

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA FOTOVOLTAICO

Fábio Alves de Braz Coutinho¹, Chigueru Tiba² e Rinaldo de Oliveira Melo³
Universidade Federal de Pernambuco-Centro de Ciência e Tecnologia-Departamento de Energia Nuclear- Grupo Fontes Alternativas de Energia
Tel. 81 2126 7976 e-mail: fabiocoutinho07@hotmail.com

Recibido 10/08/16, aceptado 07/10/16

RESUMO: Este trabalho mostra a caracterização de sistema bombeamento de água fotovoltaico, realizada a partir de uma bancada de teste devidamente calibrada, e que permite simulações de diversas altura de recalque. Os dados experimentais foram modelados para permitir a estimativa da vazão do SBFV instalados em outros locais quaisquer. Foram calculados as eficiências dos subsistemas e do sistema como todo e avaliado também o efeito de liga/desliga do motor causado pela intermitência solar e temperatura. As modelagens foram feitas em escala de minuto e também horária. As eficiências globais obtidas estão consistentes com as características do equipamento utilizados.

Palavras chaves: Energia solar, bombeamento fotovoltaico, irrigação, curva característica, dimensionamento

1-INTRODUÇÃO

1.1 Caracterização do Problema

Sistema de bombeamento fotovoltaico (SBFV) é uma importante aplicação de energia fotovoltaica e há muito interesse em modelar e controlar esse tipo de sistema [1,2,3]. Esse tipo de bombeamento é particularmente interessante para lugares remotos, distantes da rede elétrica onde o volume de água requerido seja relativamente elevado, seja para consumo humano, agricultura ou pecuária[4]. Avanços importantes têm sido experimentados pelos sistemas de bombeamento fotovoltaico nas últimas décadas, tanto no que diz respeito às potências e rendimento dos motores e bombas quanto aos dispositivos eletrônicos de controle [5]. Diversas pesquisas têm sido feitas focadas no SBFV e conectando a irradiação solar disponível com a demanda de água, além de estratégias para se aumentar a sua eficiência[6]. A curva característica de um SBFV resume o volume bombeado em função das condições meteorológicas locais (Irradiação solar, temperatura e velocidade do vento) e da altura manométrica a ser vencida pelo sistema. Esse último aspecto refere-se às condições gerais de fonte de água e da altura a ser recalçada.

A obtenção de uma curva característica para diversas alturas é um processo demorado e requer uma bancada de testes para a aquisição da curva característica para alturas contínuas, que normalmente não é feita, seja pelo trabalho demorado como também pelos custos envolvidos. Dessa maneira, o dimensionamento e as especificações de um SBFV para um local qualquer em que a altura manométrica total (profundidade do poço e altura de recalque) e condições meteorológicas locais são diferentes, normalmente é feita, utilizando-se a interpolação das curvas características obtidas em bancadas de testes o que ocasiona perdas de precisão no projeto. Para evitar essa situação então seria interessante a obtenção dela de forma aproximadamente contínua em relação à altura de recalque.

1.2 Sistema de Bombeamento de água fotovoltaico

Os sistemas de abastecimento de água são constituídos por uma fonte da mesma, por conjunto de bombeamento fotovoltaico, por sistema energético, por tanque de armazenamento e sistema de atendimento à demanda. Esses sistemas de abastecimento de água rural pode ser para uso doméstico ou para fins de irrigação, conforme podem ser vistos nas Figuras 1a e b.

A fonte de água pode ser superficial ou subterrânea porém, a sua disponibilização ao consumo vai requerer sempre gastos de energia, seja para a sua elevação e/ou para compensar as perdas por fricção nas tubulações de transporte. Com a escassez e custo crescente da água muitas aplicações domésticas ou industriais em regiões urbanas ou próximas estão sendo supridas por águas subterrâneas ou pela reutilização da água servida.

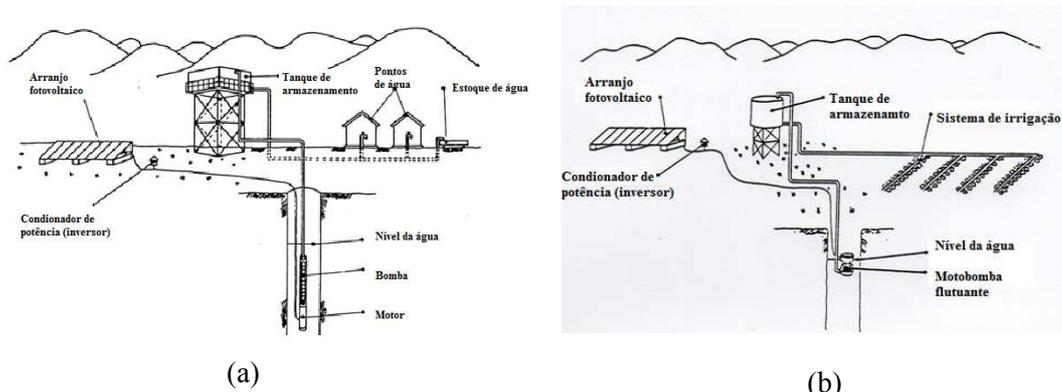


Figura 1 – Sistema de abastecimento de água para fins de: a) consumo domestico e b) irrigação

a) Fonte: Barlow, R. (1993), World Bank e b) Fonte: Markvart, T., (1194)

Ao longo do tempo, diferentes configurações de sistemas de bombeamento fotovoltaico foram estudadas e avaliadas. Assim por exemplo, algumas incluíam um sistema de armazenamento da eletricidade fotogerada em baterias, outras, cuja instalação do motor era na superfície fazia-se uso de uma transmissão mecânica para a bomba submersa. Porém, a configuração predominante hoje em dia tende a sistemas mais simples, que consistem basicamente do arranjo fotovoltaico, inversor, motor e bomba, conforme pode ser visto na Figura 2. Existem ainda sistemas mais simples que prescindem do uso do inversor e fazem uso do motor de corrente contínua. Em ambos os casos, entre o arranjo e o inversor ou motor DC pode existir um sistema conhecido como seguidor doponto de máxima potência (PMP), que permite uma operação mais eficiente nas situações em que a radiação solar tenha um nível relativamente baixo. É imprescindível relatar que, de maneira geral, os sistemas de bombeamento com inversor (AC) são para potências maiores que $1500 W_p$ e os de corrente contínua para potências até $1000 W_p$.

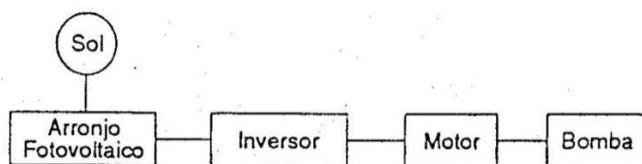


Figura 2- Configuração predominante do Bombeamento de água FV

Arranjo fotovoltaico

O atendimento das necessidades de potência elétrica de um sistema de bombeamento de água é feito pelo arranjo fotovoltaico. Os módulos do mesmo são dispostos em painéis com uma determinada configuração de ligações em série e em paralelo que por sua vez os painéis são conectados em série e paralelo, resultando no arranjo. As conexões em série aumentam a corrente e as conexões em paralelo aumentam a tensão.

Inversor

Os inversores são equipamentos capazes de converter corrente contínua em alternada e são chamados de conversores CC/AC. Os inversores isolados (não acoplados à rede elétrica) como é no caso de sistemas de bombeamento operam com tensões de entrada de 12, 24, 48, 120 volts (CC) que são

convertidos de forma geral em 120 ou 240 volts(AC), na frequência de 50 a 60 Hertz. Os inversores atuais têm uma eficiência de 95% na potência nominal de saída e 75-80% isso acontece se o inversor funcionar a 50% da potência nominal de saída.

Conjunto moto-bomba

Atualmente os equipamentos predominantes para poços de profundidades e para vazões médias e alta são bombas centrífugas de múltiplos estágios e submersas enquanto que, para fontes superficiais, poços poucos profundos (menores que 6 m) as soluções no que se refere a moto-bombas são múltiplas. A Figura 3 mostra os diversos tipos de bomba em função da vazão e profundidade de bombeamento.

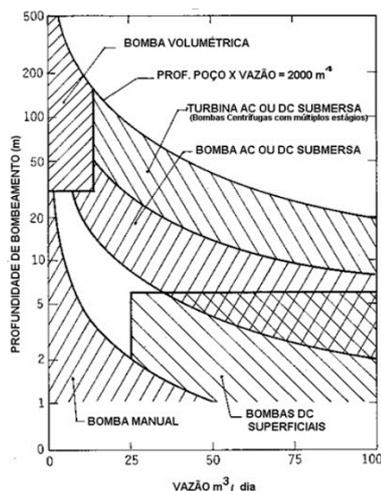


Figura 3 – Tipos de bombas recomendados para diferentes alturas e vazões

2-MATERIAIS MÉTODOS

2.1 Descrição da Bancada de testes

A Bancada de Testes para sistema de bombeamento de água fotovoltaico está situado em Recife-PE (latitude: 08° 03' 14" S, longitude 34° 52' 52" W) tem a possibilidade de teste em 04 níveis de altura (16, 24, 32 e 40 metros). Na bancada podem ser configurados arranjos fotovoltaicos de diversas potências e diversos tipos de bombas. Assim, as figura 4 e 5, mostram respectivamente o diagrama esquemático da Bancada de testes e uma fotografia geral da mesma

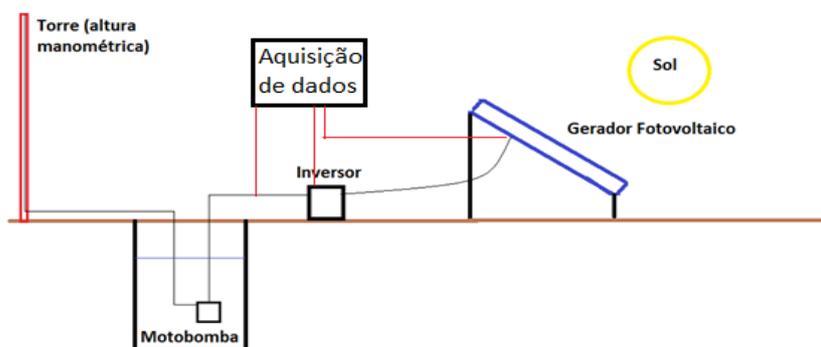


Figura 4: Diagrama esquemático da Bancada de Teste para



a



b

Figura 5 – Imagens fotográficas da Bancada de Testes: a) torre para simulação da altura de recalque e b) Instrumentos de monitoração da vazão e controle

2.2 – Descrição do SBFV testado

Caraterização dos painéis FV

O arranjo dos painéis foi com todos os módulos em série, as características dos mesmos foram obtidas de catálogos e estão reproduzidas na tabela abaixo. A potência máxima do arranjo é, sob condições ideais, 1320 Wp.

Potência máxima	75 ± 10% Wp
Corrente de Curto circuito	4,45 A
Tensão de Circuito aberto	21,6 V
Corrente de máxima potência	4,05 A
Tensão de máxima potência	17,3 V
Dimensões do módulo	0,52m x 1,2 m

Tabela 1:
Características nominais

do módulo FV

Inversor de frequência

O inversor de frequência utilizado não conta com RPMP (rastreamento de ponto de máxima potência), sendo assim, foi programada para trabalhar no ponto de máxima potência nominal dos módulos com uma voltagem de $16 \times 17,3$ V, ou 276,8 V. Nesse caso as características impressas no catálogo do inversor estão na tabela 2.

Entrada: 200-240 V ± 10 %; 14,4 A; 47 a 63 Hz
Saída: 0-entrada V; 7,4 A 0-650 Hz
Motor: 1,5 kW

Tabela 2: Características do Inversor de frequência

Conjunto motor e bomba

O conjunto motor bomba é do tipo submerso, de 0,75 CV de potência e trifásico. A bomba é de múltiplos estágios, e tem 11 estágios. A tabela 3 contém as informações do fabricantes.

Motor	380 V Trifásico, 60 Hz, corrente: 1,9 à 2,5 A
Tipo	Múltiplo estágios: 11
Conjunto motor bomba	Eficiência na faixa de vazão do sistema: 20 a 30 %

Tabela 3: Características do conjunto motor bomba

2.3 - Parâmetros monitorados

Elétricos

As variáveis elétricas mediadas foram: Voltagem na saída do arranjo PV. Com isso é possível o cálculo da potência elétrica total entregue ao sistema (inversor + bomba) mediante:

$$P_g = UI; \quad (1)$$

onde: P_g (Watts), potência gerado no arranjo FV, U(volts), tensão elétrica medida nos terminais do arranjo FV; I(Ampere), corrente elétrica medida nos terminais do arranjo FV.

$$\eta_{sist} = \frac{\int P_g dt}{A \int I_{col} dt} \quad (2)$$

Solarimétricos

A variável solarimétrica medida foi a irradiância coletada (I_{col}) em watts por metro quadrado, no plano do arranjo FV.

Meteorológicas

As variáveis meteorológicas medidas foram: Umidade relativa (porcentagem); Temperatura do ar (graus célsius); Velocidade do vento (metro por segundo); Direção do vento (ângulo em relação a uma direção escolhida).

Térmicas do Arranjo PV

As variáveis medidas térmicas no arranjo foram as temperaturas (graus célsius) em 5 pontos do arranjo FV conforme mostrado na figura 6.

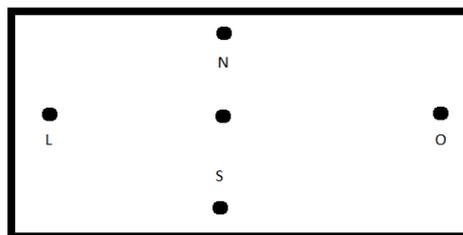


Figura 6 – Disposição dos sensores de temperaturas no arranjo PV

Hidráulicos

As variáveis hidráulicas medias foram: Altura manométrica (em metros); Vazão da bomba (metro cúbicos por segundo) e, com isso pode-se calcular a potência entregue ao fluido pelo sistema. A potência hidráulica é dada pela expressão:

$$P_h = \frac{\rho * g * h * Q}{3600} \quad (3)$$

onde: P_h = Potência hidráulica entregue ao fluido (Watts); ρ = massa específica da água (1000 quilograma por metro cúbico); g = aceleração da gravidade (metros por segundo ao quadrado); h= altura manométrica (metros), Q= Vazão de água (metro cúbicos por segundo); 3600 = fator de conversão de unidades (hora para segundo).

A eficiência do sistema é dada pela expressão:

$$\eta_{Sis} = \frac{\int P_h dt}{A \int I_{cp1} dt} \quad (4)$$

onde: η_{Sis} = eficiência do sistema;

Da mesma forma, a eficiência do conjunto bomba+ inversor pode ser expressa por:

$$\eta_{conj} = \frac{\int P_h dt}{\int P_g dt} \quad (5)$$

2.4 –Metodologia Experimental

Os ensaios foram realizados nos meses de janeiro a abril de 2016, para alturas de 24 e 32 metros porque as outras alturas estavam com problemas operacionais. Os dados obtidos no conjunto dos ensaios em uma dada altura foram separados em dois subconjuntos: um grupo de modelagem e outro de verificação.

A vazão de água bombeada foi modelada mediante uma regressão polinomial de segundo grau utilizando o subconjunto de modelagem. Obtido o modelo das previsões das vazões para o subconjunto de verificação foram feitas utilizando a irradiação do conjunto de verificação como dado de entrada. Os resultados estimados foram comparados com os dados experimentais mediante testes os indicadores estatísticos nas eq. 6 e 7.

$$MBE = 100 \frac{\sum_n (V_{calculado} - V_{medido})}{\sum_n V_{medido}} \quad (6)$$

$$RMSE = 100 \sqrt{\frac{\sum_n (V_{calculado} - V_{medido})^2}{n}} \frac{1}{\sum_n \frac{V_{medida}}{n}} \quad (7)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Volume bombeado em escala de minuto A análise por minuto é importante porque esta análise permite observar o efeito de liga/desliga que é efeito das quedas na incidência solar abaixo da incidência crítica, causada pela passagem de nuvens. A figura 7 ilustra um dia de poucas nuvens em laranja e um dia nublado e azul, cada ponto abaixo de 300 W/m², que como veremos adiante é a irradiação crítica para a altura de 32 m, equivale a um desligamento do sistema e após cada desligamento o sistema parte novamente gastando bastante energia para vencer a inércia.

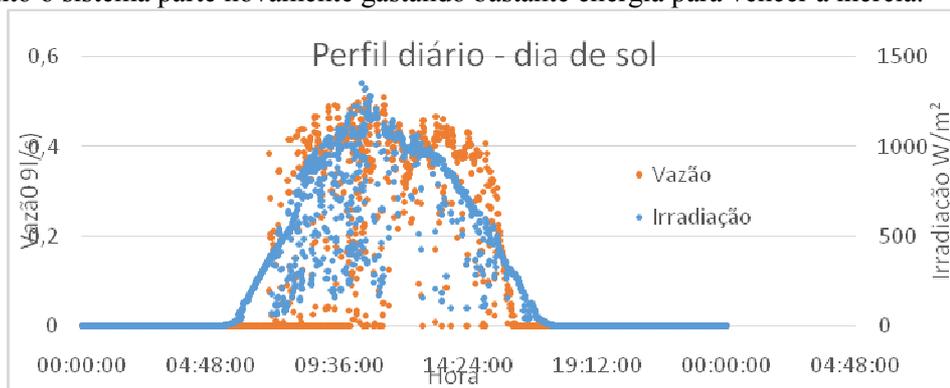


Figura 7: Perfis diários da irradiação solar para um dia de céu claro

As Figuras 8 e 9 mostram respectivamente a vazão em função da irradiação solar média, incidente no plano do arranjo FV, para altura manométrica total de 32 e 24 m. Os pontos são medidas experimentais e a curva tracejada o modelo polinomial. As dispersões para uma dada irradiância são

explicadas pelo efeito da temperatura nos módulos FV, pela intermitência do recurso solar e o efeito aleatório dele e não pela linear introduzida pelo processo de liga-desliga do motor da bomba e finalmente devido aos erros de medição.

Nas duas alturas manométricas, observa-se para esse SBFV a existência de um intensidade de irradiação crítica de 300 W/m² para 32 m e 200 para W/m² para 24 m. Ela é uma irradiação limiar para o SBFV particular, onde abaixo da qual não há bombeamento.

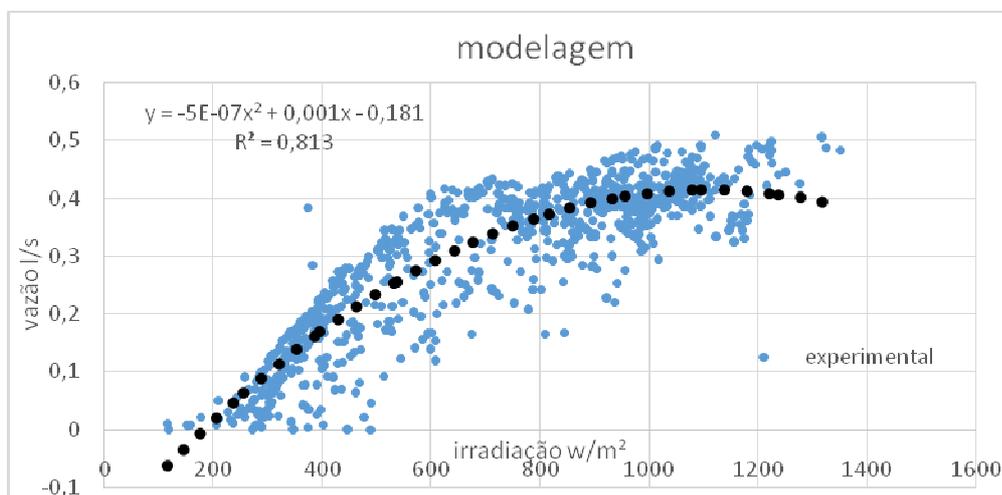


Figura 8- Medidas experimentais e curva modelada para SBFV com 32 m de altura manométrica total

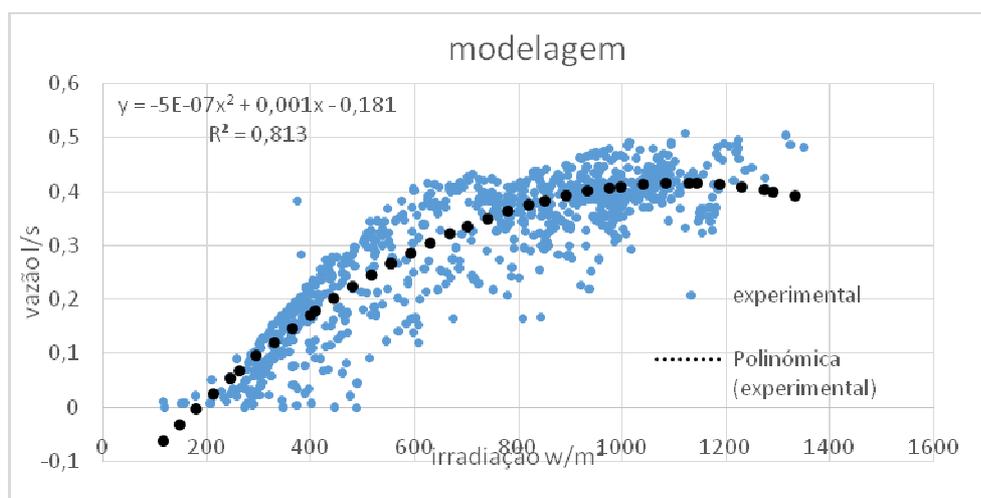


Figura 9 – Medidas experimentais e curvas modelada para SBFV com 24 m de altura manométrica total

Os modelos obtidos foram verificados inserindo a irradiação solar do subconjunto de dados de verificação e os resultados das vazões previstas comparadas com os valores experimentais das vazões do subconjunto de verificação. Os valores das vazões, modelado e experimental foram testados estatisticamente utilizando os indicadores desvio médio e desvio médio quadráticos, respectivamente dados na eq. 6 e 7. Os resultados estão resumidos na tabela 4.

Altura	Desvio médio %	Desvio médio quadrático
24	1,69	18,9
32	1,13	14,9

Tabela 4: Indicadores Estatísticos para os modelos desenvolvidos

Foram calculadas também as eficiências globais do sistema, a eficiência do arranjo fotovoltaico e do conjunto motor bomba utilizando as equações 2, 4 e 6. Na tabela 5 estão resumidos os resultados.

Altura	Eficiência Arranjo %	Eficiência Motor Bomba %	Eficiência Calculada %	Eficiência Experimental %
24	6,8	20,6	1,41	1,32
32	5,8	22,0	1,28	1,29

Tabela 5: Eficiência dos subsistemas e do sistema como todo

A baixa eficiência verificada deve-se ao fato que o inversor trabalha com ponto fixo, não no ponto de máxima potência, ao efeito da temperatura e das perdas de carga na tubulação e estão consistente com o baixo rendimento do conjunto motor bomba especificados no catálogo do produto.

3.2 Influência da temperatura A temperatura do arranjo bem como a velocidade do vento influenciam muito no desempenho do SBFV, para ilustra esse efeito a tabela 6 mostra o comportamento para uma mesma irradiação de 925 W/m².

Vazão	Vel. Vento	Temperatura média	Temperatura ambiente	Eficiência Global
l/s	m/s	°C	°C	%
0,537	2,1	43,8	29,7	1,4
0,529	1,6	44,6	29,9	1,4
0,516	1,1	45,3	30,1	1,3
0,4	1,3	48,0	29,7	1,2
0,34	0,6	50	29,7	1,2

Tabela 6: Influência da Temperatura e velocidade do vento na vazão (falei com Rinaldo e tinha uns sensores de temperatura que ele falou que não estava confiável, e esses valores são dos que ele disse que estava confiável)

3.3 Influência da intermitência Solar

Para avaliar as situações de liga/desligada do motor já citadas anteriormente foram filtrados os supremos (05 pontos) das Fig. 9 e, gerando gráficos, como mostrados nas figuras 10 e 11. O volume médio de água bombeada aumentou em mais de 25% porém a dispersão ainda existe, mas isso se deve ao fato da variação da temperatura. As tabelas 7 e 8 mostram os efeitos deste fatores.

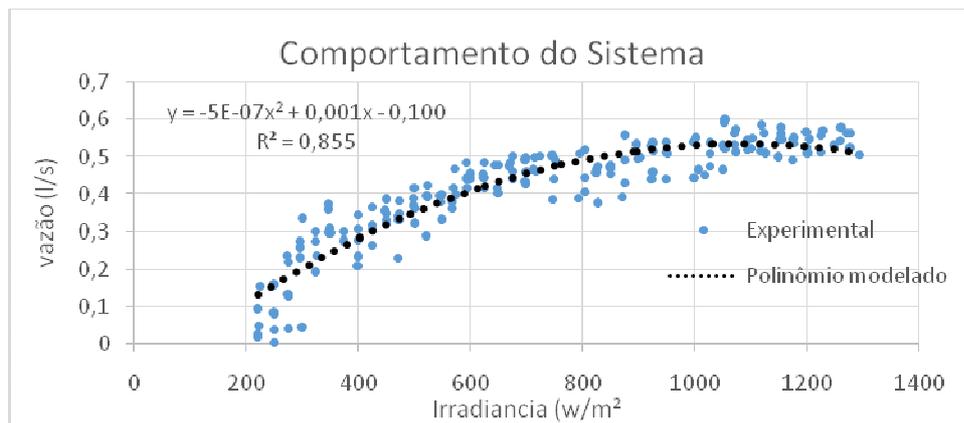


Figura 10- Comportamento da vazão para dia de céu claro – 24 m

Vazão (l/s)	Temperatura (°C)	Velocidade do vento (m/s)
0,519	42,2	0,3
0,509	42,2	0,4
0,501	42,8	0,8
0,443	47,5	1,8
0,405	48,7	2,4

Tabela 7: Detalhe para a irradiância de 800 W/m² para 24 m

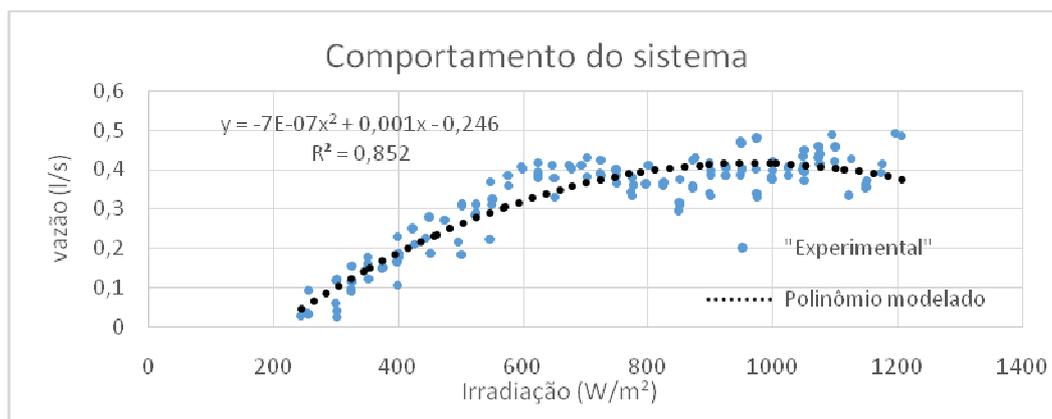


Figura 11- Comportamento dia sem nuvens – 32 m

Vazão (l/s)	Temperatura (°C)	Velocidade do Vento (m/s)
0,375	47,0	1,6
0,317	47,5	1,3
0,309	48,0	1,3
0,295	50,8	1,5

Tabela 8: Detalhe para a irradiância de 825 W/m² para 32 m

3.3 Volume bombeado análise horária

Foi feita também uma análise semelhante a escala em minuto para intervalo horário.

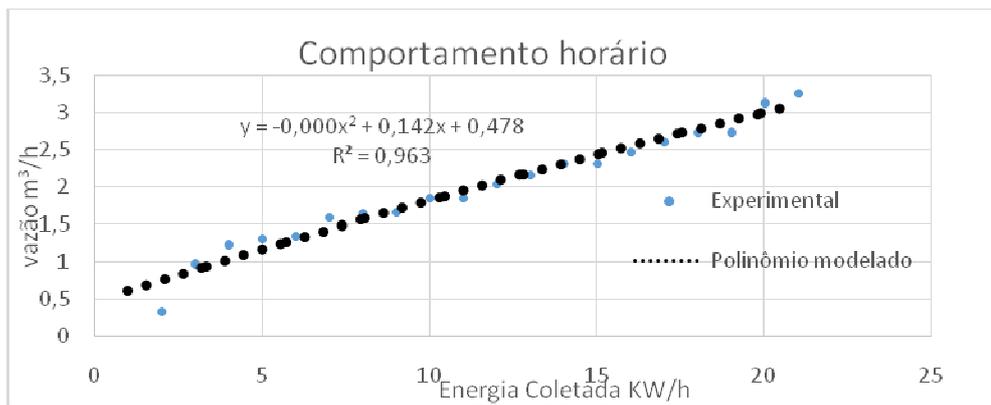


Figura 12 - Medidas experimentais e curvas modelada para SBFV com 24 m de altura manométrica - horária

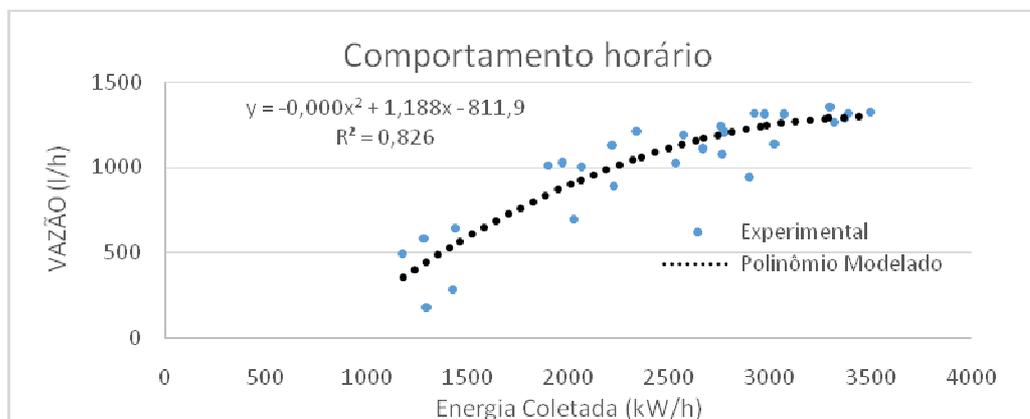


Figura 13 - Medidas experimentais e curvas modelada para SBFV com 32 m de altura manométrica total- horária

Os modelos obtidos em escala horária foram testados e verificados resultando nos dados resumidos na tabela 9.

Altura (m)	Desvio médio %	Desvio médio quadrático %
24	7,3	19,1
32	-6,1	13,7

Tabela 9: Indicadores Estatísticos para as modelagens horárias das vazões

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi caracterizado o comportamento de um SBFV para duas alturas diferentes (24 e 32 metros) na localidade de Recife, PE. Também foram comparados os resultados das modelagens com os valores medidos. A eficiência global do SBFV apesar de ser baixa já era esperada devido à falta de seguidor de máxima potência e a baixa eficiência do conjunto motor e bomba. Em um próximo trabalho esses dados experimentais serão modelados com RNA (Rede neural artificial) para obtenção de modelagens que permitam estimar alturas de recalque contínua.

REFERENCIAS

- [1] Amer EH, Younes MA. Estimating the monthly discharge of a photovoltaic water pumping system: model verification. *Energy Conversion Management*, 2006; 47: 2092–2102.
- [2] Hadj Arab A, Benghanem M, Chenlo F. Motor-pump system modelization. *Renew Energy* 2006;31:905–13.
- [3] Benghanem, Mohamed; Daffallah Khalid; Alamri, Salim H.; Joraid, Ahmad. Effect of pumping head on solar water pumping system. *Energy Conversion and Management*, 2014.
- [4] Oliveira, Rinaldo Melo de, Condicionamento de potência de uma motobomba em um sistema de bombeamento fotovoltaico através de um conversor de frequência.
- [5] Fraidenraich, N. & Vilela O. C., Avanços em sistemas de abastecimento de água com bombeamento fotovoltaico para comunidades rurais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 4: 69-81, 1999.
- [6] Boutelhig A, Bakelli Y, Hadj Mahammed I, Hadj Arab A. Performances study of different PV powered DC pump configurations for an optimum energy rating at different heads under the outdoor conditions of a desert area. *Energy* 2012;39:33–9.
- [7] Vilela, O.C., Caracterização, simulação e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos de abastecimento de água, Tese doutoral submetida ao Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2001

ABSTRACT: This paper demonstrates the characterization of Photovoltaic Water Pumping System, executed above a calibrated testing workbench, and allowing simulations of several height levels. The testing data were modeled to permit the flow rate estimation from PVWPS installed at any other sites. The efficiency of the subsystems and the system were calculated as a whole, as also the turn on/off effect from the motor caused by the solar intermittency and temperature was evaluated. The modeling were prepared in scales of minutes and hours. The overall efficiencies acquired are consistent according to the equipment technical features used.

RESUMEN: Este trabajo muestra la caracterización del sistema de bombeo de agua PV hecho de un banco de pruebas debidamente calibrado, lo que permite la simulación de varios altura de bombeo. Los datos experimentales se modeló para permitir la estimación del flujo SBFV instalado en cualquier otro lugar. Las eficiencias de los subsistemas y el sistema en su conjunto y también se calcularon evaluado el efecto de la aleación de encendido / apagado del motor causados por la intermitencia solar y la temperatura. Los modelados se hicieron en una escala de minutos, así como horaria. Las eficiencias globales obtenidos son consistentes con las características de los equipos utilizados.