

Arrefecimento de Sistemas Fotovoltaicos para Verificação de Melhoria da Eficiência

Larisse M. O. Gomes*. Miguel L. Sousa Neto*
Helder B. C. Sales*. Marcos A. T. Lira*

*Universidade Federal do Piauí - UFPI
Centro de tecnologia

Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, Bairro Ininga - Teresina - PI - CEP: 64049-550
E-mails: larismoliveira@gmail.com, miguel@ufpi.edu.br, helder-brasil@outlook.com, marcoslira@ufpi.edu.br

Abstract: The performance of photovoltaic modules is highly affected by several factors such as shading, dirt, irradiation angle, intensity of sunlight, temperature, among others. Considering the natural heating in the modules throughout the day and the resulting loss of efficiency, the use of cooling techniques becomes a possibility with high potential. In this context, the main objective of this work was to develop a standard control and monitoring system for a photovoltaic power plant that allows cooling the modules using water, in order to increase the output power, efficiency and useful life through a remote channel. The Arduino Uno Microcontroller was used to implement a datalogger and monitoring system, obtaining an enhancement of approximately 10% in power generation.

Resumo: O desempenho de módulos fotovoltaicos é bastante afetado por diversos fatores como sombreamento, sujeiras, ângulo de irradiação, intensidade da luz solar, temperatura, entre outros. Considerando o natural aquecimento que os módulos sofrem ao longo do dia e as perdas de eficiência em decorrência disso, o uso de técnicas de arrefecimento torna-se uma possibilidade com bastante potencial. Nesse contexto, o objetivo principal deste trabalho foi de desenvolver um sistema de controle e monitoramento padrão para uma planta de energia fotovoltaica que permita o arrefecimento dos módulos utilizando água, visando aumentar a potência de saída, a eficiência e a vida útil através de um canal remoto. Utilizou-se o Microcontrolador Arduino Uno para a implementação de um sistema Datalogger e de monitoramento, obtendo-se um aumento de aproximadamente 10% na geração de energia.

Keywords: Photovoltaic modules; cooling; yield; efficiency; monitoring.

Palavras-chaves: Módulos fotovoltaicos; arrefecimento; rendimento; eficiência; monitoramento.

1. INTRODUÇÃO

A demanda por energia elétrica no mundo vem crescendo e, como consequência disso, ocasionou uma preocupação com o meio ambiente. A fim de suprir esse crescimento, há um aumento na geração de energia por meio de fontes renováveis. No Brasil, os índices de radiação solar apresentam um alto potencial para a utilização de energia solar fotovoltaica, que convertem parte da radiação incidente em energia elétrica. Um dos principais obstáculos na operação dos módulos fotovoltaicos é o superaquecimento dos módulos ao longo do dia. As células fotovoltaicas convertem a irradiação solar em energia elétrica, mas essa luz solar também provoca o superaquecimento dessas células, o que acarreta uma queda na eficiência dos módulos. As altas temperaturas e os elevados níveis de irradiação acometem, ainda, o tempo de vida útil dos módulos fotovoltaicos (Assunção, 2014). Contudo, esse problema pode ser reduzido com sistemas de arrefecimento, com os quais se pode refrigerar os módulos fotovoltaicos, proporcionando a diminuição de temperatura na superfície dos módulos e, consequentemente, aumentando o rendimento e a potência

gerada pelo sistema. Existem vários trabalhos na literatura que tratam de sistemas de arrefecimento para aumentar a produção de energia solar fotovoltaica. Essalimeh et al (2013) mostram a queda de eficiência em células fotovoltaicas usando um sistema híbrido fotovoltaico-eólico com várias cargas. São apresentadas diversas propostas de arrefecimento de módulos fotovoltaicos: usando ar (Kluth, 2008), água (Moharram et al, 2013; Bahaidarah et al, 2013), sistemas híbridos (Chaniotakis, 2001) e simulações computacionais (Catalin et al, 2015). Kluth (2008) usou dois protótipos de módulos fotovoltaicos: um desses módulos foi arrefecido borrifando-se água por um ventilador e o outro foi deixado sem arrefecimento. Concluiu-se que o módulo arrefecido gerou mais energia do que o não arrefecido. No entanto, esse método não foi realmente eficiente, porque a água não foi borrifada por todo o plano do painel e parte dela era perdida para o meio externo ao sistema. Assim, algumas partes do módulo não eram arrefecidas e ocorreram muitas perdas de água no processo. Moharram (2013) projetou seu sistema de arrefecimento sob a condição de que a temperatura máxima permitida para o módulo arrefecido é de 45 °C. Ao chegar a essa temperatura, o arrefecimento se inicia e só para

quando o módulo chega a 35°C. Isso é compreensível com base no fato de que, acima de 45°C, para cada elevação de temperatura de 1°C, as células perdem 0,5% de eficiência; na temperatura normal de operação, ocorre apenas perda de 2,2mV/°C na tensão de circuito aberto (Fouad et al 2017). Este trabalho aborda o projeto de um sistema de arrefecimento de módulos fotovoltaicos, objetivado a minimizar os efeitos das altas temperaturas na geração de energia solar fotovoltaica. No início desta pesquisa, em agosto de 2019, registrou-se temperaturas de até 70°C no plano dos módulos em dias típicos de Teresina – Piauí, cidade na qual os experimentos foram realizados. Esse dado motiva a relevância de buscar por métodos de arrefecimento de módulos fotovoltaicos, pois de acordo com o trabalho de Fouad et al (2017), seriam perdidos cerca de 12,5% da eficiência de instalações fotovoltaicas devido à temperatura acima da faixa normal de operação dos módulos.

2. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

O método adotado para o estudo consiste na comparação dos dados de Potência e Temperatura entre dois módulos fotovoltaicos idênticos: um Módulo Controle (MC), no qual se acopla o sistema de arrefecimento, e um Módulo Experimental (ME), que não é afetado pelo sistema. As características gerais dos módulos fotovoltaicos utilizados estão listadas na Tabela 1, conforme as próprias especificações técnicas. O método de arrefecimento foi desenvolvido utilizando-se bombeamento de água controlado por um Microcontrolador Arduino UNO R3. A Tabela 2 apresenta a descrição dos dispositivos utilizados para a construção do sistema de arrefecimento.

Tabela 1. Características técnicas dos módulos fotovoltaicos.

MODULE TYPE	YL055P-17B 2/5
RATED POWER	55.0 W ($\pm 5\%$)
RATED VOLTAGE	17.8 V
RATED CURRENT	3.08 A
MAX. SERIES FUSE	10 A
APPLICATION CLASS	A
OPEN-CIRCUIT VOLTAGE	22.1 V
SHORT-CIRCUIT CURRENT	3.28 A
MAX. SYSTEM VLTAGE	50 V

Tabela 2. Descrição da instrumentação.

Item	Dispositivos	Quantidade
1	Bomba Hidráulica 12 V	1
2	Tanque de água 5 litros	1
3	Radiador de Motocicleta	1
4	Ventoinha 12 V	2
5	Regulador de Tensão LM2596	3
6	Sensor de Tensão 0-25V DC	2
7	Microcontrolador Arduino UNO	1

8	Protoboard	1
9	Módulo DS3231	1
10	Módulo Cartão SD	1
11	Módulo Relé 5V Dois Canais	1
12	Sensor de Temperatura e Umidade DHT22	2
13	Bomba Hidráulica 3-6V	1
14	Sensor de Nível de Água	1
15	Válvula Solenóide 12 V	1

A montagem do sistema no ME é mostrada na Fig. 1. Existem 7 furos por onde o jato de água é distribuído sobre o plano do módulo, todos localizados em um cano fixado na parte superior do módulo. Utilizou-se uma mangueira de nível (material comumente usado em construções para fazer nivelamento em alvenaria) para canalizar a água até o telhado. O bombeamento ocorreu ativando-se a bomba de 12V, cujo chaveamento foi feito com um dos canais do módulo relé de 5V, microcontrolado. Assim, a bomba puxava água do reservatório para que o arrefecimento fosse possível. Dessa forma, foi montado um ciclo fechado, no qual a água é bombeada sobre o painel, é coletada por uma calha de PVC fixada à parte inferior deste, passa pelo radiador e é devolvida ao recipiente.



Fig. 1: Módulo arrefecido com água pelo cano na parte superior com sete furos.

Durante os ciclos de operação, a água do resfriamento era armazenada em um recipiente com capacidade de 5L. As ventoinhas foram acopladas ao radiador para evitar aumento de temperatura dentro do recipiente, e serviram também de carga para os módulos fotovoltaicos, uma vez que só era necessária a operação das ventoinhas durante os momentos mais quentes do dia, quando já há irradiação suficiente para essa alimentação. Para que as ventoinhas não fossem danificadas pela tensão dos módulos, foram empregados os reguladores de tensão LM2596, para que a tensão nos terminais das ventoinhas nunca fosse maior que 12V. Para a coleta dos dados, foi desenvolvido um algoritmo Datalogger, implementado para operar no Microcontrolador Arduino Uno, que registra os dados de tensão, potência, temperatura, data e hora num cartão de memória todos os dias. As informações de data e hora foram obtidas a partir de um

módulo de relógio em tempo real a bateria, RTC DS3231. A gravação dos dados no cartão de memória também foi possível graças a um módulo para cartão micro SD comumente usado em aplicações com Arduino, e seguiu os comandos básicos da programação de Arquivos na linguagem C, interpretada pelo Arduino. Utilizou-se, ainda, sensores para que se pudesse calcular os valores de tensão, potência e temperatura a partir das portas analógicas do microcontrolador. A Fig.2 mostra o interior da versão preliminar do projeto, construída em MDF logo abaixo do telhado sobre o qual foram instalados os módulos fotovoltaicos.

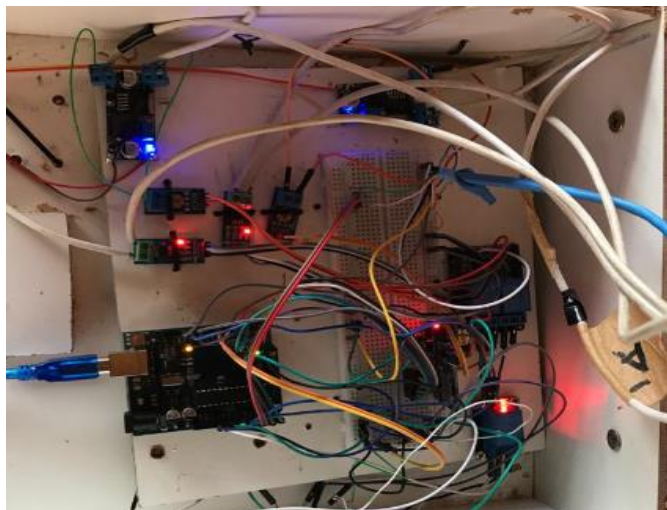


Fig. 2: Montagem eletrônica do Sistema. Fonte: Autoria Própria (2020).

Para o arrefecimento, foi acoplado um sistema que bombeia e distribui água sobre o ME, conforme o sensor de temperatura e umidade DHT22 indica temperaturas superiores a 45°C no mesmo. Assim, as leituras dos sensores foram armazenadas e processadas para mensurar os efeitos do método adotado. Seguindo a orientação da Fig.3, A água bombeada para o arrefecimento dos módulos é coletada pela mangueira indicada por A, então é resfriada e encaminhada de volta ao recipiente pela mangueira indicada por B.



Fig. 3: Radiador com duas ventoinhas.

A Fig.4 mostra o sistema de irrigação, feito com cortes de garrafas PET, nos quais foram plantadas sementes de alfazema. Ao final da tarde, precisamente às 17h, parte da água recolhida é bombeada para ser reutilizada para irrigação de plantas próximas ao sistema. Esse bombeamento foi feito por uma bomba submersa que fica dentro do recipiente, com tensão de operação de 3 a 6V. Como a irrigação consome parte da água do recipiente, é utilizado um canal do módulo relé de 5V para ativar uma válvula solenóide, alimentada pela fonte externa de 12V para que se encha novamente o recipiente. Com isso, encerra-se o processo diário. A irrigação se inicia às 17 h porque a partir desse horário não há mais necessidade de arrefecimento do ME, que já está abaixo de 45 °C até o dia seguinte.



Fig. 4: Sistema de irrigação.

O banco de dados construído pelo Datalogger foi processado no SPSS, de maneira tal que se pudesse estudar quanto variavam os dados de potência em cada um dos módulos. Plotou-se gráficos de dispersão para verificar a diferença entre as potências geradas e para avaliar a correlação entre essas potências e as temperaturas dos módulos. Ao final da tarde, precisamente às 17h, parte da água recolhida é bombeada para ser reutilizada para irrigação de plantas próximas ao sistema. Esse bombeamento foi feito por uma bomba submersa que fica dentro do recipiente, com tensão de operação de 3 a 6V. Como a irrigação consome parte da água do recipiente, é utilizado um canal do módulo relé de 5V para ativar uma válvula solenóide, alimentada pela fonte externa de 12V para que se encha novamente o recipiente. Com isso, encerra-se o processo diário.

Para uma melhor visualização do projeto, a figura 5 apresenta o esquemático do circuito projetado.

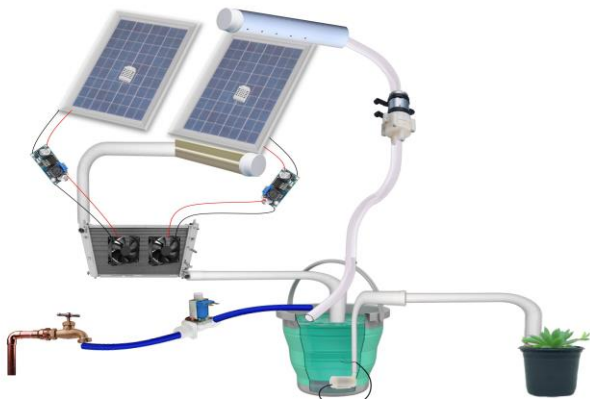


Fig. 5: Esquemático do projeto.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para analisar o efeito da temperatura sobre os módulos fotovoltaicos, uma série de testes foram realizados. Os experimentos foram iniciados em fevereiro, ao ar livre, no dia 6 do mesmo mês, começaram a ser registrados os valores de tensão e corrente obtidos pelos sensores nos horários de 6h às 18h de todos os dias da semana. As temperaturas foram medidas por dois sensores de temperatura e umidade DHT22, localizados na parte anterior, no ponto médio da superfície dos módulos. Os resultados alcançados durante várias medições no dia 12 de fevereiro de 2020, com arrefecimento e sem arrefecimento, são demonstrados nas Fig. 6 e 7, respectivamente. Os resultados podem ser ainda melhores nos meses de agosto, setembro e outubro, pois os resultados obtidos são derivados do clima irregular e chuvoso, ou seja, em alguns dias o tempo estava nublado ou havia ocorrência de chuvas, que faziam todo o trabalho de arrefecimento. Além disso, ocorre nesses meses uma insolação muito maior na região onde foi realizado este estudo. Embora isso implique temperaturas mais elevadas todos os dias, isso não acarreta maiores problemas. Para o módulo não arrefecido, nota-se temperaturas próximas de 60 °C e que a tensão máxima atingida foi de aproximadamente 20 V.

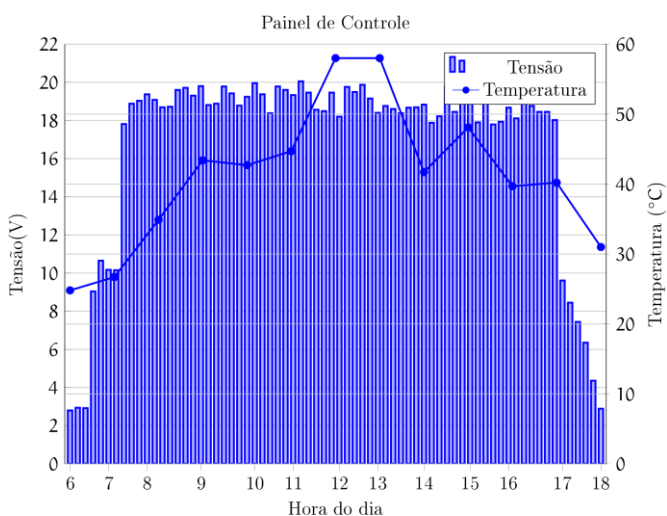


Fig. 6: Resultado de operação no módulo não arrefecido.

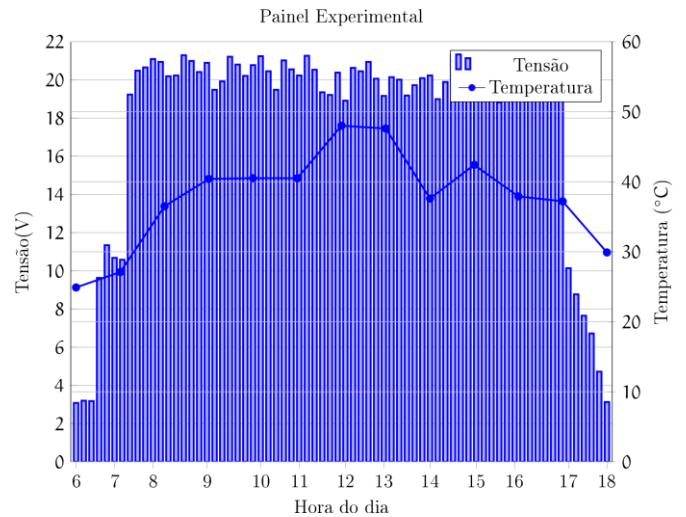


Fig. 7: Módulo arrefecido.

Já o painel arrefecido não registrou temperaturas acima de 50°C e produziu tensões próximas de 22V ao longo do dia. Isso significa uma melhoria considerável na eficiência do ME, já que a diferença de temperatura entre os horários de 12h e 13h, onde a temperatura mais se elevou, é de mais que 10°C. O arquivo escrito no cartão de memória tem formatação apropriada, que otimiza sua conversão em planilha, a ser tratada em programas como o Excel e o SPSS. Com posse dessa planilha, mediu-se a potência média nas cargas no período de um mês. Concluiu-se, por um cálculo de variação percentual, que a potência média fornecida pelo ME foi 9,1% maior que a potência média fornecida pelo MC. O consumo de energia do sistema inteiro é de cerca de 40 W, mas deve ser considerado que o mesmo não funciona com operação de todos os componentes o tempo inteiro (como a bomba de 12 V e a válvula solenóide). Esse consumo tende a ser plenamente atendido com a produção de um módulo, e é cada vez mais desprezível conforme a potência instalada no sistema aumenta. Nota-se que existem valores de tensão maiores nas primeiras horas do dia, quando não há diferença na temperatura dos painéis. Isso se explica pelo fato de que o sistema de arrefecimento também mantém o ME limpo, atenuando perdas pelo acúmulo de sujeiras na superfície do módulo. A Fig. 8 apresenta um gráfico de dispersão, construído no software SPSS, relacionando os dados de potência dos dois módulos durante o mês de abril de 2020. Na Figura, o eixo das ordenadas representa a potência instantânea no circuito das ventoinhas. Cada ventoinha foi alimentada por um módulo, e nota-se um claro ganho de potência transferido para a ventoinha B, alimentada pelo ME. Os baixos valores de potência registrados foram ocasionados por momentos de manutenção do sistema e momentos de falha dos sensores que, com o tempo, fizeram algumas leituras de valores muito baixos, que poderiam ter sido eliminadas e contornadas com um algoritmo filling-in. A necessidade de distanciamento social por conta da pandemia do novo coronavírus impossibilitou a implementação de novos recursos ao sistema e diminuiu a frequência de manutenções no sistema, o que ocasionou problemas de amostragem. No entanto, o sistema cumpriu bem suas especificações enquanto sistema automático e mostrou um ganho de eficiência próximo de 10% durante todo o período

de estudo. O sistema de irrigação foi intensamente prejudicado pelas fortes chuvas que aconteceram no período de desenvolvimento da pesquisa, mas houve crescimento de algumas plantas.

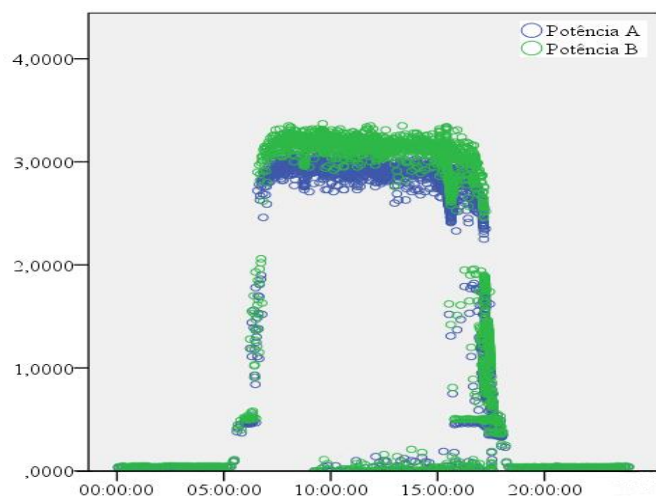


Fig. 8: Gráfico de dispersão das potências dos módulos em função da hora do dia.

As Fig. 9 e 10 mostram o resultado da plotagem de gráficos de Potência versus Temperatura em cada um dos módulos. Seguindo a notação usada para as ventoinhas, Potência A corresponde à ventoinha do circuito não arrefecido; Potência B, do circuito arrefecido. Nota-se, pelas Figuras, que a Potência da ventoinha alimentada pelo ME tem maioria dos pontos acima de 3 watts, enquanto a Potência da ventoinha alimentada pelo MC passa de 3 watts poucas vezes. Entretanto, a correlação não fica realmente clara quando esses gráficos são observados. Desses gráficos, se conclui que a Temperatura no ME não foi tão elevada durante o estudo, e que esse módulo teve maiores potências registradas, o que pode indicar uma relação de proporcionalidade inversa. Um modelo de estudo de correlação entre as duas variáveis não forneceria uma função confiável. Os testes de modelos de regressão com coeficiente de correlação mais elevados foram modelos de regressão linear e logarítmica. Porém, esses modelos não chegaram sequer a um coeficiente de correlação superior a 60%, não sendo, portanto, considerado adequado para um estudo dessa natureza.

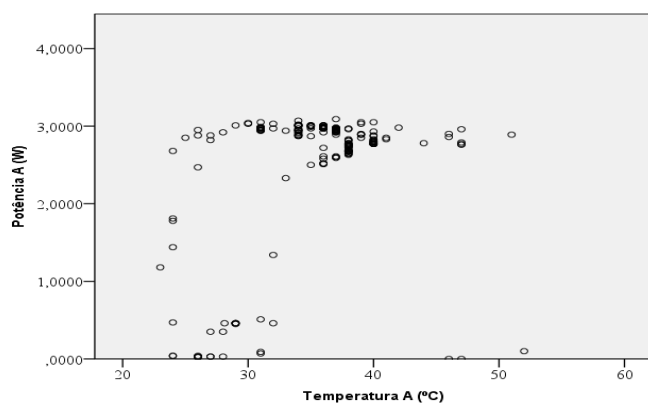


Fig. 9: Gráfico de Dispersão A.

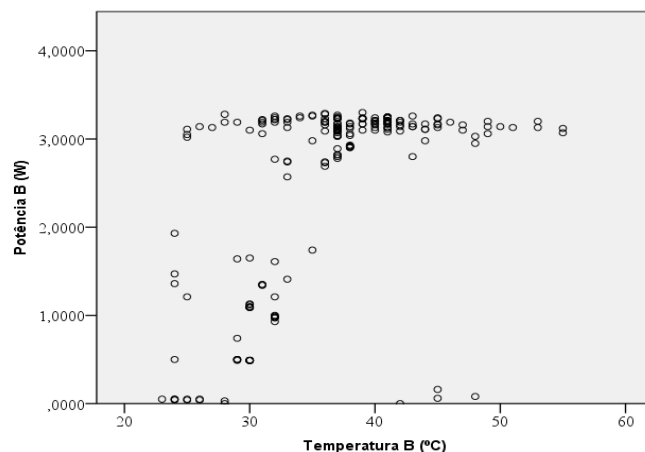


Fig. 10: Gráfico de Dispersão B.

4. CONCLUSÃO

A partir da análise dos dados, é evidente que a temperatura dos módulos é um fator de forte contribuição na potência de geração de energia solar fotovoltaica. À medida que a temperatura da célula aumenta, os valores de tensão e potência diminuem. Conforme os resultados obtidos neste estudo, concluiu-se que a diminuição da temperatura produziu uma potência cerca de dez por cento maior que a do módulo de controle em horários de temperatura mais elevada. Portanto, a técnica de resfriamento fotovoltaico é uma técnica útil que pode ser implementada para reduzir a temperatura da célula. Além de refrigeração, essa técnica tem a vantagem de auto-limpeza, já que a água elimina poeira, folhas, excremento de pássaros, entre outros, contribuindo para prolongar a vida útil do painel.

Para trabalhos futuros, pretende-se preencher o reservatório com a água que os aparelhos de ar-condicionado do centro de tecnologia da UFPI derramam durante o dia tornando o projeto ainda mais sustentável. Além disso, fazer o rastreamento solar através de um projeto de automação e fazer o reaproveitamento do calor retirado da água.

Comprovada a eficácia do sistema, é natural que haja indagações sobre a possibilidade de instalação de um sistema em escala maior. Com base nos resultados obtidos, avalia-se que um sistema maior pode ser implementado com materiais de baixo custo e sem boa parte dos itens utilizados nesse sistema de monitoramento. A finalidade de um sistema de arrefecimento de larga escala seria gerar energia com maior eficiência, não havendo necessidade de registrar e avaliar minuciosamente como os parâmetros variam de acordo com data e hora. Isso implica que o sistema de Datalogger é necessário para fins de pesquisa, mas não para fins de aplicação prática, afinal um medidor inteligente já desempenharia esse trabalho de monitoramento da potência gerada.

Um sistema de larga escala deveria contar com um encanamento maior e mais resistente à irradiação solar, pois os canos de PVC não são fabricados para canalizarem água em temperaturas elevadas e ressecam após exposição direta à

irradiação solar, e isso poderia comprometer o sistema. Além disso, seria necessário acoplar um filtro na saída de água do sistema, para evitar o acúmulo de sedimentos (popularmente conhecidos como lodo) na mangueira que canaliza a água ao longo do sistema. Evidentemente, também seria necessário utilizar bombas mais potentes e recipientes de água maiores, de acordo com a extensão da instalação fotovoltaica em questão.

Este estudo contribuiu positivamente para implementação de sistemas fotovoltaicos arrefecidos através da programação lógica e da definição das características de leitura e atuação dos sensores e atuadores. E ainda favoreceu para ampliação de conhecimentos sobre módulos fotovoltaicos arrefecidos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) pelo pagamento de bolsas e custeio ao Programa de Educação Tutorial do curso de Engenharia Elétrica da UFPI e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsas de mestrado.

REFERÊNCIAS

- Assunção, H.D. (2014). ‘Degradação de módulos fotovoltaicos cristalinos instalados no DEEUFC’, grau acadêmico, Universidade Federal do Ceará, Ceará.
- Catalin, CATALIN. G.P. et al. (2016). ‘*Efficiency improvement of photovoltaic panels by using air cooled heat sinks*’. Energy Procedia, v. 85, p. 425-432, jan. 2016.
- Chaniotakis, E. (2001). ‘Modelling and analysis of water cooled photovoltaics’, MSc Energy Systems and the Environment, Department of Mechanical Engineering University of Strathclyde. Reino Unido.
- Essalaimeh, S., Salaymeh, A., Abdallat, Y. (2011). ‘Electrical production for domestic and industrial applications using hybrid PV-wind system’, *Proceeding of the 3rd global conference on renewable energy and energy efficiency for desert regions*. 26–28 April 2011.
- Fouad, M.M., Shihata, L.A., Morgan, E.I. (2017). ‘*An Integrated Review of Factors Influencing the Performance of Photovoltaic Panels*’, Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 80, p. 1499-1511, dez. 2017.
- Kluth, A. (2008). ‘Using water as a coolant to increase solar panel efficiency’, California State science fair. California.
- Moharram, K.A., Kandil, H.A., Sherif, H., Abd, S. (2013). ‘Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling’, Ain Shams Engineering Journal 4(4):869–877 · December 2013.