability estimates of volume of the water pumping monthly employing the regression equations in function to the daily irradiance for 12 months of 2014. The daily average of the water pumping experimental if compared to values obtained with the regression bends of each setup showed relative deviations near to 1 percent.*

Key words: *water pumping systems, photovoltaics systems, characteristic bends of operation.*