

VALIDAÇÃO DE CONDIÇÕES PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE CAPACIDADE DIÁRIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEAMENTO

Teddy Arturo Flores Melendez ¹ – tmelendez@iee.usp.br

Lúcio Carlos Resende ¹

Maria Cristina Fedrizzi ¹

Alaan Ubaiara Brito ²

Roberto Zilles ¹

André Ricardo Mocelin ¹

Márcio Clei Silva de Oliveira ²

Alan Cavalcanti da Cunha ²

Geraldo Neves de Albuquerque Maranhão ²

¹ Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo

² Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Amapá, Macapá

Resumo. Os resultados da avaliação de desempenho operacional de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento podem ser influenciados pelo número de dias de ensaio e pela contribuição da proporção de irradiação difusa (PD) ao longo do ensaio. Diante disso, foram analisados modelos de predição do volume bombeado diário a partir da irradiação global no plano do gerador fotovoltaico, utilizando-se modelagens de regressão linear simples. Para obter os dados para elaboração dos modelos, foram ensaiadas quatro motobombas, duas de 1,5 HP e duas de 2 HP. Para todos os modelos desenvolvidos, a validação estatística foi feita por meio do Coeficiente de Determinação (R^2), Valor-p da Análise de Variâncias (ANOVA) e Erro Médio Absoluto Percentual (MAPE). Dessa forma, inicialmente, para determinar-se o número mínimo de dias, desenvolveram-se modelos contendo todas as observações coletadas nas campanhas de medição e modelos contendo apenas seis (6) amostras, considerando apenas $PD \leq 25\%$. Para as quatro motobombas, as modelagens de regressão desenvolvidas a partir de todas as amostras apresentaram $[0,73 \leq R^2 \leq 0,95]$ e $[1,26\% \leq MAPE \leq 3,84\%]$; já para os elaborados com menor número de observações, obteve-se $[0,89 \leq R^2 \leq 0,97]$ e $[1,51\% \leq MAPE \leq 2,25\%]$. Após essa validação do número mínimo de ensaios, realizou-se a análise estatística para modelos construídos com amostras reduzidas, mas diferentes PD's (até 25%, 30% e 40%), a fim de verificar a influência desta variável sobre a qualidade dos modelos. Para as duas motobombas com dados suficientes, considerando dias com $PD \leq 25\%$, obteve-se modelagens com $[1,51\% \leq MAPE \leq 1,97\%]$; para aqueles modelos com $PD \leq 30\%$, verificou-se $[2,03\% \leq MAPE \leq 2,57\%]$ e, para aqueles com $PD \leq 40\%$, observou-se $[3,11\% \leq MAPE \leq 4,54\%]$. Portanto, recomenda-se, para ensaios de desempenho de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento, a realização de, no mínimo, seis (6) dias de testes com $PD \leq 25\%$.

Palavras-chave: Avaliação de desempenho, motobombas, Regressão linear simples

1. INTRODUÇÃO

O abastecimento de água por sistemas fotovoltaicos em áreas rurais não atendidas pela rede elétrica convencional é uma aplicação de interesse social e econômico, visto que contribui para a redução de doenças associadas ao consumo de água de baixa qualidade e oferece uma alternativa energética para a irrigação (Fedrizzi, Ribeiro e Zilles, 2009). Apesar da redução dos custos de CAPEX (Capital Expenditure) relativos a Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento, sua difusão ainda é tímida.

No entanto, no atual cenário, espera-se um crescimento significativo dessas aplicações em regiões sem acesso à rede elétrica de distribuição. Nessa perspectiva, é fundamental estabelecer um procedimento de avaliação de desempenho desses sistemas, que avalie a capacidade de fornecimento diário de água de acordo com a irradiação diária disponível. Em geral, os fabricantes fornecem essas informações com base no Dia Solar Padrão de 11 horas (IEC, 1997).

A reprodução de um dia padrão para a realização de ensaios nem sempre é viável devido à variabilidade imposta pelas condições atmosféricas. Tais flutuações podem implicar em uma discrepância entre os desempenhos declarados no catálogo técnico da motobomba e os realmente obtidos em condições de campo. Para aplicações que requerem maior confiabilidade do abastecimento de água por Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento, é essencial a realização de ensaios a sol, a partir de bancadas experimentais, para caracterização do desempenho do conjunto motobomba (Brito, Fedrizzi e Zilles, 2007). Porém, a realização de campanhas de medições por períodos maiores requer uma infraestrutura laboratorial mais sofisticada, o que nem sempre é a realidade encontrada pelos projetistas (Hadj Arab, Benghanem e Chenlo, 2006).

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo estabelecer condições aceitáveis para ensaios de produção diária de água. Para tal, avalia-se uma quantidade mínima de amostras (dias de ensaio) necessárias para elaborar modelos confiáveis e estatisticamente válidos de predição do volume de água bombeado diário, $m^3 \cdot \text{dia}^{-1}$, em função da irradiação global diária

no plano do gerador fotovoltaico, kWh.m⁻². Além disso, são determinados os níveis de proporção entre a irradiação difusa diária e a irradiação global diária, ambas coletadas no plano horizontal, em que os modelos propostos não apresentem desvios significativos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As medições experimentais e a avaliação de desempenho operacional foram realizadas na bancada de ensaios para qualificação de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento, localizada nas instalações do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF) do Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da Universidade de São Paulo (USP), cujos detalhes foram apresentados por (Brito, Fedrizzi e Zilles, 2007) e são mostrados na Fig. 1.



Figura 1 – (a) Bancada de ensaio para qualificação de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento; (b) Gerador fotovoltaico utilizado.

Quatro Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento foram ensaiados. As características das motobombas centrífugas utilizadas estão descritas na Tab. 1:

Tabela 1 - Especificações das motobombas centrífugas submetidas aos ensaios.

MODELO DA MOTOBOMBA	FABRICANTE	POTÊNCIA HIDRÁULICA (HP)	NÚMERO DE ESTÁGIOS
4R6PB-07-370	Leão	1,5 HP	7
SUB40-15S4E6	Schneider	1,5 HP	6
4R6PB-09-370	Leão	2 HP	9
SUB40-20S4E8	Schneider	2 HP	8

As motobombas centrífugas de 1,5 HP são conectadas a um gerador fotovoltaico de 2,2 kWp, enquanto as motobombas de 2 HP conectam-se a um gerador fotovoltaico de 3,3 kWp. O acoplamento entre o gerador fotovoltaico e o conjunto motobomba é feito por meio de um dispositivo condicionador de potência, denominado conversor de frequência. Para as motobombas de 1,5 HP, a altura manométrica simulada na bancada de ensaios é de 35 m; e para as motobombas de 2 HP, 45 m; as alturas de ensaio correspondem aos pontos de máxima eficiência da curva de eficiência de cada motobomba.

Com os ensaios de desempenho operacional se determinam o volume de água bombeado diário, m³.dia⁻¹, como uma função da irradiação global diária no plano do gerador fotovoltaico, kWh. m⁻². A bancada de ensaios é integrada a um dispositivo de aquisição de dados que monitora sete variáveis: irradiação global no plano do gerador fotovoltaico, tensão e corrente contínua do gerador fotovoltaico, temperatura do gerador fotovoltaico, frequência de rotação do motor, pressão de operação do sistema e vazão da motobomba sob teste. A irradiação global horizontal e a irradiação difusa horizontal foram obtidas da estação solarimétrica do LSF, instalada na mesma área na qual a bancada de ensaios para qualificação de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento está localizada, conforme exibido na Fig. 2.



Figura 2 – Estação solarimétrica localizada na Universidade de São Paulo
Latitude: 23°33'32" Sul; Longitude: 46°44'6" Oeste.

A Tab. 2 descreve as campanhas de medição para quatro motobombas utilizadas nos ensaios laboratoriais, em termos de período de realização e número de dias de ensaios feitos. A Tab. 3 indica, para cada motobomba, o número de dias de ensaios com proporção de irradiação difusa (PD) de até 25%, 30% e 40%.

Tabela 2 – Campanhas de medição relativo aos ensaios dos Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento.

MOTOBOMBA	PERÍODO DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	NÚMERO DE DIAS DE ENSAIOS REALIZADOS
Leão 1,5 HP	Dezembro/2020 – Maio/2021	81
Schneider 1,5 HP	Maio/2021 – Julho/2021	27
Leão 2 HP	Julho/2021 – Setembro/2021	24
Schneider 2 HP	Julho/2021	18

Tabela 3 - Número de ensaios válidos para diferentes valores de PD para as campanhas de medição de desempenho dos Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento.

MOTOBOMBA	NÚMERO DE DIAS DE ENSAIOS COM PD ≤ 25%	NÚMERO DE DIAS DE ENSAIOS COM PD ≤ 30%	NÚMERO DE DIAS DE ENSAIOS COM PD ≤ 40%
Leão 1,5 HP	32	44	69
Schneider 1,5 HP	16	21	25
Leão 2 HP	13	14	21
Schneider 2 HP	16	17	17

Inicialmente, utilizaram-se todos os dados de irradiação solar diária no plano do gerador fotovoltaico e volume diário bombeado para dias com irradiação difusa de até 25% para desenvolvimento de modelo de predição, a partir de regressões lineares simples, feitas por meio da ferramenta Análise de Dados da planilha eletrônica *Excel*, para cada uma das quatro motobombas testadas. Os modelos foram avaliados e validados a partir de métricas como Coeficiente de Determinação (R^2) e o Valor-p do teste ANOVA para regressão. A modelagem é estatisticamente significativa caso o Valor-p seja menor do que 0,05

Posteriormente, a fim de verificar a possibilidade de se utilizar uma quantidade reduzida de dados para construção do modelo preditivo, para cada uma das motobombas, foram selecionados, de maneira aleatória, medidas de irradiação global diária e de volume diário bombeado relativo a seis (6) dias de ensaios. O critério estabelecido para a escolha aleatória destas amostras foi de que os pontos selecionados fossem representativos. Para tal, para cada motobomba, os dados foram ordenados de maneira crescente e divididos em três regiões: valores inferiores (amostras situadas em uma posição de até 25% considerando o total amostral), valores intermediários (situadas em uma posição acima de 25% e abaixo de 75% do total amostral) e valores superiores (em posição igual ou superior a 75% do total). Em cada região

foram selecionados dois pontos, de maneira aleatória. Uma regra adicional foi que as amostras selecionadas na região inferior deveriam apresentar valores de PD próximos aos limites estabelecidos (de até 25%, 30% e 40%), a fim de avaliar a influência da irradiação difusa na confiabilidade da predição de modelos de regressão linear simples. Para cada um dos modelos com amostras reduzidas construídos para as quatro motobombas e para os diferentes níveis de irradiação difusa, foram avaliados o Coeficiente de Determinação e o Valor-p do teste ANOVA para regressão, para aferir a validade estatística da modelagem.

Finalmente, a métrica utilizada para avaliar os erros de predição dos diferentes modelos foi o Erro Médio Absoluto Percentual (MAPE), calculado pela Eq. 1:

$$MAPE (\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_{med,i} - Q_{pred,i}}{Q_{med,i}} \right| \quad (1)$$

Onde:

$Q_{med,i}$ – Volume diário medido da amostra i ($m^3 \cdot dia^{-1}$)

$Q_{pred,i}$ – Volume diário predito pelo modelo para a amostra i ($m^3 \cdot dia^{-1}$)

n = número total de amostras consideradas no modelo

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Fig. 3, 4, 5 e 6 apresentam o volume diário medido, Q_{med} , em função da irradiação global diária no plano do gerador fotovoltaico para os quatro Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento, considerando dias com $PD \leq 25\%$,

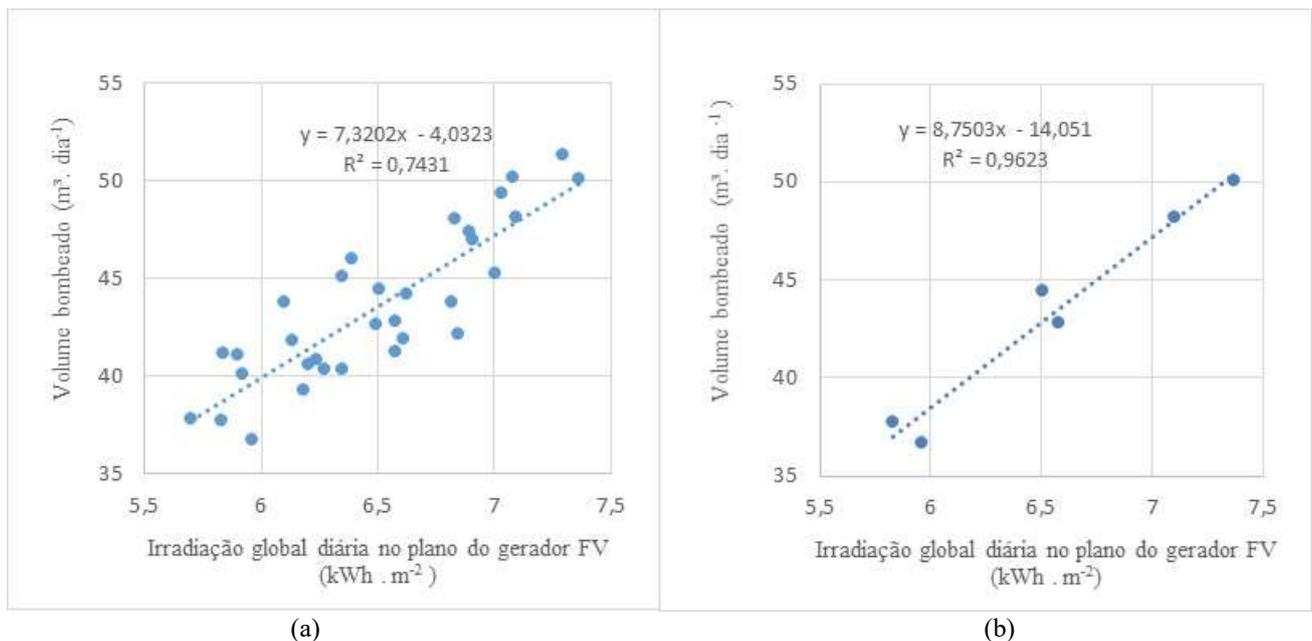


Figura 3 – Motobomba Leão, Modelo 4R6PB-07-370, Potência de 1,5 HP: (a) Volume diário medido como função da irradiação solar diária para dias com $PD \leq 25\%$, considerando todas as observações; (b) Volume diário medido como função da irradiação solar diária para dias com $PD \leq 25\%$, considerando modelo com apenas seis (6) observações aleatórias.

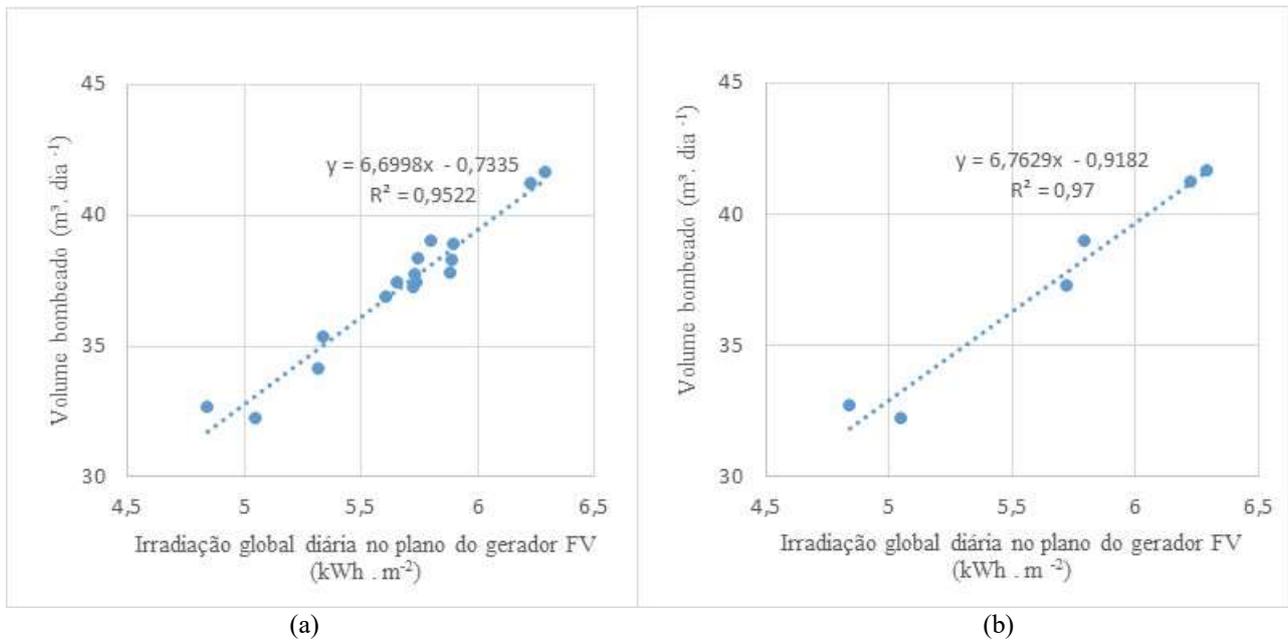


Figura 4 – Motobomba Schneider, Modelo SUB40-15S4E6, Potência de 1,5 HP: (a) Volume diário medido como função da irradiação solar diária para dias com PD ≤ 25%, considerando todas as observações; (b) Volume diário medido como função da irradiação solar diária para dias com PD ≤ 25%, considerando modelo com apenas seis (6) observações aleatórias.

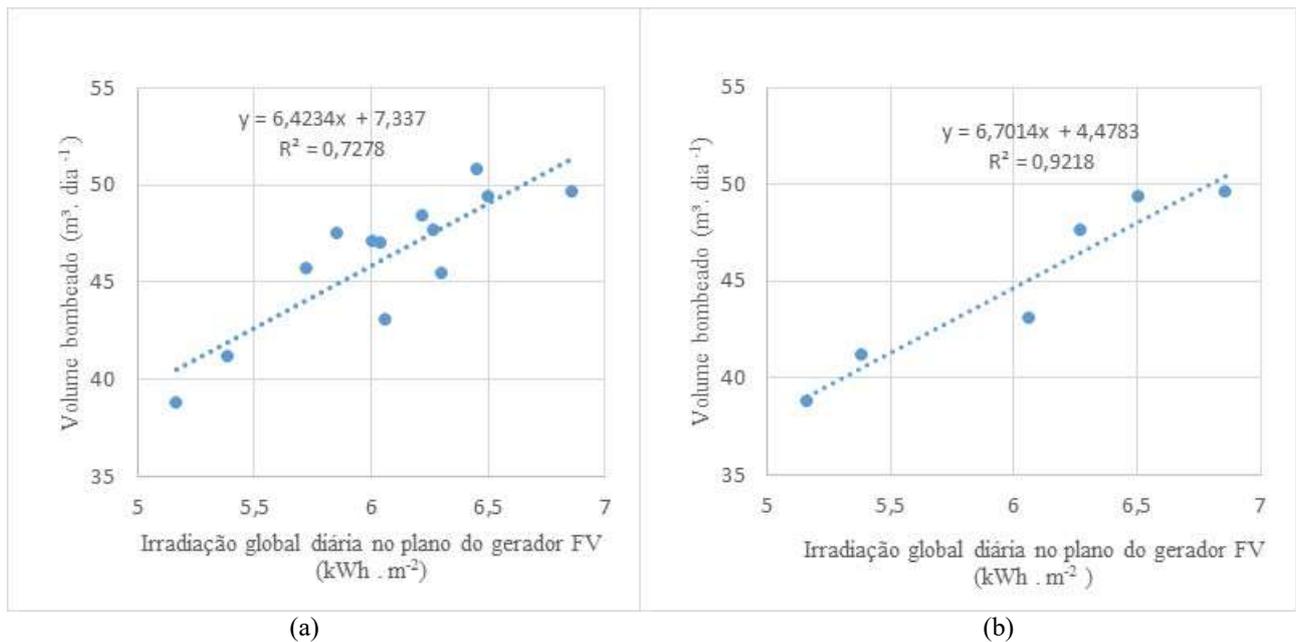


Figura 5 – Motobomba Leão, Modelo 4R6PB-09-370, Potência de 2 HP: (a) Volume diário medido como função da irradiação solar diária para dias com PD ≤ 25%, considerando todas as observações; (b) Volume diário medido como função da irradiação solar diária para dias com PD ≤ 25%, considerando modelo com apenas seis (6) observações aleatórias.

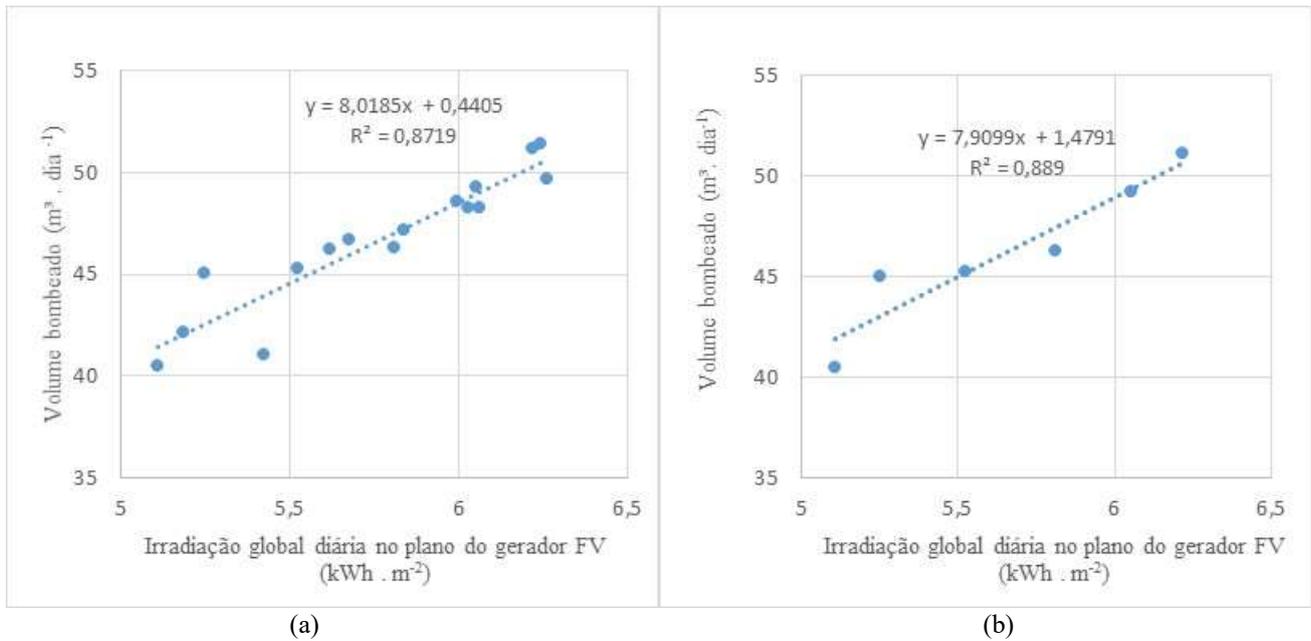


Figura 6 – Motobomba Schneider, Modelo SUB40-20S4E8, Potência de 2 HP: (a) Volume diário medido como função da irradiação solar diária para dias com PD \leq 25%, considerando todas as observações; (b) Volume diário medido como função da irradiação solar diária para dias com PD \leq 25%, considerando modelo com apenas seis (6) observações aleatórias.

A Tab. 4 exibe o Coeficiente de Determinação e o Erro Médio Absoluto Percentual (MAPE) para os modelos de regressão linear construídos, tanto a partir das observações completas como a partir de uma quantidade reduzida de observações, para cada um dos Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento. Em ambos os casos, considerou-se apenas amostras de dias com PD \leq 25%.

Tabela 4 - Coeficiente de Determinação (R^2) e MAPE para modelos de regressão feitos com número total de observações e com seis (6) observações aleatórias, ambos considerando dias com PD \leq 25%, para cada bomba

MOTOBOMBA	TODAS AS OBSERVAÇÕES COM PD \leq 25%		SEIS (6) OBSERVAÇÕES ALEATÓRIAS COM PD \leq 25%	
	R^2	MAPE (%)	R^2	MAPE (%)
Leão 1,5 HP	0,74 - S	3,84	0,96 - S	1,97
Schneider 1,5 HP	0,95 - S	1,26	0,97 - S	1,51
Leão 2 HP	0,73 - S	3,28	0,92 - S	2,25
Schneider 2 HP	0,87 - S	1,88	0,89 - S	1,95

Observação: S – estatisticamente significativa, de acordo com Valor-p do teste ANOVA para regressão linear.

Da Tab. 4, verifica-se que os modelos construídos com todas as amostras apresentam um R^2 menor do que 0,75 e valores de MAPE acima de 3% para as motobombas Leão. Por outro lado, para as motobombas Schneider, observa-se maiores valores de R^2 (acima de 0,85) e MAPE menor do que 2%. Considerando os modelos criados a partir de uma quantidade menor de amostras, nota-se que o R^2 cresce para valores maiores que 0,9 e que o MAPE é reduzido para a ordem de 2,0%, para a motobomba Leão, enquanto que, para a Schneider, os valores de R^2 e de MAPE permanecem relativamente similares aos observados nos modelos com amostras completas. Complementarmente, verifica-se que os oito (8) modelos testados apresentam significância estatística, segundo o Valor-p do teste ANOVA para regressão. Esses resultados sugerem que a realização de testes em bancadas de ensaios durante um período mais curto – seis (6) dias, é capaz de gerar modelos com R^2 elevados, com significância estatística e com MAPE's baixos.

Na Tab. 5, com o intuito de validar o limite aceitável de PD durante os ensaios, são apresentados os valores de MAPE para os modelos de regressão linear construídos a partir de seis (6) observações aleatórias, considerando PD's de até 25%, até 30% e até 40 %.

Tabela 5 – MAPE para modelos de regressão feito com seis (6) observações aleatórias, a partir de dias com diferentes PD's, para motobombas de 1,5 HP

	SEIS (6) OBSERVAÇÕES COM PD ≤ 25%	SEIS (6) OBSERVAÇÕES COM PD ≤ 30 %	SEIS (6) OBSERVAÇÕES COM PD ≤ 40%
MOTOBOMBA	MAPE (%)	MAPE (%)	MAPE (%)
Leão 1,5 HP	1,97	2,03	3,11
Schneider 1,5 HP	1,51	2,57	4,54

De acordo com a Tab. 3, nota-se que as motobombas de 2 HP não possuem dados suficientes para o desenvolvimento de novos modelos de regressão linear que permitam considerar amostras com irradiação difusa de até 30 e 40%. Dessa forma, a análise da influência da PD no MAPE foi feita apenas para as motobombas de 1,5 HP. Da Tab. 5, observa-se maiores valores de MAPE para modelos com amostras contendo dias com maiores valores de PD. Enquanto os modelos com PD ≤ 25% apresentam MAPE's menores que 2%, aqueles com PD ≤ 40% exibem um MAPE que pode ultrapassar 4,5%. Nesse último caso, há uma observação que chega a apresentar um desvio de 12% em relação ao volume predito pelo modelo. Dessa forma, recomenda-se como requisito de dias válidos para ensaios de bombeamento apenas aqueles com PD ≤ 25% e, no limite, aqueles com PD ≤ 30 %.

Os resultados obtidos são o primeiro passo para validar um procedimento para estimar o volume de água diário fornecido por um Sistema Fotovoltaico de Bombeamento.

4. CONCLUSÕES

Nos procedimentos de ensaio de qualificação de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento pode-se considerar como aceitável para elaboração de modelos de predição de capacidade de bombeamento, m³.dia⁻¹, a realização de testes em bancadas de ensaios por, no mínimo, seis (6) dias com incidência de proporção de irradiação difusa de até 25%. Nestas condições, o MAPE dos modelos analisados é menor que 2%. Portanto, esta configuração experimental pode, consequentemente, validar o desempenho deste tipo de ensaio em bancadas de ensaios, principalmente em locais com altos níveis de irradiação difusa.

Agradecimentos

Este trabalho contou com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, Processo 2019/23791-0, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Amapá, FAPEAP, Termo de Outorga de Auxílio Financeiro 002/2020, e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES.

REFERÊNCIAS

- Arab, A. Hady; Benghanem, M.; Chenlo, F. 2006. Motor-pump system modelization. *Renewable Energy*, vol. 31, n. 7, pp. 905-913.
- Brito, A. U., Fedrizzi, M. C., Zilles, R., 2007. PV pumping systems: a useful tool to check operational performance. *Progress in Photovoltaics: Research and applications*, vol. 15, n. 1, pp. 41-49.
- Fedrizzi, M. C., Ribeiro, F. S., Zilles, R., 2009. Lessons from field experiences with photovoltaic pumping systems in traditional communities. *Energy for Sustainable Development*, vol. 13, n. 1, pp. 64-70.
- IEC, 1997. IEC 61725 1997: Analytical expression for daily solar profiles, International Electrotechnical Commission.

VALIDATION OF CONDITIONS FOR CARRYING OUT DAILY CAPACITY TESTS OF PHOTOVOLTAIC PUMPING SYSTEMS

Abstract. *The results of the operational performance evaluation of Photovoltaic Pumping Systems can be influenced by the number of test days and the site's diffuse irradiation proportion (PD). So, prediction models of the daily pumped flowrate were built from the global irradiation in the plane of the photovoltaic generator, using simple linear regression models. Four motopumps were tested to obtain data, two of 1.5 HP and two of 2 HP. For all models developed, statistical validation was performed using the Coefficient of Determination (R²), the p-value of Analysis of Variances (ANOVA), and Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Thus, initially, to determine the minimum number of days, models containing all the observations collected in the measurement campaigns and models containing only six (6) samples, both considering only PD ≤ 25%. For the four motopumps, the regression models developed from all samples showed [0.73 ≤ R² ≤ 0.95] and [1.26% ≤ MAPE ≤ 3.84%] and for those prepared with the lowest number of observations, [0.89 ≤ R² ≤ 0.97] and [1.51% ≤ MAPE ≤ 2.25%]. Statistical analysis was carried out for built models with reduced samples, with different PD's (up to 25%, 30%, and 40%) to verify the influence of this variable on the quality of the models. For the two*

motopumps with enough data, it was considering days with $PD \leq 25\%$, obtained modeling with $[1.51\% \leq MAPE \leq 1.97\%]$; for those models with $PD \leq 30\%$, $[2.03\% \leq MAPE \leq 2.57\%]$ and, for those with $PD \leq 40\%$, $[3.11\% \leq MAPE \leq 4.54\%]$. Therefore, for performance tests of Photovoltaic Pumping Systems, it is recommended to carry out at least six (6) days of tests with $PD \leq 25\%$.

Key words: *Performance assessment, motopumps, Simple linear regression*