


Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Performance analysis of the water pumping system by photovoltaic solar energy for irrigation of a seedling nursery

Análisis de rendimiento del sistema de bombeo de agua por energía solar fotovoltaica para riego de un vivero de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira  <https://orcid.org/0000-0002-8651-6395>

Bacharela em Engenharia Ambiental pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense *Campus* Campos Guarus – Campos dos Goytacazes/RJ – Brasil. E-mail: helisamoreira1@hotmail.com.

Luiz Fernando Rosa Mendes  <https://orcid.org/0000-0002-2330-4766>

Mestre em Engenharia de Produção (UCAM-Campos). Pesquisador do Grupo de Pesquisas Aplicadas em Energia Fotovoltaica (GPAFv) e Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense *Campus* Campos Guarus – Campos dos Goytacazes/RJ – Brasil. E-mail: lfmendes@iff.edu.br.

Resumo

O Brasil possui grande potencial de radiação solar devido a sua localização geográfica, sendo assim a energia solar fotovoltaica (ESFV) aparece como alternativa sustentável para produção de eletricidade. Dentre as aplicações da ESFV está o bombeamento de água para irrigação. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar o rendimento de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água para irrigação de uma casa de vegetação localizada no Instituto Federal Fluminense *Campus* Campos Guarus, assim como dimensionar e implantar tal sistema nas dependências do *campus*. Este estudo foi dividido em quatro etapas: dimensionamento, montagem, monitoramento das grandezas físicas e elétricas e cálculo do rendimento do sistema. Para verificar as correlações existentes entre as variáveis irradiação solar, vazão, rendimento e temperatura ambiente aplicou-se o método de Análise de Regressão através do *software* BioEstat versão 5.3. A partir da metodologia proposta, foi possível verificar que o rendimento médio do sistema de bombeamento foi de 49,41%, atendendo a necessidade de irrigação. Além disso, observou-se que a irradiação solar influenciou tanto a vazão quanto o rendimento do sistema. Entretanto, a temperatura ambiente não apresentou influência na vazão e no rendimento. Sendo assim, os dados não foram conclusivos, necessitando de um maior período de medições para validar a relação das variáveis com a temperatura.

Palavras-chave: Energia renovável. Sistema fotovoltaico isolado. Rendimento.

Abstract

Brazil has great solar radiation due to its geographic location; therefore, photovoltaic solar energy (PVSE) is a sustainable alternative for electricity production. Among the applications of the PVSE is the pumping of water for irrigation. Thus, the present work has the objective of analyzing the efficiency of a photovoltaic system of water pumping for irrigation of a greenhouse located at the Federal Fluminense Institute *campus* Campos Guarus, as well as to scale and implant such a system in the *campus* facilities. This study was structured into four stages: sizing, assembly, monitoring of physical and electrical quantities, and calculation of the system performance. Regression Analysis method was applied using BioEstat software version 5.3 in order to identify the correlation between solar irradiation, flow rate, efficiency and ambient temperature variables. With this methodology, it was possible to verify that the average efficiency of the pumping system was 49.41%, meeting the requirements for irrigation. In addition, it was observed that the solar irradiation influenced both the flow rate and the efficiency of the system. However, the ambient temperature had no influence on flow and efficiency. Therefore, the data were not conclusive, requiring a longer period of measurements to validate the relationship of the variables with the temperature.

Keywords: Renewable energy. Isolated photovoltaic system. Efficiency.

Resumen

Brasil posee gran potencial de radiación solar debido a su ubicación geográfica, siendo así la energía solar fotovoltaica (ESFV) aparece como alternativa sostenible para producción de electricidad. Entre las aplicaciones de la ESFV está el bombeo de agua para irrigación. De esta forma, el presente trabajo tiene como objetivo analizar el rendimiento de un sistema fotovoltaico de bombeo de agua para irrigación de una casa de vegetación ubicada en el Instituto Federal Fluminense *campus* Campos Guarus, así como dimensionar e implantar tal sistema en las dependencias del *campus*. Este estudio se dividió en cuatro etapas: dimensionamiento, montaje, monitoreo de las magnitudes físicas y eléctricas y cálculo del rendimiento del sistema. Para verificar las correlaciones existentes entre las variables irradación solar, flujo, rendimiento y temperatura ambiente, se aplicó el método de Análisis de Regresión a través del *software* BioEstat versión 5.3. A partir de la metodología propuesta, fue posible verificar que el rendimiento promedio del sistema de bombeo fue del 49,41%, atendiendo la necesidad de irrigación. Además, se observó que la irradación solar influenció tanto el caudal y el rendimiento del sistema. Sin embargo, la temperatura ambiente no influyó en el flujo y el rendimiento. Por lo tanto, los datos no fueron concluyentes, necesitando un mayor período de mediciones para validar la relación de las variables con la temperatura.

Palabras clave: Energía renovable. Sistema fotovoltaico aislado. Rendimento.

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

1 Introdução

A qualidade de vida de uma sociedade está diretamente ligada ao seu consumo de energia, uma vez que a melhoria dos padrões de vida nos países aumenta a demanda energética. Dessa forma, num cenário mundial, há a preocupação com a segurança energética para manter o desenvolvimento econômico e social, mas sem perder a perspectiva de proteção ambiental (GOLDEMBERG; LUCON, 2012).

A intensificação no uso dos combustíveis fósseis pelas atividades humanas desde a Revolução Industrial, juntamente com o atual avanço tecnológico, acarretou uma grave crise ambiental. A geração de eletricidade está dentre as atividades antrópicas que contribuem para o aumento das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) (McDONALD *et al.*, 2016).

Diante desse cenário de preocupação com as questões ambientais, as fontes renováveis de energia (FRE) surgem como estratégias para mitigar as mudanças climáticas no âmbito da geração elétrica, devido a esse tipo de ação antrópica ter participação expressiva nas emissões globais de GEE (MÉJEAN *et al.*, 2018).

O Brasil dispõe de uma matriz elétrica predominantemente renovável, sendo a geração hidráulica a principal fonte de produção de eletricidade. No entanto, o país vem passando por alterações no seu regime de chuva, o que afeta diretamente a geração hidroelétrica, reduzindo assim a capacidade de energia elétrica por fontes renováveis (MENDES, 2014). Desta forma, para atender a demanda interna de energia é necessária a diversificação da matriz elétrica através da incorporação de outras FRE além da hídrica. Nesse contexto, a energia solar aparece como alternativa sustentável, já que o Brasil possui um grande potencial de radiação solar em virtude de sua localização geográfica (SCHMIDT; CANCELLA; PEREIRA JÚNIOR, 2016).

A redução dos preços dos sistemas fotovoltaicos, como consequência do desenvolvimento tecnológico e da crescente demanda mundial, possibilitou a expansão da energia solar em diversos campos, dentre eles a irrigação e o abastecimento de água (GAO *et al.*, 2018).

O bombeamento de água dos sistemas de irrigação necessita, em geral, de motobombas ligadas à rede elétrica de distribuição da concessionária local ou motores diesel acoplados à bomba d'água. A primeira solução implica custo pelo consumo de energia elétrica. A segunda solução acarreta custo para o produtor a partir da aquisição do combustível (óleo diesel) e impacto ao ambiente em função das emissões de gases poluentes durante o funcionamento do motor (SHINDE; WANDRE, 2015).

Dessa forma, segundo GAO e colaboradores (2018), o uso da tecnologia fotovoltaica associada ao bombeamento de água para irrigação constitui-se em uma alternativa sustentável e econômica para a produção de eletricidade, uma vez que esse sistema produz sua própria energia, dispensando a rede elétrica e o motor a diesel para seu funcionamento.

Sendo assim, o objetivo do trabalho é analisar o rendimento de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água para irrigação da casa de vegetação situada no Instituto Federal Fluminense *Campus* Campos Guarus.

2 Referencial teórico

2.1 Incidência de radiação solar no Brasil

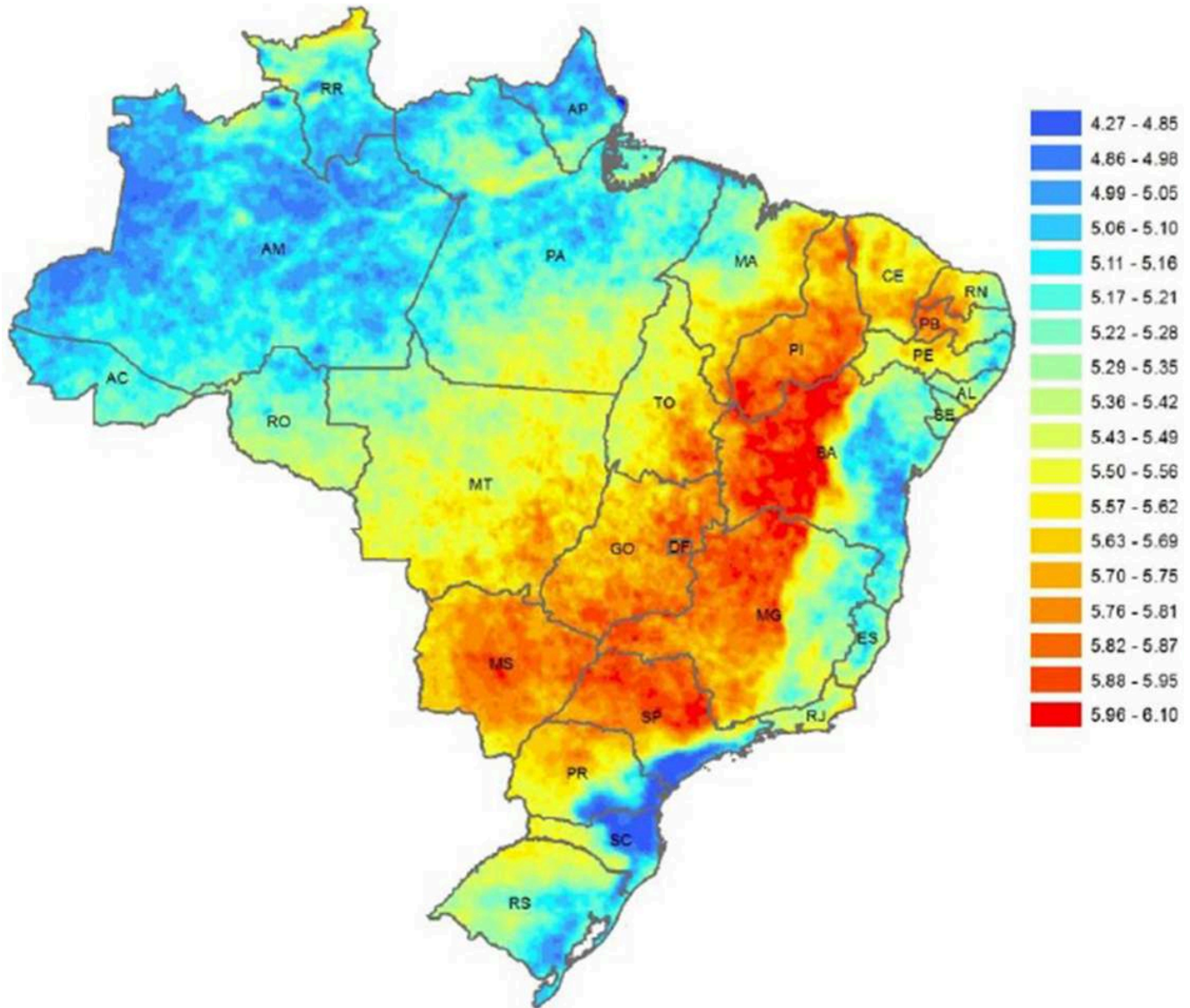
O Brasil tem um eminente potencial de incidência de radiação solar, uma vez que a maior parte de seu território está localizada na zona intertropical. Essa localização geográfica implica dias com maior quantidade de horas de radiação solar (WANDERLEY, 2013). Desse modo, o emprego da tecnologia fotovoltaica no país é viável em termos de radiação solar

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

incidente. A Figura 1 destaca a irradiação¹ total (kWh.m⁻²/dia) do Brasil em plano cuja inclinação é igual a latitude do local, podendo ser observada maior incidência na região central do país.

Figura 1. Irradiação total em plano (kWh.m⁻²/dia)



Fonte: COGEN (2012)

2.2 Incidência de radiação solar no estado do Rio de Janeiro

No estado do Rio de Janeiro, verifica-se que a irradiação varia entre 5,29 a 5,56 kWh.m⁻²/dia, o que indica um potencial de exploração desse recurso. No entanto, a distribuição dessa irradiação no estado não é uniforme.

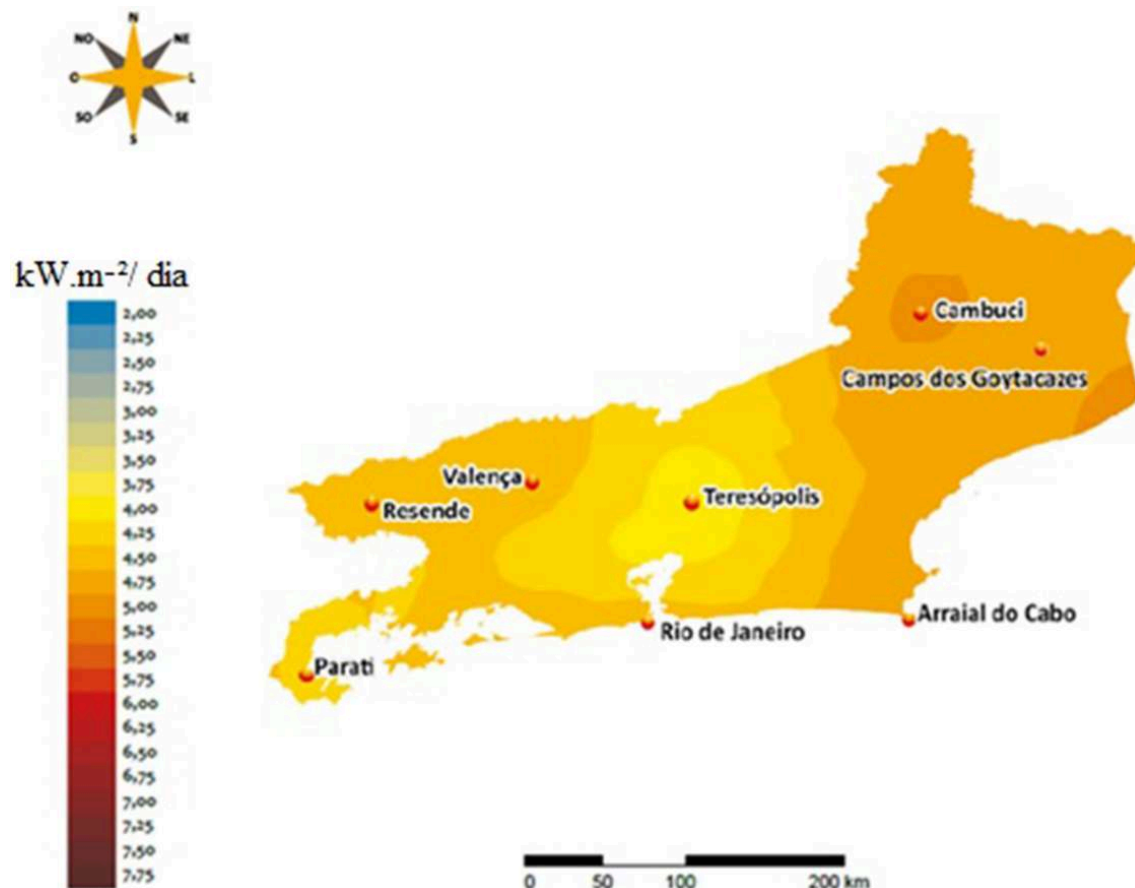
¹ De acordo com Villalva (2015), a irradiação expressa a energia incidente por unidade de área sobre uma superfície plana horizontal durante um determinado intervalo de tempo.

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

A Figura 2 corrobora a Figura 1 no que diz respeito ao potencial solar do estado do Rio de Janeiro, com maior irradiância solar concentrada nas regiões Norte, Noroeste e Lagos, referenciadas no mapa pelos municípios de Cambuci, Campos dos Goytacazes e Arraial do Cabo, respectivamente.

Figura 2. Irradiância solar no estado do Rio de Janeiro



Fonte: Adaptado de IEPUC (2016)

Em termos de irradiância e considerando o estudo de Rathore, Das e Chauhan (2018), nota-se que a região onde se situa o município de Campos dos Goytacazes tem potencial para implantar um sistema de bombeamento de água por ESFV, pois a irradiância do município em questão varia entre 5 a 5,25 kW.m⁻²/dia e, em contrapartida, a irradiância no território indiano é de aproximadamente 4,92 kW.m⁻²/dia.

2.3 Fatores de influência na produção de eletricidade nos módulos fotovoltaicos

A produção de eletricidade num módulo fotovoltaico (MFV) é influenciado por condições ambientais, tais como radiação solar e temperatura (MINEMOTO; NAGAE; TAKAKURA, 2007).

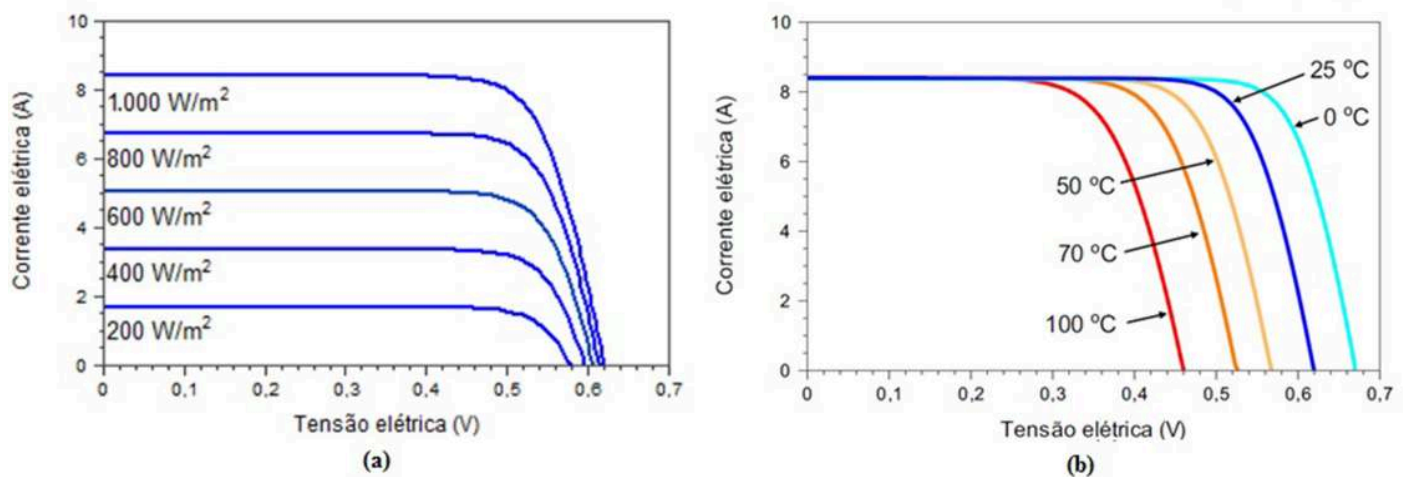
As variações na temperatura são capazes de alterar as propriedades do arranjo cristalino da célula fotovoltaica, modificando assim o valor da tensão elétrica fornecida nos terminais do módulo. Quanto maior for a temperatura, maior será a queda na

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

tensão desenvolvida pela célula e, conseqüentemente, haverá uma redução na potência do sistema. Por outro lado, a corrente gerada depende diretamente do nível de irradiância incidente sobre as células, ou seja, quanto maior for a intensidade da irradiância solar, maior o valor de corrente elétrica produzida. Sendo assim, a curva I-V característica do módulo varia de acordo com esses fatores ambientais, conforme mostram as Figuras 3a e 3b (RAHMAN; HASANUZZAMAN; RAHIM, 2017).

Figuras 3a e 3b. Influência da irradiância (a) e da temperatura (b) na curva I-V de uma célula FV



Fonte: Pinho e Galdino (2014)

A captação dos raios solares pode ser afetada por diversos fatores, dentre eles a localização geográfica, a orientação e a inclinação dos módulos, influenciando diretamente o desempenho do sistema fotovoltaico (RÜTHER, 2004).

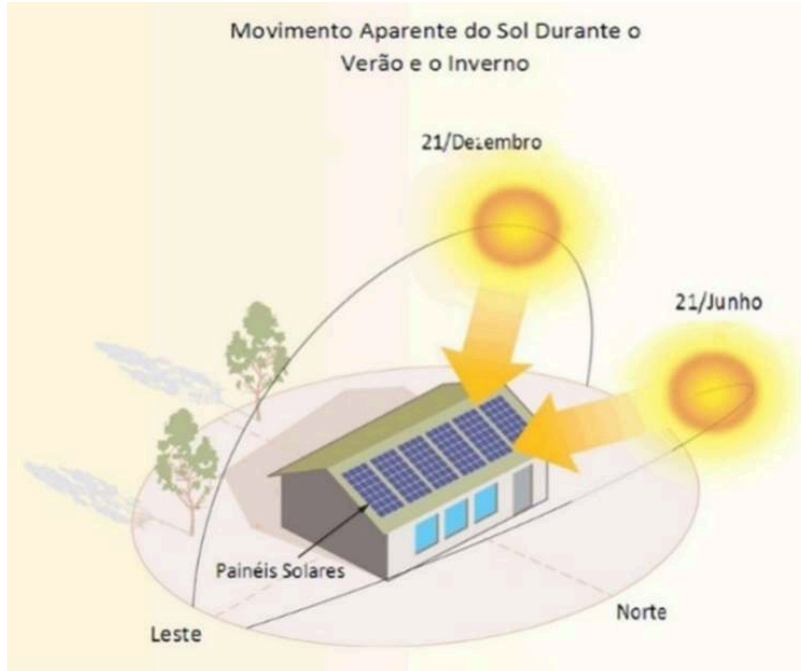
Em função dos movimentos de rotação e translação da Terra, a radiação solar sofre variações ao longo do dia, do ano e da localidade, não atingindo de maneira uniforme a superfície terrestre. Sendo assim, a instalação dos módulos solares deve seguir alguns parâmetros para maximizar a produção de energia (TOLMASQUIM, 2016).

Para melhor aproveitamento da radiação solar ao longo do ano, os módulos fixos devem ser instalados para receber os raios solares perpendicularmente. Para instalações no hemisfério norte, a face do módulo deve estar orientada para o sul geográfico e, caso o local de instalação esteja no hemisfério sul, a superfície do módulo deve estar orientada para o norte geográfico (LOPES, 2013; SECUNDES, 2015).

Quanto ao parâmetro inclinação, o módulo deve ser colocado inclinado em relação ao plano horizontal, com um ângulo próximo ao da latitude do local de instalação. Em locais de baixa latitude, o mesmo deve ser instalado com uma inclinação mínima de 10°, a fim de favorecer a autolimpeza pela água da chuva (CRESESB, 2004; SECUNDES, 2015). Isso porque há um movimento solar relativo à Terra que forma uma “janela solar”, ou seja, verifica-se, para o hemisfério sul, um ângulo entre os raios solares e plano da linha do Equador que varia entre 23,45° aproximadamente no dia 21 junho (dia chamado de solstício de inverno) e -23,45° aproximadamente no dia 21 de dezembro (dia chamado de solstício de verão) (Figura 4) (PINHO; GALDINO, 2014).

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas
Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

Figura 4. Movimento aparente do Sol em relação à Terra responsável pela formação dos Solstícios de inverno e verão



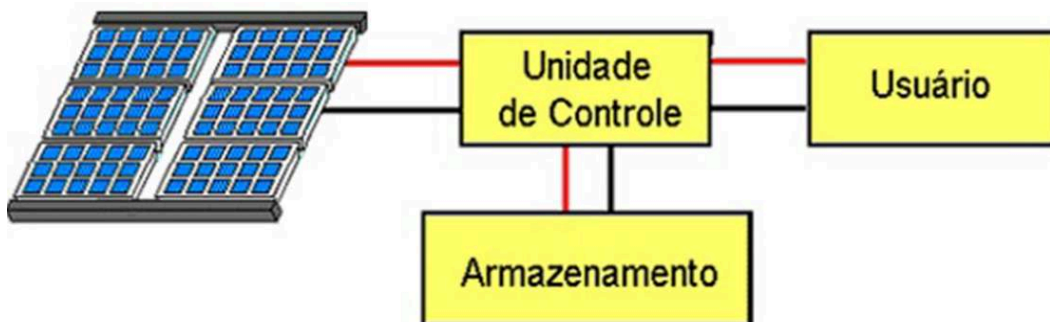
Fonte: SUN ENERGY (2017)

2.4 Sistemas fotovoltaicos tipo isolado

Segundo a NBR 11704/2008, os sistemas fotovoltaicos, quanto à interligação ao sistema público de fornecimento de energia elétrica, podem ser classificados em isolados ou conectados à rede elétrica (ABNT, 2008b). Este trabalho tem o intuito a abordagem dos sistemas tipo isolado.

Os sistemas fotovoltaicos isolados são aqueles com funcionamento independente da rede elétrica pública, ou seja, não são conectados à rede de distribuição da concessionária, possuindo como fonte primária apenas a energia produzida pelos painéis fotovoltaicos, uma unidade de controle da energia gerada pelos painéis e carga e descarga do armazenamento de energia, conforme a Figura 5 (SEGUEL, 2009; FURTADO; FURTADO; MARTINEZ, 2015; CRESESB, 2013).

Figura 5. Configuração básica de um sistema fotovoltaico



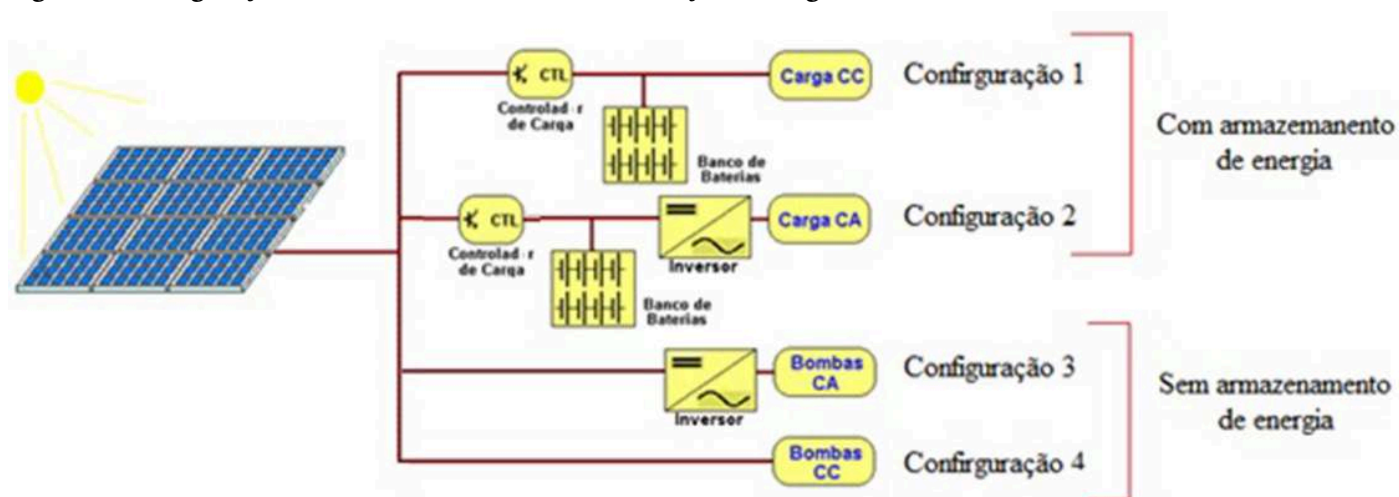
Fonte: CRESESB (2017)

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

Os sistemas podem variar em dois tipos (com armazenamento e sem armazenamento de energia) e com variações na configuração conforme a Figura 6.

Figura 6. Configurações de sistemas fotovoltaicos em função da carga utilizada



Fonte: Adaptado do CRESESB (2017)

Na primeira configuração, o armazenamento pode ser feito através de baterias (energia química), quando se deseja utilizar aparelhos elétricos em períodos sem geração fotovoltaica. Há um dispositivo chamado de controlador de carga responsável por colocar o MFV em maior eficiência (melhor curva característica I-V) e controlar também a carga e descarga do conjunto de baterias. Nessa configuração, a carga é C.C., não necessitando de dispositivo para conversão de C.C. para C.A. Esse caso é peculiar para as cargas exclusivamente em C.C., por exemplo: alimentação de sistema de iluminação, monitoramento remoto e sinalização etc.

Na Configuração 2, o sistema fotovoltaico autônomo utiliza painéis fotovoltaicos, baterias para armazenamento (banco de baterias), controlador de carga e um inversor que converte a C.C. disponibilizada pelo módulo em C.A. utilizada pela maioria dos aparelhos elétricos e eletrônicos. Esse caso é mais típico de residências em comunidades isoladas, que necessitam do funcionamento de equipamentos como geladeira, televisores, eletrodomésticos, uma própria bomba d'água convencional etc. (LAMBERTS *et al.*, 2010).

Uma das vantagens das Configurações 1 e 2 é a acumulação da energia elétrica gerada na forma de energia química para ser utilizada posteriormente em períodos noturnos e de baixa radiação solar (TIGGEMANN, 2015). Em contrapartida, as baterias utilizadas nesse sistema possuem vida útil menor que a dos MFV, o que torna os custos de manutenção elevados (DESCONZI, 2011).

As Configurações 3 e 4 mostram sistemas autônomos sem armazenamento de energia, ela é produzida pelo módulo sendo usada diretamente, sem a necessidade de seu armazenamento em forma de energia química em baterias. Os sistemas de irrigação podem ser do tipo autônomo, sem armazenamento de energia, quando toda a água bombeada é diretamente consumida. Quando se necessita de armazenamento, faz-se por meio de reservatórios elevados, desta maneira a água é armazenada em energia potencial para ser usada posteriormente, sendo esse último modelo de armazenamento o foco deste trabalho (PINHO; GALDINO, 2014).

A diferença primordial entre a penúltima e a última configuração mostrada na Figura 6 é o fato que a Configuração 3 utiliza uma carga de corrente alternada (C.A.), nesse caso, uma bomba C.A. e, com isso, há a necessidade de incorporação no

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

sistema de mais um equipamento: o inversor, que converte a corrente contínua (C.C.) para C.A. Já a última configuração é a mais simples, pois faz conversão direta da radiação solar incidente no MFV em energia elétrica de C.C., e esta é aplicada ao motor de C.C. da bomba d'água, eliminando assim a necessidade do inversor C.C.-C.A.

A Configuração 4, portanto, apresenta baixo custo (menos equipamentos) e uma maior confiabilidade do funcionamento devido à ausência de baterias que aumenta a vida útil e reduz a necessidade de manutenção. A desvantagem, nesse caso, seria apenas a interferência na produção de energia devido à intermitência da radiação solar (VILLALVA, 2015).

As Figuras 7a e 7b mostram um exemplo da Configuração 4. Ele constitui um protótipo de sistema de irrigação autônomo sem armazenamento em baterias e foi utilizado para irrigação em olericultura no Polo de Inovação Campos dos Goytacazes (PICG) do Instituto Federal Fluminense, situado no município de Campos dos Goytacazes/RJ.

Figuras 7a e 7b. (a) Canteiro de 100 m² para cultivo de olericultura. (b) Protótipo de sistema de irrigação autônomo sem armazenamento em baterias composto por dois painéis fotovoltaicos de 130 Wp e duas bombas d'água de 12 Vcc modelo SHURflo 8000



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria.

2.5 Aplicação de energia solar fotovoltaica para bombeamento de água

A tecnologia fotovoltaica pode ser aplicada em diversas finalidades, dentre elas está o bombeamento de água para irrigação.

Esses sistemas de bombeamento por energia solar oferecem simplicidade, confiabilidade e baixa manutenção para irrigação de pequenas culturas agrícolas, além de ser uma alternativa mais sustentável e econômica em relação ao bombeamento por motor diesel em localidades isoladas e sem acesso à rede elétrica de distribuição da concessionária ou até mesmo quando essa rede elétrica é disponível (SENOL, 2012; SHINDE; WANDRE, 2015).

O trabalho de Campos e Alcantara (2018) exemplifica a utilização do bombeamento de água para irrigação por meio da ESFV e como essa tecnologia mostra-se uma peça fundamental para redução de custos na agricultura familiar.

Para isso, um sistema fotovoltaico de bombeamento é constituído basicamente por um arranjo de MFVs, equipamentos de condicionamento de potência (inversor, controlador de carga, seguidor do ponto de máxima potência), conjunto motobomba, sistema de armazenamento (opcional: baterias ou reservatórios de água) e sistema de distribuição (GAO et al., 2018). No entanto, a configuração do sistema varia de acordo com o seu nível de complexidade.

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

Os sistemas mais simples constituem de MFV conectado diretamente ao conjunto motobomba em C.C., sendo este conectado ao sistema de irrigação (sistema de distribuição de água). Essa forma de acoplamento direto é utilizada em sistemas com pequena potência (50 a 400 Wp²) e possui um baixo custo de implantação. Já os sistemas mais complexos utilizam dispositivos de condicionamento de potência no acoplamento do arranjo fotovoltaico com a motobomba, como conversor C.C.-C.C. (para carga de corrente contínua) ou inversor C.C.-C.A. (para carga de corrente alternada). Além disso, são usados seguidores do ponto de máxima potência (conversores C.C.-C.C. com Rastreador de Ponto de Máxima Potência) para amenizar a variação das condições de irradiação e aumentar o rendimento de energia (NOGUEIRA, 2009; MORALES, 2011; MORALES, 2016).

Como o recurso solar não está disponível continuamente, a energia pode ser armazenada em duas formas: química (em baterias) ou potencial (em reservatórios de água). Sendo esta última forma de armazenamento mais utilizada em bombeamento de água (CAMPOS; ALCANTARA, 2018).

Nas aplicações descritas, as bombas mais utilizadas em relação à tecnologia são as centrífugas e as de deslocamento positivo (MORALES, 2016). As primeiras possuem uma eficiência hidráulica em torno de 25% a 35%; e as segundas possuem altas eficiências de até 70% (CHANDEL; NAIK; CHANDEL, 2015).

Segundo Alvarenga (2017), as bombas centrífugas são mais adequadas para bombear grandes volumes de água a pequenas alturas manométricas, enquanto as bombas de deslocamento positivo, também chamadas de volumétricas, são mais utilizadas para pequenas vazões e grandes alturas manométricas.

3 Metodologia

3.1 Material

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região Norte Fluminense é classificado como Aw³, ou seja, tropical úmido com chuvas concentradas no verão, inverno seco e temperatura do mês mais frio superior a 18 °C (TORRES; MACHADO, 2008; MENDONÇA *et al.*, 2007).

De acordo com dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2017), o município possui uma temperatura média anual de 23,7 °C, precipitação pluviométrica anual de 1.055,3 mm, com maior volume de chuva nos meses de novembro e dezembro, além de uma altitude média de 11,2 m.

Neste ambiente encontra-se o trabalho em questão. O estudo baseia-se na aplicação da ESFV para irrigação do viveiro de produção de mudas utilizadas pelo Projeto Capivara (Figura 8).

² Watt-pico (Wp): constitui em uma unidade prática de potência elétrica dos módulos fotovoltaicos referentes às condições padrões de testes dos módulos, conhecida como *Standard Test Conditions* (STC). Tal condição considera irradiação de 1000 W/m² e temperatura de 25 °C da célula fotovoltaica (VILLALVA, 2015).

³ O modelo climático do biólogo e climatologista russo Wilhelm Köppen leva em consideração a temperatura e a precipitação pluvial. Aw é um tipo climático, em que "A" representa a categoria dos climas tropicais úmidos com temperatura média do mês mais frio superior a 18 °C e "w" (*winter*) indica inverno seco e chuvas concentradas no verão (TORRES; MACHADO, 2008).

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas
Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

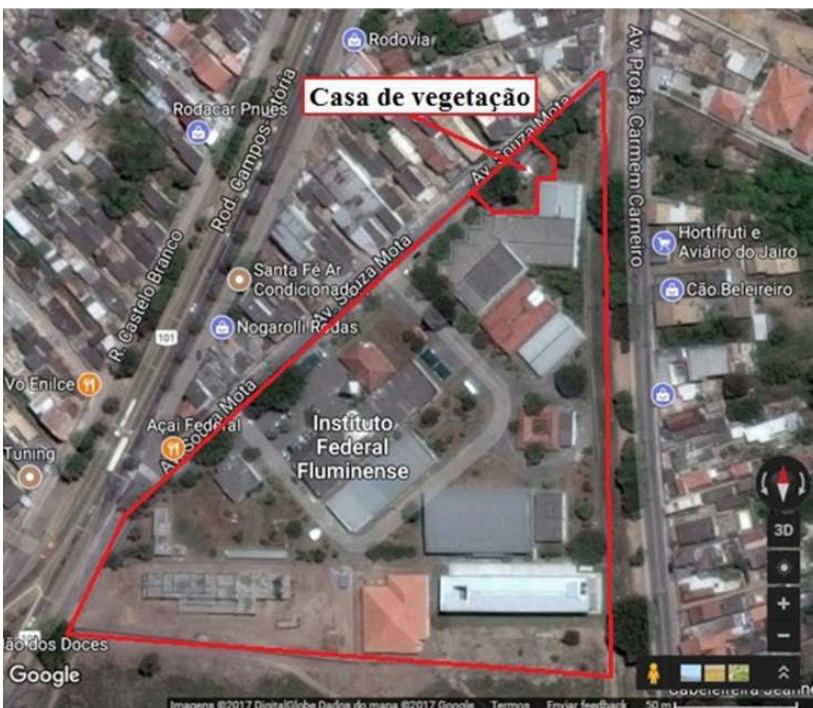
Figura 8. Viveiro de mudas do Projeto Capivara situado no Instituto Federal Fluminense *Campus* Campos Guarus



Fonte: Elaboração própria

A casa de vegetação em questão está situada na área do Instituto Federal Fluminense *campus* Campos Guarus, no município de Campos dos Goytacazes (região Norte do estado do Rio de Janeiro) e localizada a partir das coordenadas geográficas de latitude de 21°44'02,70" Sul e longitude de 41°19'25,70" Oeste (Figura 9).

Figura 9. Posicionamento da casa de vegetação do Projeto Capivara no Instituto Federal Fluminense *campus* Campos Guarus



Fonte: Google Maps (2018)

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

A caixa d'água com capacidade de 100 litros ficou a uma altura de, aproximadamente, cinco metros, e a casa de vegetação tem uma área de 18 m², onde se cultivam mudas de espécies nativas da bacia hidrográfica do baixo rio Paraíba do Sul, como: *Schinus terebinthifolius* (Aroeira-vermelha), *Sapindus saponaria* (Saboneteiro), *Mimosa bimucronata* (Maricá), *Psidium catleianum* (Araçá), entre outras. O plantio das mudas dispensa insumos químicos em sua produção, já que se utiliza composto orgânico para enriquecimento do substrato. Esse viveiro tem a capacidade de produzir 5.000 mudas por semestre (SILVA *et al.*, 2017).

3.2 Métodos

O trabalho em questão consiste em uma pesquisa de campo tipo experimental, pois tem o objetivo de avaliar a eficiência da aplicação de ESFV para sistemas de bombeamento de água para irrigação de casas de vegetação.

Os procedimentos experimentais realizados nesta pesquisa tiveram como referência o trabalho de Nunes, Pinho e Mendes (2014). Esse trabalho objetivou o desenvolvimento de um sistema de irrigação alimentado por ESFV para aplicar em olericultura na então Unidade de Pesquisa Agroambiental (UPEA) do Instituto Federal Fluminense, que atualmente denomina-se Polo de Inovação Campos dos Goytacazes (PICG).

Dessa forma, este trabalho foi dividido em quatro etapas: dimensionamento do sistema de bombeamento (motobomba e MFV), montagem do sistema eletro-hidráulico, monitoramento das grandezas físicas e elétricas e cálculo de rendimento do sistema.

3.2.1 Dimensionamento

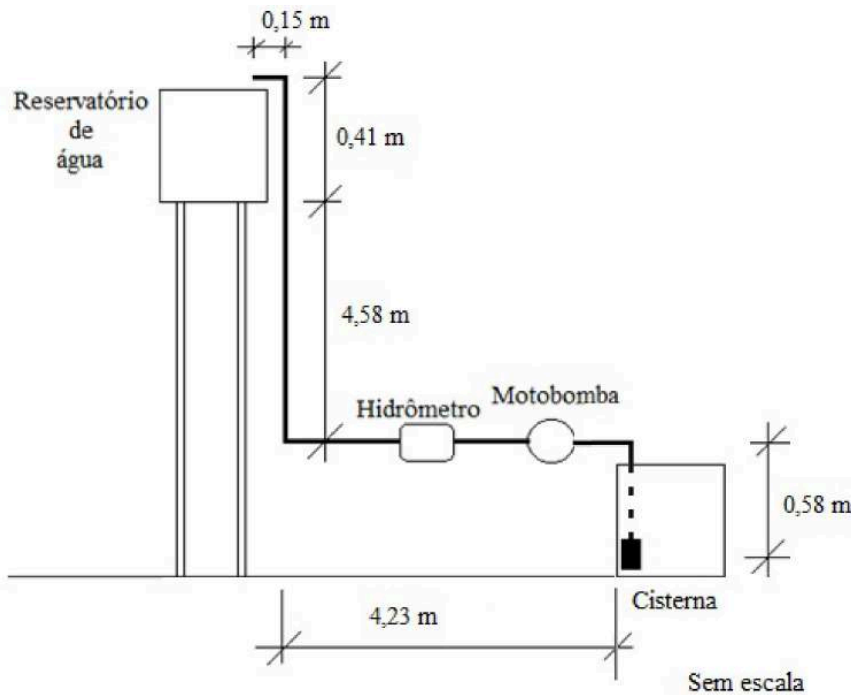
Nessa etapa houve o dimensionamento da motobomba, do MFV para alimentação elétrica do motor de C.C. da referida bomba d'água, dos condutores elétricos, do dispositivo de proteção elétrica (fusível) e do dispositivo de controle de nível (chave de nível tipo boia).

A motobomba operou captando água de uma cisterna e abasteceu diariamente um reservatório de 100 litros. A distância existente entre o ponto de captação da bomba até o reservatório é dada pela Figura 10.

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

Figura 10. Distâncias entre o ponto de captação de água e o reservatório



Fonte: Elaboração própria

De acordo com os dados referentes às distâncias contidas na Figura 10, a Equação 1 indica o Recalque solicitado pela bomba, em metros. Vale ressaltar que nesse cálculo foram desconsideradas as perdas de carga (TECHNOSOL, 2017; SOLAR BRASIL, 2017).

$$\text{Recalque} = A + \left(\frac{B}{15}\right)C + D \quad (1)$$

Sendo,

Recalque – distância existente entre o ponto de captação e o reservatório, em metros;

A – profundidade da cisterna, em m;

B – distância linear da cisterna até o reservatório, em m;

C – desnível entre a cisterna e a base do reservatório, em m;

D – altura do reservatório, em m.

A partir da distância de Recalque requerida pela motobomba, foi escolhido o modelo da mesma para a referida aplicação, conforme tabela de seleção mostrada no *website* da empresa Solar Brasil (<http://www.solarbrasil.com.br/produtos/60-bombas-d-agua>).

Após realizada a seleção da motobomba e conhecendo as características elétricas do motor de C.C. (tensão, corrente e potência elétricas nominais e consumo diário de energia elétrica), foi dimensionado o MFV.

A irradiância solar (G) incidente na área do MFV é definida pela Equação 2 (VILLALVA, 2015).

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

$$G = \frac{E_s}{t} \quad (2)$$

Em que,

 G – irradiância solar incidente no módulo, em $W.m^{-2}$; E_s – irradiação solar no plano inclinado do mês de menor incidência solar do local, em $Wh.m^{-2}$; t – tempo em que a irradiação solar incide no MFV, em horas.

Os dados de irradiação solar local foram retirados do *website* do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB)⁴¹.

Para a escolha da potência do MFV, em W_p , o cálculo pode ser obtido mediante a Equação 3 (REIS, 2011).

$$P_{MPV} = G \times A \times \eta \quad (3)$$

Onde,

 P_{MFV} – potência elétrica do MFV em função do tempo, em W_p ; G – irradiância solar incidente no módulo, em $W.m^{-2}$; A – área do MFV, em m^2 ; η – rendimento do MFV a ser escolhido, dado em %.

Para estimar a energia elétrica produzida pelo módulo em questão, foi utilizado o método de Máxima Corrente do Módulo, conforme a Equação 4, pois esse método considera a impossibilidade do aproveitamento máximo da energia solar incidente e é aplicado em sistemas fotovoltaicos não equipados com recursos de MPPT. Nesse método, obtêm-se as características do módulo na sua folha de dados, podendo ser usadas as características em STC (*Standard Test Conditions* - condições padrão de teste) ou NOCT (*Normal Operation Cell Temperature* - temperatura normal de operação da célula), sendo as condições em NOCT mais apropriadas devido as características reais de operação (VILLALVA, 2015).

$$E_p = (I_{SC} \times V_{SISTEMA}) \times HS \quad (4)$$

Onde,

 E_p – energia produzida pelo módulo diariamente, em Wh ; I_{SC} – corrente de curto-circuito do módulo em condição NOCT, em Ampère (A); $V_{SISTEMA}$ – tensão do sistema, em Volts (V); HS – horas diárias de insolação, em horas (h), obtida a partir do mapa de média anual de insolação diária no Brasil disponível no Atlas Solarimétrico Brasileiro (CRESESB, 2000).

O dimensionamento dos condutores elétricos presentes no circuito do sistema de bombeamento atendeu a Norma NBR 5410/2008, sendo esse realizado por meio de dois condutores “carregados” em C.C. e tipo flexível com isolamento em PVC para 750V (suportam temperatura máxima para serviço contínuo de 70 °C, temperatura de sobrecarga de 100 °C

⁴ Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php#_data

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

e temperatura limite de curto-circuito de 160 °C), conforme seção 6.2.5.2.1 (Tabela 35 – Temperaturas características dos condutores). Foi considerado o método de instalação dos condutores do tipo F da seção 6.2.5.1.2 (métodos de instalação) e a corrente nominal desses condutores deve obedecer também à seção 6.2.5.2.3 (Tabela 38 – Capacidades de condução de corrente, em ampères, para os métodos de referência E, F e G) e, por fim, suportar, no mínimo, a corrente nominal do motor de C.C. (ABNT, 2008a).

Vale destacar que o dimensionamento dos condutores não considerou o cálculo de queda de tensão admissível porque a distância entre o MFV e o motor de C.C. foi inferior a dez metros.

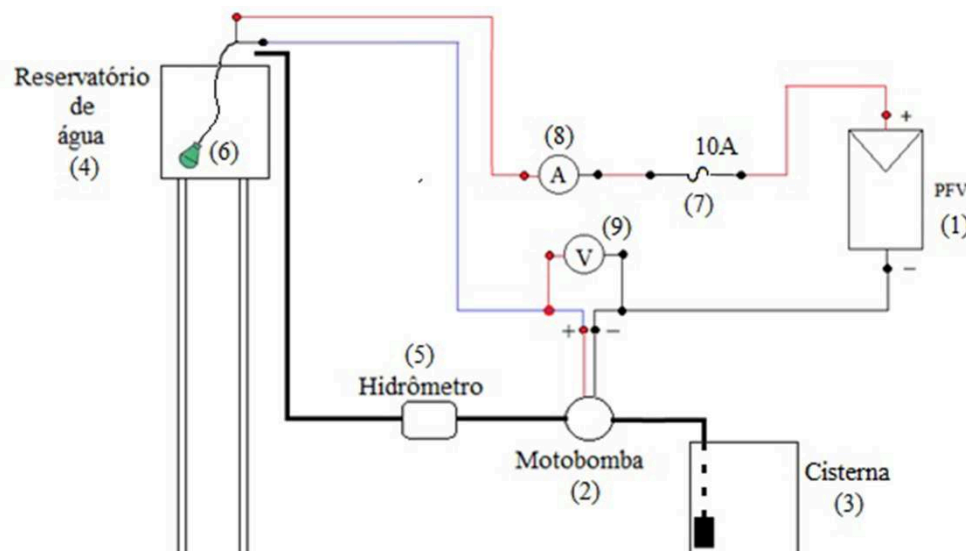
A chave de nível foi escolhida em função do tipo de reservatório a ser controlado, neste caso a chave de nível para controle do reservatório superior. A sua capacidade de corrente elétrica foi dimensionada de acordo com o valor da corrente elétrica do circuito da bomba d'água.

3.2.2 Montagem

Nesta etapa foi realizada a montagem do sistema elétrico-hidráulico do trabalho. Ela se deu mediante as interligações elétricas entre o MFV (instalado em local ausente de sombreamento), motor de C.C. da motobomba (instalado próximo à cisterna), quadro de proteção e comando e sensor de nível do reservatório. Além disso, nessa etapa foram executadas as conexões do sistema hidráulico (válvula de retenção na cisterna, motobomba, hidrômetro, reservatório superior e inferior de água), sendo toda a instalação realizada por tubulações com diâmetro de 1/2".

A montagem proposta para interligação do sistema elétrico-hidráulico do trabalho pode ser observada na Figura 11.

Figura 11. Montagem proposta para o sistema elétrico-hidráulico



Fonte: Elaboração própria

A Figura 11 mostra um esquema geral do experimento, em que o MFV (1) converte a radiação solar incidente no mesmo em energia elétrica, a qual alimenta diretamente o motor da bomba d'água (2), que converte a energia elétrica em energia mecânica. Essa energia mecânica faz o acionamento da bomba acoplada ao motor e, assim, capta a água da cisterna

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

(3) e abastece o reservatório superior de 100 litros (4). Mediante isso, a água é armazenada na forma de energia potencial para posterior utilização na casa de vegetação. Além disso, o sistema hidráulico conta com um hidrômetro (5), que mede o volume de água, em m³, elevada para o reservatório superior.

O sistema elétrico conta com um sistema de controle automático de nível, proteção elétrica e medição. O controle automático de nível foi realizado por uma chave de nível tipo boia flutuante (6) que tem o objetivo de evitar o transbordamento de água no reservatório, isto é, quando o mesmo estiver cheio o motor de C.C. é desligado. A proteção do circuito elétrico ficou restrita ao fusível de vidro de 10 A (7), que possibilita a proteção desse sistema contra curto-circuito. Por fim, o monitoramento das grandezas elétricas foi realizado por dois multímetros digitais, sendo um para medição de corrente elétrica (8) e outro para medição de tensão elétrica (9), com a finalidade de verificar o comportamento elétrico da bomba.

Um fator importante para montagem do sistema é o adequado posicionamento do MFV para que ele obtenha um bom aproveitamento da radiação incidente do local. Para isso, o módulo foi orientado para o norte geográfico, em local sem sombreamento e instalado numa angulação ótima de acordo com a latitude do local conforme a Equação 5 (BALFOUR; SHAW; NASH, 2016; VILLALVA, 2015).

$$\alpha = \text{lat.} + \left(\frac{\text{lat.}}{4}\right) \quad (5)$$

Onde,

α = Ângulo de inclinação do MFV, em graus;

Lat. = Latitude do local em que o módulo será instalado, em graus.

De acordo com a Equação 6, o posicionamento do módulo no ângulo calculado foi obtido mediante o inclinômetro digital modelo 272.300 da marca Digimess.

3.2.3 Coleta de dados

Na etapa de monitoramento foram registradas as grandezas radiação solar incidente no MFV e volume de água bombeada da cisterna utilizadas para determinação do rendimento do sistema.

A grandeza física radiação solar foi obtida a partir da estação meteorológica automática no *website* do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)⁵. Essa estação é identificada por Campos dos Goytacazes A-607 e está situada nas coordenadas geográficas com latitude de -21,71° e longitude de -41,34° (INMET, 2017), ou seja, está a aproximadamente três quilômetros de distância do experimento proposto neste trabalho.

A radiação solar mostrada pela estação automática está referenciada pelo Tempo Coordenado Universal, assim houve uma correção da hora UTC para ajustar com o horário de Brasília (hora UTC menos três horas).

Além disso, foi necessária a conversão de unidades referente à radiação solar informada pelo INMET, pois a mesma é dada em kJ.m⁻² e para o cálculo de rendimento proposto para o sistema de bombeamento por ESFV foi utilizado a unidade em kWh.m⁻², sendo assim os valores de radiação solar informados pelo INMET foram multiplicados por 2,78x10⁻⁴.

⁵ Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/esta-coesAutomaticas>

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

Por fim, a radiação solar disponibilizada pelo INMET é disposta no plano horizontal, sendo necessária a correção para o ângulo de inclinação calculado para o MFV do experimento (Equação 5) e a latitude do local de instalação do módulo por meio da tabela de fator de correção por inclinação desenvolvida por Perez *et al.* (1987) e Perez *et al.* (1986).

A outra grandeza física monitorada foi o volume de água bombeada da cisterna, para isso foi utilizado um hidrômetro analógico tipo residencial. Esse hidrômetro foi instalado na saída da motobomba e registrou o volume de água bombeada para o reservatório em metros cúbico (m³) e, conseqüentemente, foi calculada a vazão (m³/minuto) para posterior cálculo de rendimento.

A temperatura ambiente também foi monitorada com a finalidade de correlacionar essa grandeza com as demais grandezas físicas. Assim como a radiação solar, a temperatura foi obtida a partir da estação meteorológica automática no *website* do INMET, nas mesmas coordenadas geográficas.

As grandezas elétricas foram monitoradas por meio de dois multímetros digitais (modelo 2082C da marca Minipa) em que um mediu a tensão elétrica aplicada ao motor de C.C., e outro mediu a corrente elétrica solicitada pelo mesmo motor.

A partir destes dados de tensão e corrente elétricas do motor, foi realizado o cálculo da potência, em Watt (W), conforme a Equação 6.

$$P = I \times \Delta V \quad (6)$$

Onde,

P – potência elétrica, em Watt (W);

I – corrente elétrica, em Ampère (A);

ΔV – diferença de potencial, em Volts (V).

Vale ressaltar que nesse cálculo foram desconsideradas as perdas (térmicas, atrito, dispersão do campo magnético, etc.) do motor.

O monitoramento dessas grandezas elétricas teve como objetivo observar se a potência elétrica demandada pela bomba e, conseqüentemente, a energia elétrica estavam dentro dos parâmetros do MFV.

Ressalta-se que grandezas físicas e elétricas foram monitoradas por um período de 29 dias, sendo essas medições realizadas diariamente, exceto aos finais de semana e feriados, de acordo com a necessidade de abastecimento do reservatório superior para bombeamento da casa de vegetação do Projeto Capivara. Durante o funcionamento do sistema houve medições em intervalos de no mínimo cinco minutos com intuito de calcular a média diária das grandezas medidas.

3.2.4 Cálculo do rendimento do sistema

Conceitualmente, o rendimento (η) de qualquer sistema é razão entre a energia de saída (E_s) pela energia de entrada (E_e), sendo o resultado dado em percentual, conforme a Equação 7.

$$\eta = \frac{E_s}{E_e} \times 100 \quad (7)$$

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

Para o cálculo geral de rendimento (η) do sistema de bombeamento de água utilizou-se a equação de rendimento do trabalho de Senol (2012). Tal rendimento é descrito pela Equação 8.

$$\eta = \frac{\rho \times g \times h \times Q}{A_{\text{MFV}} \times G_{\text{MFV}}} \times 100 \quad (8)$$

Em que,

ρ – densidade específica da água à 25 °C, em m³/dia;

g – aceleração da gravidade, em m/s²;

h – altura total de bombeamento, em m;

Q – vazão diária requerida pela bomba, em m³/min.;

A_{MFV} – área do MFV, em m²;

G_{MFV} – irradiação solar incidente no MFV na inclinação ideal, em kWh.m⁻².

Portanto, o numerador da Equação 8 refere-se à energia hidráulica do sistema e o denominador à energia solar incidente no MFV em uma dada posição geográfica e inclinação.

3.2.5 Análise estatística

Os dados brutos coletados foram inseridos em planilha eletrônica para cálculos de média das grandezas. Para análise estatística, utilizou-se a Análise de Regressão e a Análise de Variância (ANOVA) através do *software* BioEstat, versão 5.3, a fim de correlacionar irradiação solar incidente no MFV, temperatura ambiente, volume de água bombeada para o reservatório superior e rendimento do sistema, além de verificar se as variáveis independentes (irradiação e temperatura) influenciam significativamente na variação das variáveis dependentes (vazão e rendimento). Para isso, foi utilizado um nível de significância de 5% para o teste F.

4 Resultados

4.1 Dimensionamento do sistema

4.1.1 Motobomba

De acordo com a Equação 1 o recalque foi de aproximadamente 5,86 m. Para esse valor de recalque a motobomba utilizada foi a SHURflo, modelo 8000-443-136 (existente na instituição), que atendeu a necessidade do experimento, pois ela é uma bomba de deslocamento positivo capaz de, nessa condição, elevar 490 l/h com uma corrente elétrica de 2,9 A e sob tensão de 12 V.

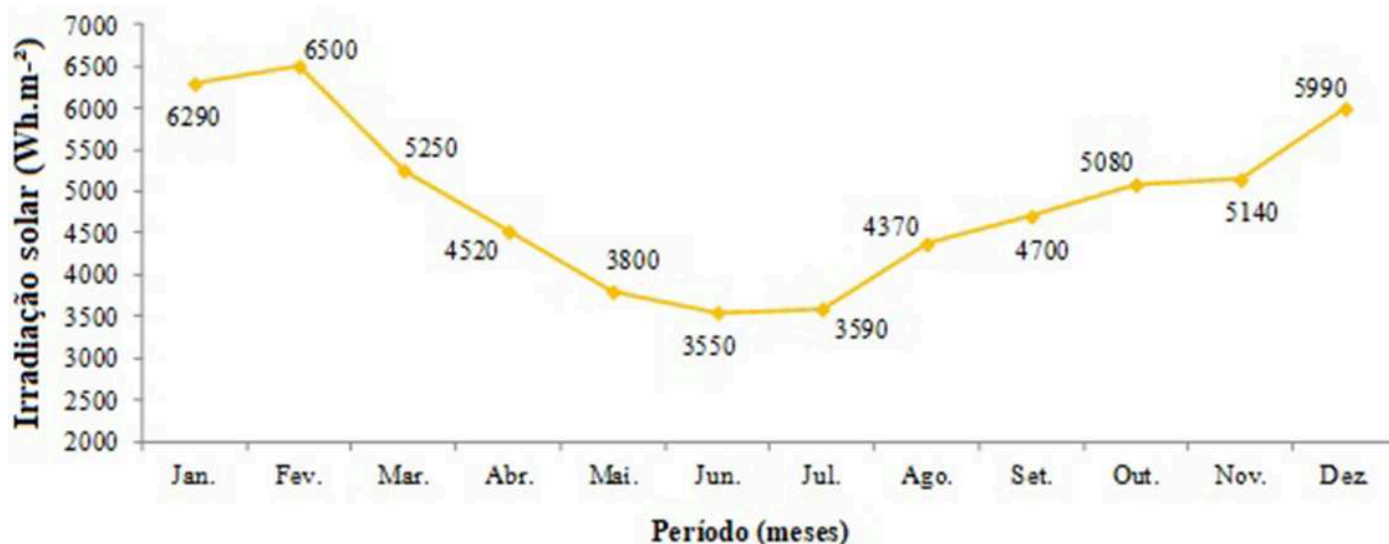
4.1.2 Módulo fotovoltaico

De acordo com as coordenadas geográficas do local do experimento, a irradiação solar no plano horizontal, em Wh.m⁻², é mostrada na Figura 12.

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

Figura 12. Gráfico de irradiação solar no plano horizontal, em Wh.m^{-2} , na latitude de $21^{\circ}44'$ e longitude de $41^{\circ}19'$



Fonte: Adaptado do CRESESB (2018)

Como o sistema de bombeamento de água é um sistema isolado, utilizou-se o menor valor de irradiação solar local no plano horizontal (3.550 Wh.m^{-2}) (VILLALVA, 2015). Em seguida, o valor de irradiação solar foi corrigido pelo fator médio de inclinação 1,04 para um ângulo de 25° (ângulo mais próximo a 26° obtido a partir da Equação 5), segundo a tabela de correção por inclinação de Perez *et al.* (1986) e Perez *et al.* (1987).

Conforme a Equação 3, a potência ideal calculada do MFV foi de $50,17 \text{ W}_p$, ou seja, um MFV de 90 W_p (valor comercial). Entretanto, o recalque solicitou uma corrente no motor C.C. da motobomba de 2,9 A. Dessa maneira, foram associados, em paralelo, dois módulos de 35 W_p existentes na instituição de ensino, totalizando 70 W_p . A Tabela 1 resume as especificações técnicas dos módulos fotovoltaicos empregados.

Tabela 1. Especificação técnica do MFV

Especificação técnica	Parâmetro elétrico
Potência máxima ($P_{\text{máx}}$)	35 W
Tensão de potência máxima ($V_{\text{pmáx}}$)	15 V
Corrente de potência máxima ($I_{\text{pmáx}}$)	2,33 A
Corrente curto-circuito (I_{sc})	2,35 A
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	18,8 V
Tecnologia das células	Policristalino

Fonte: SunLab Power (2017)

Por fim, os MFVs foram instalados com um ângulo de inclinação de 26° de acordo com a Equação 5, orientados para o norte geográfico e em local sem sombreamento.

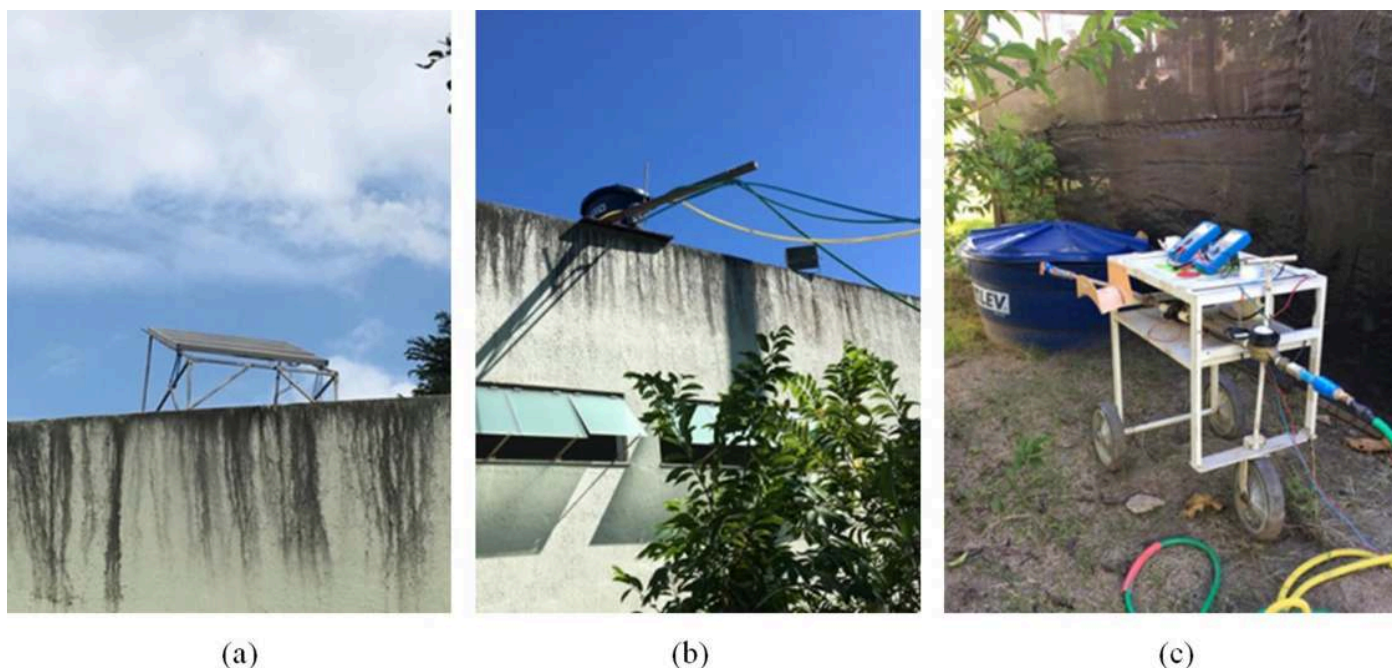
Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

4.2 Montagem do sistema proposto

A montagem do sistema elétrico-hidráulico foi realizada conforme o método empregado. Sendo que os módulos e o reservatório superior foram instalados no telhado de um dos prédios da instituição (Bloco D) e a motobomba, juntamente com a cisterna, foram instaladas no solo ao lado do viveiro de mudas, conforme as Figuras 13a, 13b e 13c.

Figuras 13a, 13b e 13c. Localização dos MFVs (a) e do reservatório superior (b). Sistema elétrico-hidráulico de bombeamento (c)



Fonte: Elaboração própria

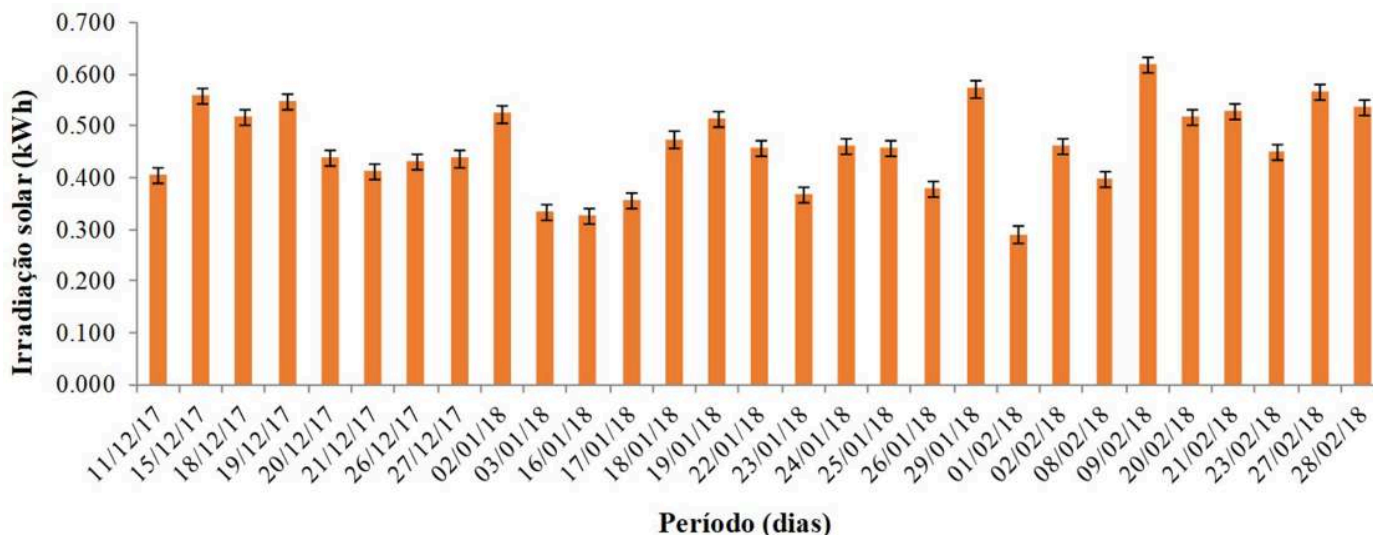
4.3 Medições das grandezas físicas e elétricas do sistema

Os dados de irradiação solar obtidos a partir do INMET no período do experimento estão demonstrados na Figura 14.

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

Figura 14. Gráfico de irradiação solar diária, em kWh



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do INMET (2017)

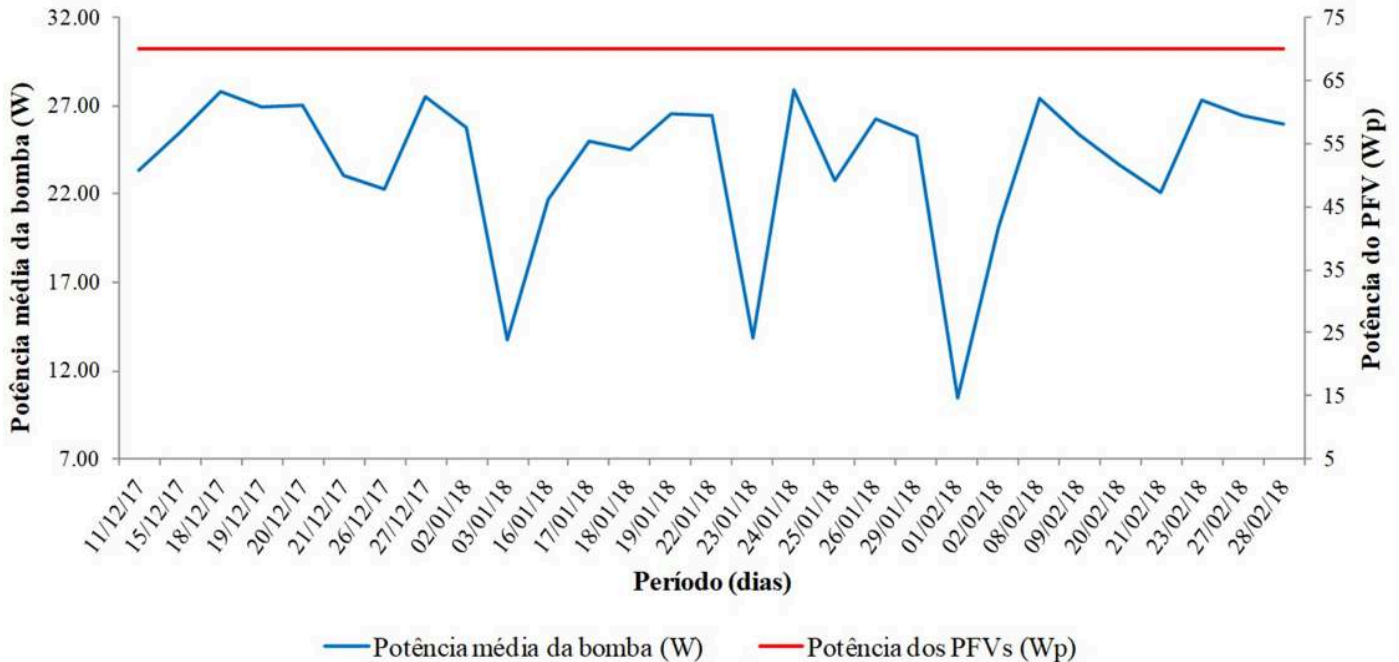
Observa-se que a irradiação variou de 0,2916 kWh a 0,6211 kWh no período analisado, com média de 0,4612 kWh e desvio padrão de 0,08 kWh. O dia de máxima e mínima irradiação foi, respectivamente, 9 de fevereiro de 2018 e 1 de fevereiro de 2018.

Esses dados de irradiação foram obtidos no período de dezembro a fevereiro, correspondendo a estação chuvosa de acordo com o clima característico do local de estudo. Entretanto, a irradiação incidente nos módulos fotovoltaicos foi suficiente para atender a demanda da motobomba no recalque estipulado, uma vez que esse recalque nominal demanda uma corrente de 2,9 A com tensão de 12 V. A Figura 15 mostra que o gráfico de potência média diária da bomba não ultrapassou a potência máxima dos módulos durante o experimento.

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

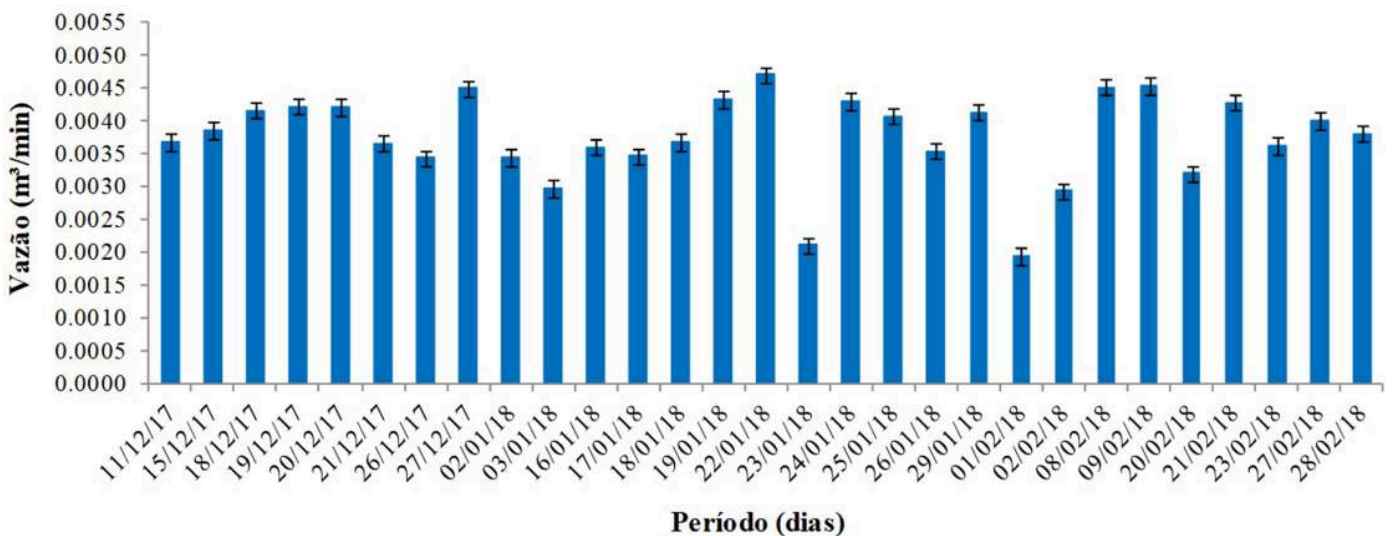
Figura 15. Gráfico de potência média diária da bomba (W) e potência nominal dos MFVs (W_p)



Fonte: Elaboração própria

Nas condições de irradiação solar a que o sistema foi exposto no experimento, a motobomba alcançou uma vazão média de 0,0038 m³/min. com desvio padrão de 0,001 m³/min., sendo que o valor máximo de vazão foi obtido no dia 22 de janeiro de 2018 (0,0047 m³/min.) e o valor mínimo no dia 1 de fevereiro de 2018 (0,0019 m³/min.), conforme a Figura 16.

Figura 16. Gráfico de vazão diária de bombeamento, em m³/min



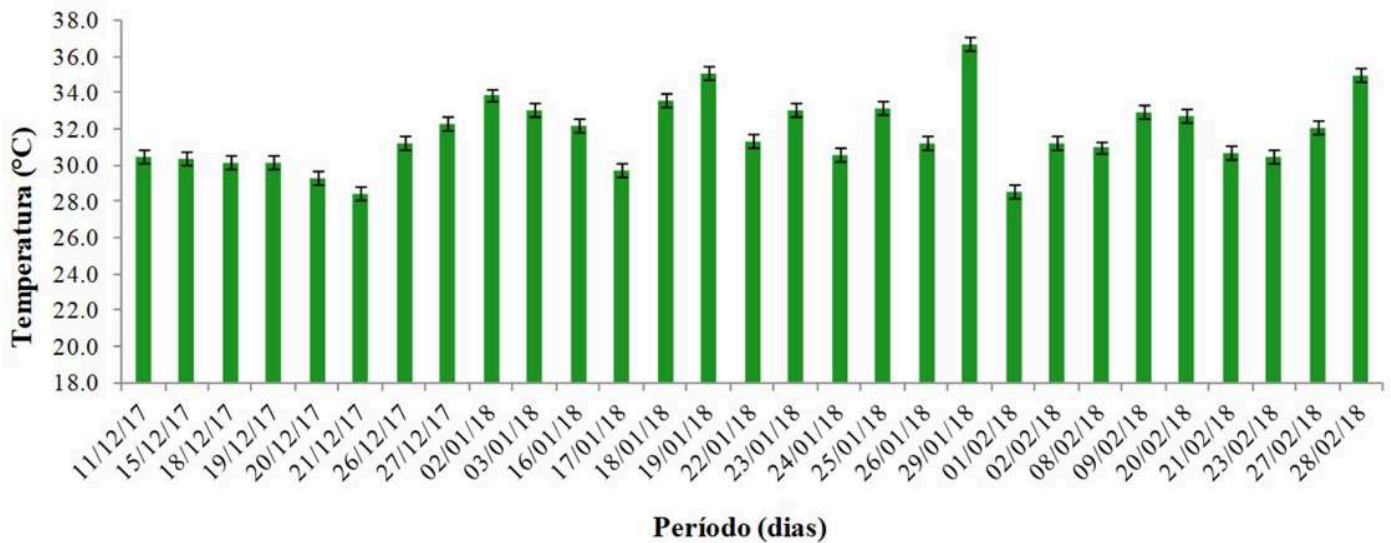
Fonte: Elaboração própria

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

Em relação à grandeza física temperatura ambiente, os dados foram coletados diariamente do INMET durante o período do experimento, sendo esses valores referentes ao período de funcionamento da motobomba. A temperatura média foi de 31,8 °C, com desvio padrão de 1,96 °C. O dia 29 de janeiro de 2018 foi o que apresentou maior temperatura (36,7 °C) e o dia 21 de dezembro de 2017 menor temperatura (28,5 °C) no período analisado, como mostra a Figura 17.

Figura 17. Gráfico de temperatura ambiente do período do experimento, em °C



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do INMET (2017)

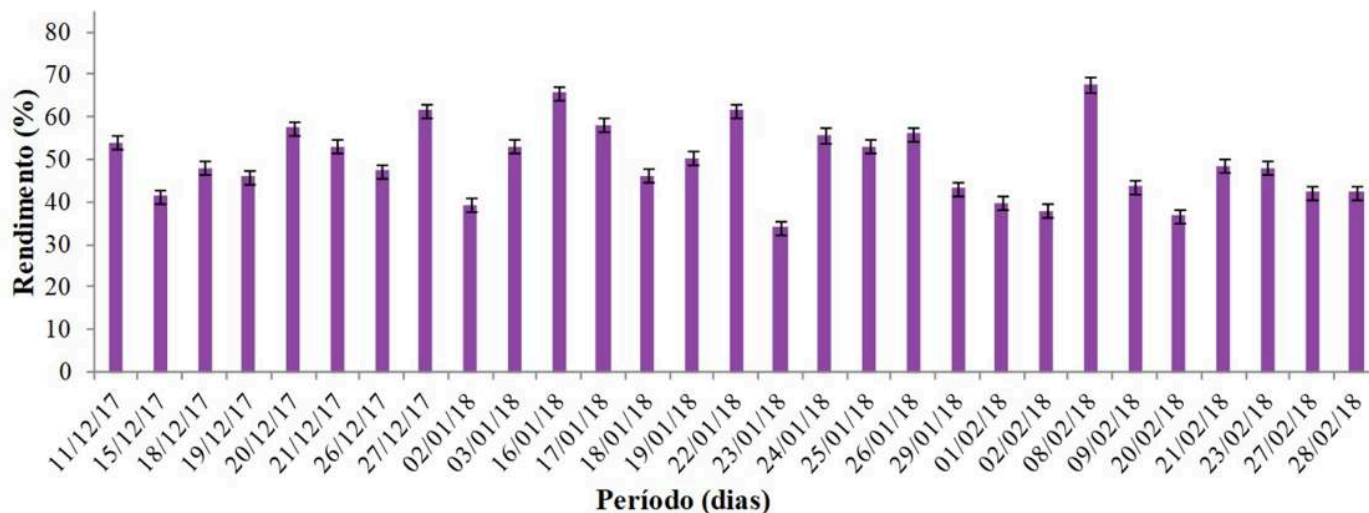
4.4 Rendimento do sistema proposto

Após o monitoramento das grandezas físicas vazão e irradiação solar, foram obtidos os valores de rendimentos diários do sistema, em percentual, a partir da Equação 8 e descritos na Figura 18.

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

Figura 18. Gráfico de rendimento do sistema fotovoltaico de bombeamento, em %



Fonte: Elaboração própria

Nota-se que o sistema fotovoltaico de bombeamento de água obteve um rendimento entre 34,14% a 67,66% no período mencionado, com média de 49,41% e desvio padrão de 8,78%. O dia 8 de fevereiro de 2018 foi o que apresentou maior rendimento, em contrapartida com 23 de janeiro de 2018 com menor rendimento.

Michels *et al.* (2009) analisaram um sistema de bombeamento de água para uma altura de 20 metros, alimentado por dois módulos fotovoltaicos (112 Wp), instalados nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná na cidade de Medianeira. Segundo o método empregado, eles observaram que o sistema apresentou eficiência máxima de 9,58% no solstício de inverno com bombeamento diário de 2.056 litros e no solstício de verão obteve eficiência mínima de 8,57% com volume diário de 2.377 litros.

Nesse trabalho citado, Michels e colaboradores (2009) não consideraram a irradiação solar incidente no MFV na inclinação ideal. Por outro lado, eles realizaram maior coleta de dados durante o experimento.

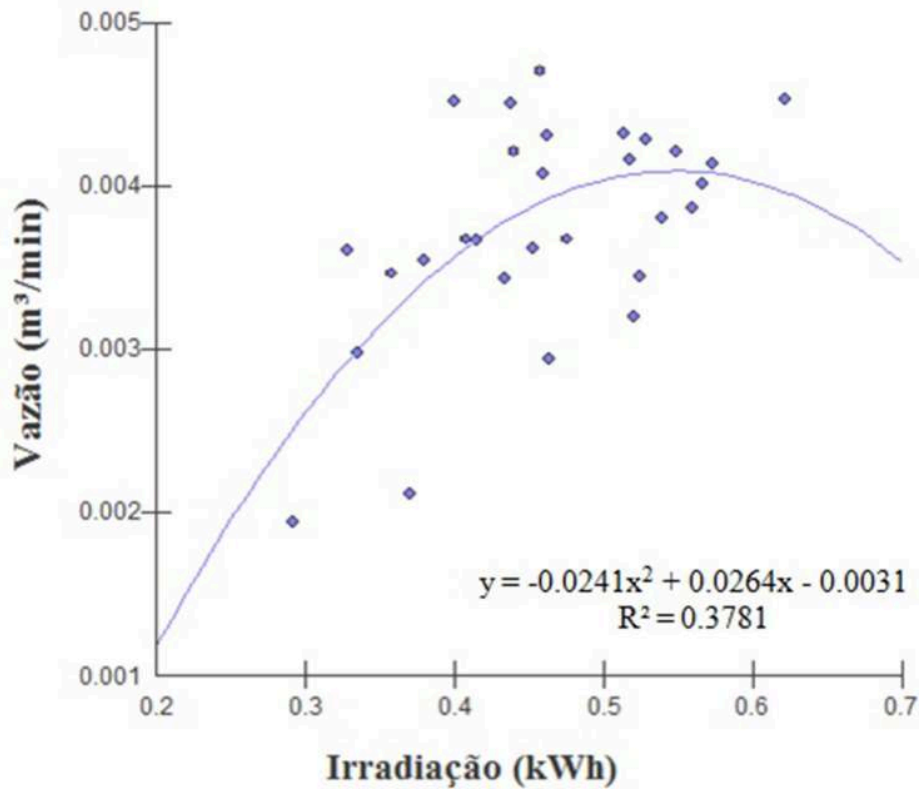
Então, a diferença entre os rendimentos encontrados por Michels e colaboradores (2009) e o apresentado neste trabalho pode estar relacionada com a altura e a irradiação solar incidente em latitudes diferentes.

A fim de verificar a existência de uma relação funcional entre as variáveis irradiação solar e temperatura com as variáveis vazão e rendimento aplicou-se como método estatístico a Análise de Regressão. A Figura 19 mostra a relação da irradiação solar (kWh) com a vazão (m³/min.) no período analisado.

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

Figura 19. Diagrama de dispersão dos dados de Irradiação e Vazão coletados



Fonte: Elaboração própria

A equação que melhor representou o comportamento da variável dependente vazão em função da variável independente irradiação solar foi a polinomial quadrática, apresentando um coeficiente de determinação (R^2) de 0,3781 (Figura 19). A irradiação solar exerceu influência significativa na vazão ($p = 0,0024$) a um nível de 5% de significância do teste F, ou seja, a probabilidade de erro ficou menor que 0,05 (LARSON; FARBER, 2006). O ponto de vazão máxima foi obtido através do cálculo da derivada da equação de regressão, em que o valor ideal de irradiação é de 0,54772 kWh para a obtenção de 0,00413 m³/min., vazão máxima nesse experimento.

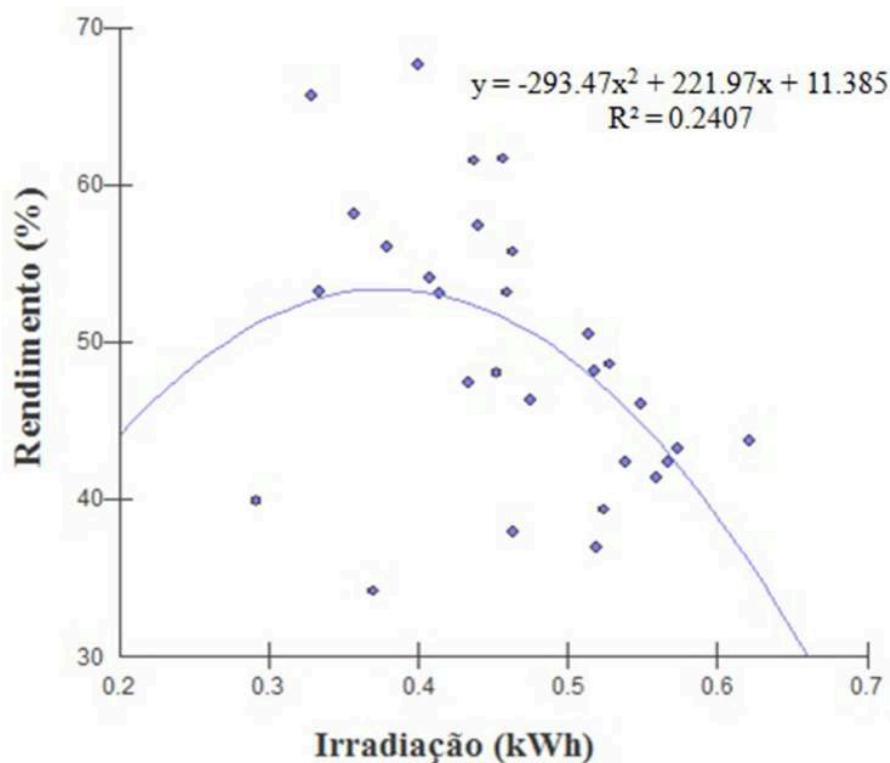
Esse comportamento das variáveis irradiação solar e vazão foi semelhante ao trabalho de Niedzialkoski *et al.* (2012), que inferiu que o volume de água bombeado pelo sistema fotovoltaico cresce à medida que os níveis de radiação aumentam, assim como Kolling *et al.* (2004) concluíram que a vazão fornecida pela motobomba está diretamente relacionada à radiação solar.

A relação entre irradiação solar (kWh) e rendimento (%) do sistema pode ser observada na Figura 20.

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

Figura 20. Diagrama de dispersão dos dados de Irradiação Solar e Rendimento



Fonte: Elaboração própria

A equação polinomial quadrática foi a que mais se aproximou do conjunto de pontos representados no diagrama de dispersão, mostrando a variação da variável dependente rendimento com a variação da variável independente irradiação solar. A equação apresentou um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,2407 (Figura 20), e a irradiação solar também exerceu influência significativa no rendimento ($p = 0,0272$) a um nível de 5% de significância do teste F, ou seja, a probabilidade de erro ficou menor que 0,05 (LARSON; FARBER, 2006). O valor ideal de irradiação solar, nesse experimento, para se obter o rendimento máximo (53,36%) é de 0,37818 kWh.

Kolling *et al.* (2004), em seu estudo, afirmam que o rendimento do sistema de bombeamento em relação à irradiação solar aumenta até certo ponto e depois diminui, o que pode ser observado na Figura 20. Isso se explica pelo fato de que a motobomba tem uma potência elétrica máxima e, conseqüentemente, uma máxima vazão, enquanto a irradiação solar não é limitada. Dessa forma, haverá um determinado ponto em que a energia hidráulica atingirá o seu limite mesmo com o aumento da irradiação solar, levando assim a diminuição do rendimento do sistema.

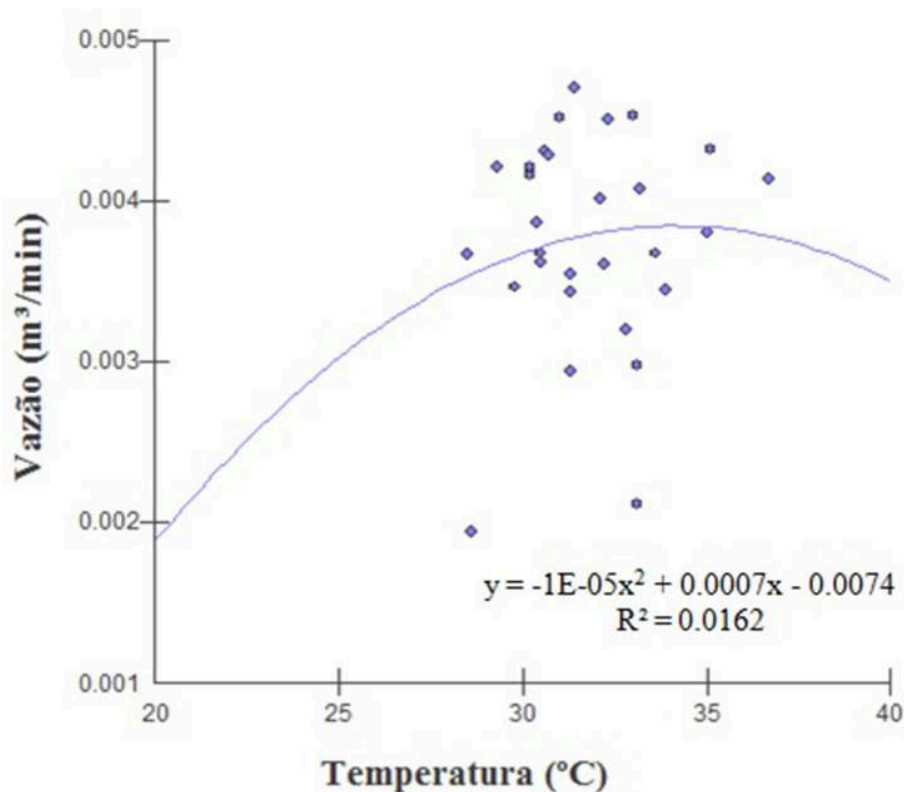
Estatisticamente, o valor de R^2 encontrado nas relações de irradiação *versus* vazão e irradiação *versus* rendimento foi baixo quando comparado ao experimento de Niedzialkoski *et al.* (2012). Os autores encontraram R^2 de 0,9743 na correlação de irradiação e vazão, enquanto este trabalho apresentou R^2 de 0,3781. Como os valores de irradiação desta pesquisa foram obtidos a partir de uma estação meteorológica, é possível que haja uma influência do sombreamento em função das nuvens no local onde o módulo foi instalado ou na própria estação, explicando assim o baixo valor de R^2 quando comparado ao trabalho citado, que realizou medições de irradiação *in loco*.

No que se refere a variável independente temperatura ($^{\circ}\text{C}$), a relação com as demais variáveis dependentes vazão ($\text{m}^3/\text{min.}$) e rendimento (%) pode ser observada nas Figuras 21 e 22.

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

Figuras 21. Diagrama de dispersão dos dados de Temperatura e Vazão



Fonte: Elaboração própria

Nota-se na Figura 21 que a equação polinomial quadrática apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,0162, onde há uma nuvem de dados mostrando a ausência de tendência na relação de temperatura e vazão. Por essa razão, não foi calculado o ponto de máxima vazão. Além disso, neste experimento a temperatura não apresentou relação significativa com a vazão ($p = 0,8083$) a um nível de 5% de significância do teste F, ou seja, a probabilidade de erro ficou maior que 0,05 (LARSON; FARBER, 2006).

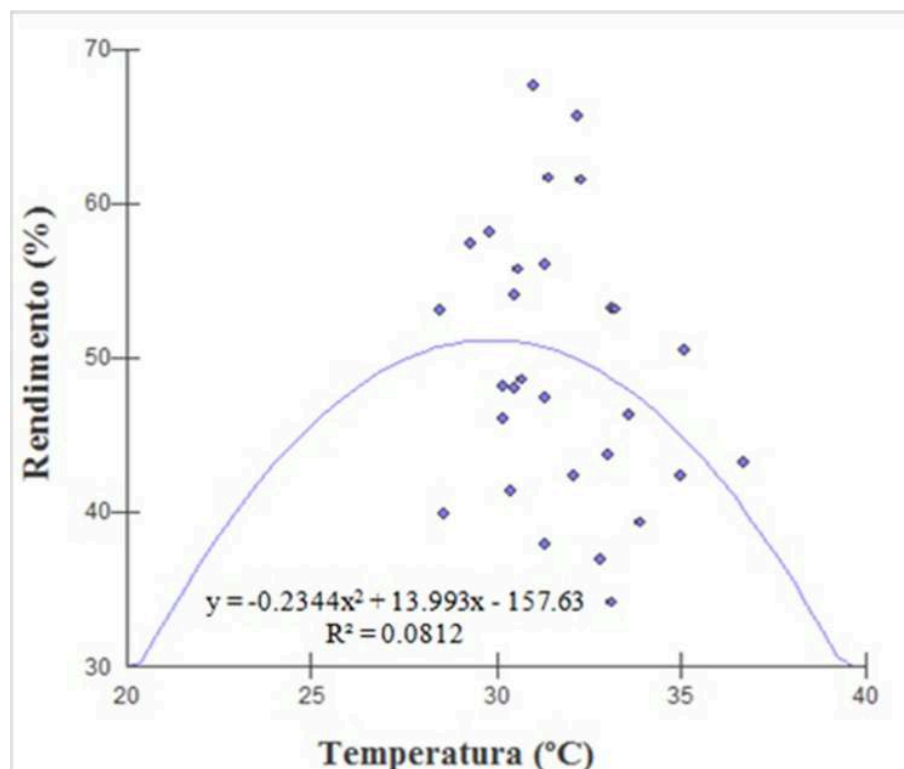
No entanto, no trabalho de Santos e Michels (2011) a vazão do sistema de bombeamento fotovoltaico instalado na região de Medianeira/PR foi influenciada pela variação da temperatura. Eles mostraram que o aumento da temperatura de 25 °C para 40 °C dos módulos fotovoltaicos reduziu, em média, a vazão do sistema em 4,234%. Dessa forma, o experimento proposto não validou o de tais autores. Então, observa-se a necessidade, para trabalhos futuros, de aumentar o período de coleta de dados para verificar se há um melhor ajuste da curva entre temperatura *versus* vazão.

O mesmo fenômeno observado na Figura 21 aconteceu na Figura 22. A equação polinomial quadrática apresentou um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,0812 e ausência de tendência na relação de temperatura e rendimento. As variáveis também não apresentaram relação significativa ($p = 0,3332$) a um nível de 5% de significância do teste F, ou seja, a probabilidade de erro ficou maior que 0,05 (LARSON; FARBER, 2006).

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

Figura 22. Diagrama de dispersão dos dados de Temperatura e Rendimento



Fonte: Elaboração própria

Todavia, segundo Pinho e Galdino (2014), o rendimento do módulo sofre influência direta da temperatura. Isto é, com o aumento da temperatura há uma diminuição na capacidade de geração de eletricidade do módulo e, conseqüentemente, diminuição no rendimento do sistema. Isso pode ser observado no trabalho de Michels *et al.* (2009), que constatou a maior eficiência do sistema fotovoltaico de bombeamento nos dias de inverno devido às menores temperaturas se comparadas aos dias de verão. Logo, a temperatura influenciou negativamente a eficiência do sistema no período do verão.

Dessa forma, faz-se necessária a ampliação do período de coleta de dados de temperatura *in loco* a fim de confirmar a relação dita pelos autores.

5 Considerações finais

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que o objetivo do trabalho foi alcançado. Foi possível determinar o rendimento do sistema fotovoltaico de bombeamento de água para o viveiro de mudas a partir do seu dimensionamento e implantação.

De acordo com a metodologia proposta, o sistema de bombeamento de água obteve um rendimento médio de 49,41%, atendendo a expectativa de irrigação das mudas da casa de vegetação.

No que concerne às grandezas monitoradas, verificou-se que há relação entre a irradiação solar e vazão, assim como entre a irradiação e o rendimento do sistema, ou seja, a irradiação solar influenciou diretamente no volume de água bombeado para o reservatório superior e na eficiência do sistema.

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

A grandeza temperatura não apresentou relação com as demais variáveis (vazão e rendimento), isto é, a temperatura não influenciou no volume de água bombeado e na eficiência do sistema, contrapondo a teoria de que variações na temperatura afetam a produção de eletricidade pelos módulos fotovoltaicos e, conseqüentemente, a eficiência do sistema. Dessa forma, os dados obtidos neste trabalho não foram conclusivos.

Vale ressaltar que esses sistemas fotovoltaicos de bombeamento podem ser implantados para diversas finalidades, como abastecimento de bebedouros para animais e agricultura familiar com irrigação de olericultura de baixo consumo de água, entre outras.

Sendo assim, como trabalhos futuros, faz-se necessário ampliar o período de coleta de dados de temperatura e irradiação solar e realizar tais medições *in loco* para melhor precisão dos dados obtidos. Além disso, sugere-se uma avaliação do rendimento do sistema de bombeamento utilizando outras tecnologias de módulos fotovoltaicos e também outras alturas de recalque.

Referências

- ALVARENGA, C. A. **Bombeamento de água com energia solar fotovoltaica**. Belo Horizonte: Solenerg Engenharia, 2017. Disponível em: <http://www.solenerg.com.br/files/Bombeamento-de-agua-com-energia%20solar-Solenerg-Engenharia.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 5410**. Instalações elétricas de baixa tensão. ABNT, 2008a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 11704**. Sistemas fotovoltaicos: Classificação. ABNT, 2008b.
- BALFOUR, J.; SHAW, M.; NASH, N. B. **Introdução ao projeto de sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 248 p.
- CAMPOS, M. S.; ALCANTARA, L. D. S. Sistema de bombeamento fotovoltaico para irrigação na agricultura familiar. **Brazilian Journal Animal Environmental Research**, v. 1, n. 1, p. 205-214. 2018.
- CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO. CRESESB. **Potencial solar SunData v 3.0**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>. Acesso em: 3 maio 2018.
- CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO CRESESB. **Energia Solar: Princípios e Aplicações**. 2006. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf. Acesso em: 4 ago. 2017.
- CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO CRESESB. **Sistema de Geração Fotovoltaica**. 2013. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=cse_sistema_fotovoltaico. Acesso em: 1 jun. 2017.

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2004. 206 p.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO CRESESB. **Atlas Solarimétrico do Brasil**: banco de dados solarimétricos. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111 p.

CHANDEL, S. S.; NAIK, M. N.; CHANDEL, R. Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 1084–1099, 2015.

COGEN. Associação da Indústria de Cogeração de Energia. **Inserção da Energia Solar no Brasil**: Relatório final. São Paulo, 2012.

DESCONZI, M. I. **Sistema fotovoltaico autônomo utilizando configuração multi-string e inversor multinível**. 2011. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, 2011.

FURTADO, L. D. G. C.; FURTADO, J. P. C.; MARTINEZ, C. B. Análise de sensibilidade para geração fotovoltaica distribuída em residências de Belo Horizonte. **Revista Pensar Administração**, Belo Horizonte, MG, v. 4, n. 1, 2015.

GAO, Z. *et al.* Progress on solar photovoltaic pumping irrigation technology. **Irrigation and Drainage**, v. 67, p. 89–96. 2018.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. 3. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012.

GOOGLE. **Google Maps**. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-21.7343872,-41.3241633,163m/data=!3m1!1e3?hl=pt-BR>. Acesso em: 3 maio 2018.

INSTITUTO DE ENERGIA DA PONTÍFICA UNIVERSIDADE CATÓLICA. IEPUC. **Atlas Rio Solar**. Rio de Janeiro: Ed. PUC-Rio, 2016. Disponível em: [http://www.atlasriosolar.com.br/assets/atlas-rio-solar-\(web\).pdf](http://www.atlasriosolar.com.br/assets/atlas-rio-solar-(web).pdf). Acesso em: 4 ago. 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. INMET. **Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>. Acesso em: 1 ago. 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. INMET. Online. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/>. Acesso em: 4 jul. 2017.

KOLLING, E. M. *et al.* Análise operacional de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v. 24, n. 3, p. 527-535, 2004.

LAMBERTS, R. *et al.* **Casa Eficiente**: Consumo e Geração de Energia. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010. v. 2, 78 p.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística Aplicada**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2006.

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

LOPES, R. J. C. **Efeito do sombreamento nos painéis fotovoltaicos**. 2013. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica) - Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.

McDONALD, A. E. *et al.* Future cost-competitive electricity systems and their impact on US CO₂ emissions. **Nature Climate Change**, v. 6, p. 526-531, 2016.

MÉJEAN, A. *et al.* The transition in energy demand sectors to limit global warming to 1.5 °C. **Energy Efficiency**, p. 1-22. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9682-0>.

MENDES, L. F. R. Considerações acerca da geração hidroelétrica fluminense a partir da crise hídrica do estado de São Paulo. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 8, n. 1, p. 35-49, 2014.

MENDONÇA, J. C. *et al.* Determinação do coeficiente cultural (Kc) do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em Campos dos Goytacazes, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 5, p. 471-475. 2007.

MICHELS, R. N. *et al.* Avaliação do bombeamento de água em um sistema alimentado por painéis fotovoltaicos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 3, p. 370-379. 2009.

MINEMOTO, T.; NAGAE, S.; TAKAKURA, H. Impact of spectral irradiance distribution and temperature on the outdoor performance of amorphous Si photovoltaic modules. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 91, p. 919-923, 2007.

MORALES, L. R. V. **Sistemas fotovoltaicos de bombeamento com conversores de frequência e motobombas de fabricação nacional: avaliação e orientações para sua implantação**. 2016. 143 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, 2016.

MORALES, L. R. V. **A utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação em pequenas propriedades rurais**. 2011. 154 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, 2011.

NIEDZIALKOSKI, R. K. *et al.* Avaliação de um sistema fotovoltaico utilizado para o bombeamento de água em Cascavel/PR. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 1, n. 3, p. 44-49, 2012.

NOGUEIRA, C. U. **Utilização de sistemas solar e eólico no bombeamento de água para uso na irrigação**. 2009. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, 2009.

NUNES, A. F.; PINHO, Y. K. R.; MENDES, L. F. R. Energia solar fotovoltaica aplicada a sistema de irrigação em olericultura. In: CONGRESSO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 1., 2014, Campos dos Goytacazes. **Anais eletrônicos** [...]. Campos dos Goytacazes: IFF campus Guarus, 2014. Disponível em: <http://www.essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/conepe/article/view/6696>. Acesso em: 31 jul. 2017.

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

- PEREZ, R. *et al.* A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. **Solar Energy**, v. 39, n. 3, p. 221-231, 1987.
- PEREZ, R. *et al.* An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces: Description, performance validation, site dependency evaluation. **Solar Energy**, v. 36, n. 6, p. 481-497, 1986.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (org.). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2014. 530 p.
- RAHMAN, M. M.; HASANUZZAMAN, M.; RAHIM, N. A. Effects of operational conditions on the energy efficiency of photovoltaic modules operating in Malaysia. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 912-924, 2017.
- RATHORE, P. K. S.; DAS, S. S.; CHAUHAN, D. S. Perspectives of solar photovoltaic water pumping for irrigation in India. **Energy Strategy Reviews**, v. 22, p. 385-395, 2018.
- REIS, L. B. dos. **Geração de Energia Elétrica**. 2. ed. rev. e atual. Barueri, SP: Manole, 2011. 460 p.
- RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: LABSOLAR, 2004. 114 p.
- SANTOS, J. A. A.; MICHELS, R. N. Influência de fatores ambientais sobre o desempenho de um sistema de bombeamento fotovoltaico: um estudo de caso. **Revista Agrogeoambiental**, v. 3, n. 3, p. 51-55, 2011.
- SCHMIDT, J.; CANCELLA, R.; PEREIRA JÚNIOR, A. O. The role of wind power and solar PV in reducing risks in the Brazilian hydro-thermal power system. **Energy**, v. 115, n. 3, p. 1748-1757, 2016.
- SECUNDES, U. U. **Procedimentos e normativas para instalação de centrais fotovoltaicas conectadas à rede elétrica em média tensão**. 2015. 139 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, 2015.
- SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital**. 2009. 206 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- SENL, R. An analysis of solar energy and irrigation systems in Turkey. **Energy Policy**, v. 47, p. 478-486, 2012.
- SHINDE, V. B.; WANDRE, S. S. Solar photovoltaic water pumping system for irrigation: A review. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 22, p. 2267-2273, 2015.
- SILVA, A. L. *et al.* **Projeto Capivara em busca do equilíbrio ambiental**. Disponível em: <http://portal1.iff.edu.br/nossos-campi/campos-guarus/noticias/projeto-capivara-realiza-plantio-de-arvores/projeto-capivara.pdf/view>. Acesso em: 21 jul. 2017.

Análise de rendimento do sistema de bombeamento de água por energia solar fotovoltaica para irrigação de um viveiro de mudas

Helisa Moreira Peixoto Pereira, Luiz Fernando Rosa Mendes

SOLAR BRASIL. **Bomba d'água**. Disponível em: <http://www.solarbrasil.com.br/produtos/60-bombas-d-agua>. Acesso em: 31 jul. 2017.

SUN ENERGY. **Ângulo de incidência**. Disponível em: <http://www.sunenergy.eco.br/funcao.php?menu=funcionamento>. Acesso em: 4 ago. 2017.

SUNLAB POWER. **Painéis solares fotovoltaicos**. Disponível em: <http://www.sunlab.com.br>. Acesso em: 13 nov. 2017.

TECHNOSOL. **Sistemas de Bombeamento Através de Energia Solar**. Disponível em: <http://www.technosol.ind.br/shurflo/guiashurflo.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2017.

TIGGEMANN, H. **Sistema de monitoramento remoto e controle de microrrede híbrida isolada**. 2015. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2015.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf>. Acesso em: 4 maio 2017.

TORRES, F. T. P.; MACHADO, P. J. O. **Introdução à Climatologia**. Ubá: Geographica, 2008. 234 p.

VILLALVA, M. G. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações: sistemas isolados e conectados à rede**. 2. ed. rev. e atual. São Paulo: Érica, 2015. 224 p.

WANDERLEY, A. C. F. **Perspectivas de inserção da energia solar fotovoltaica na geração de energia elétrica no Rio Grande do Norte**. 2013. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio recebido do Instituto Federal Fluminense *Campus* Campos Guarus e do Projeto Capivara.