

Otimização da Geração de Energia Elétrica Fotovoltaica pelo Controle da Temperatura

¹Leonardo J. Piotrowski, ¹Emerson F. Vaz, ¹Felix A. Farret
¹Universidade Federal de Santa Maria – UFSM – Santa Maria – Brasil
leonardoljp@gmail.com, feixvaz@hotmail.com, fafarret@gmail.com

Resumo— A instalação de painéis fotovoltaicos para geração de energia elétrica tem aumentado no Brasil abrindo novos mercados nessa área. Sendo assim, faz-se necessário a análise das diversas configurações que os módulos podem apresentar para aumentar a produção de energia elétrica. Dentre as analisadas neste artigo está a com rastreamento do sol e a com espelhos e rastreamento. Para cada uma delas analisa-se a diminuição da capacidade de geração pelo aumento da temperatura nas células fotovoltaicas. A partir disso, verifica-se qual a melhoria que pode ser proporcionada pelo arrefecimento do painel. Para o controle da temperatura dos módulos utilizou-se o arrefecimento por circulação de água controlada pelo algoritmo HCC (*Hill Climbing Control*). Um estudo de caso é usado para validar a importância do arrefecimento em cada tipo de configuração. O arranjo de módulos fotovoltaicos com espelhos e rastreamento solar apresenta os valores mais elevados de eficiência devido à utilização do arrefecimento.

Palavras-chave— Arrefecimento, eficiência, módulos fotovoltaicos, otimização, temperatura.

I. INTRODUÇÃO

O Brasil em sua grande extensão territorial possui uma matriz energética com enorme potencial para desenvolvimento de geração de energia renovável. Atualmente, a sua principal fonte de energia elétrica é a hidroelétrica. Com base em dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [1] cerca de 60,84% da geração de energia elétrica brasileira é de origem hídrica, 7,69% é de origem eólica e, apenas 0,78% de origem solar. Após a publicação da Resolução Normativa 482 em 2012 [2], atualizada pela Resolução Normativa 687 de 2015 [3], a micro e minigeração de energia elétrica começou a ganhar destaque e expressividade no setor elétrico brasileiro. Sendo que, utilizam fontes que vem principalmente da energia hidráulica, eólica, biomassa, entre outras a energia solar fotovoltaica.

Um dos aproveitamentos da energia solar é obtido através do efeito fotovoltaico que consiste na conversão direta da radiação solar em eletricidade [4]. No entanto, essa conversão sofre influência da alta temperatura que a célula fotovoltaica pode atingir. Isso impacta negativamente na eficiência dos módulos que são compostos por um aglomerado dessas células. Segundo [5] esse impacto se deve ao fato de que a temperatura elevada gera excesso de energia térmica nos elétrons livres e nas lacunas, dificultando a movimentação e resultando na diminuição da tensão e potência elétrica de saída.

Estudos como [6], [7] e [8] mostram que a temperatura impacta negativamente na potência dos módulos e que o arrefecimento é uma excelente solução para aumentar a eficiência. Já [9] enfatiza que em lugares com clima predominantemente quente, o controle da temperatura pelo arrefecimento é mais significativo ainda. Assim sendo, este estudo faz uma análise da geração de energia fotovoltaica com e sem arrefecimento para as configurações com módulos fixos (referência), com movimento em eixo duplo e para os módulos com espelhos e rastreamento.

O objetivo geral deste artigo é verificar como a temperatura influencia na operação de diferentes configurações de módulos e como o arrefecimento pode otimizar a geração fotovoltaica. Para isso, compara-se o aprimoramento da eficiência de três diferentes configurações de módulos. Abordam-se quais são as configurações de módulos analisadas, bem como, a contextualização da influência da temperatura na geração fotovoltaica. Para tanto, descreve-se uma forma de cálculo da temperatura do módulo, analisando-se os procedimentos adotados para o arrefecimento através da circulação de água. Então, faz-se a simulação de um estudo de caso, avaliando os resultados e, por fim, reúnem-se as principais contribuições obtidas através desse estudo.

II. CONFIGURAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Os painéis fotovoltaicos assumem diversas configurações para otimizar a produção de energia elétrica. Dentre elas, destacam-se três tipos de configuração dos módulos: fixo, com rastreamento em dois eixos e o módulo com espelhos e rastreamento.

A. Módulo Fotovoltaico Fixo

O módulo fotovoltaico fixo é a configuração mais simples e comum entre os projetos de geração fotovoltaica e, sua estrutura pode ser observada na Fig. 1 [10]. Os módulos são instalados de forma que a radiação solar diária incida maior tempo sobre a sua superfície. Geralmente, os módulos são alinhados na direção Leste a Oeste e com sentido para o Norte ou Sul, estes de acordo com a localização do hemisfério. A inclinação do módulo fotovoltaico varia de acordo com a latitude do local da instalação.



Fig. 1. Módulo com estrutura fixa.

O módulo fotovoltaico fixo tem como principal vantagem o baixo custo de instalação e manutenção. Por outro lado, essa configuração comparada às demais pode apresentar baixa eficiência elétrica diminuída pela inclinação da radiação em relação ao painel [4].

B. Módulo Fotovoltaico com Rastreamento

O módulo fotovoltaico com rastreamento é uma estrutura com dispositivo mecânico que direciona a face superior do módulo fotovoltaico para o sol, de forma mais propícia para a geração de energia. Esta configuração permite maior captação da radiação solar e, portanto, eleva a produção de energia [5].

Existem dois tipos de rastreamento solar, um com eixo simples e outro com eixo duplo. Neste estudo aborda-se a estrutura com eixo duplo. Esse tipo de rastreamento é construído para acompanhar o sol de Leste a Oeste e de Norte a Sul através de dois movimentos. A Fig. 2 [11] ilustra os dois sentidos de movimentos. Observa-se que o rastreamento com eixo duplo permite que o módulo fotovoltaico se mantenha sempre perpendicular para captação da irradiância ao longo do dia.



Fig. 2. Módulo com estrutura de rastreamento de dois eixos.

Os módulos com rastreamento podem apresentar melhor desempenho quando comparados ao projeto fotovoltaico fixo, mas essa tecnologia possui menor confiabilidade e maior custo de instalação e manutenção [11].

A finalidade do rastreamento solar é obter o melhor aproveitamento da irradiância diária, porém, o aumento da captação solar acarreta, também num aumento da temperatura do módulo, principalmente em países próximos ao Equador. O aumento de geração ocorre, principalmente devido ao aumento da captação da radiação solar pelos módulos e é preciso

verificar as perdas que acontecem pelo aumento da temperatura.

C. Módulo Fotovoltaico com Espelhos e Rastreamento

O módulo fotovoltaico com espelhos e rastreamento solar é direcionado para a melhor captação dos raios solares, conforme pode ser visto na Fig. 3 [12]. Em síntese, usa-se uma estrutura mecânica para elevar a eficiência de geração de cada módulo [13].



Fig. 3. Módulo espelhado com estrutura de rastreamento.

A configuração com espelhos e rastreamento apresenta uma série de vantagens, entre elas: redução da área para a produção de uma mesma quantidade de energia (comparado ao módulo fixo e com rastreamento) e uma redução de custo (utilização de um sistema mecânico para o aumento da eficiência). Todavia, existem algumas desvantagens como: elevação da temperatura do módulo; necessidade de mecanismos de rastreamento; necessidade de limpeza rotineira dos concentradores; aparecimento de pontos quentes nas células fotovoltaicas e redução da vida útil dos módulos [14].

III. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

As variações da radiação solar e da temperatura ambiente sobre um módulo fotovoltaico afetam diretamente a operação das células fotovoltaicas [4]. O aumento da temperatura reduz a potência gerada, principalmente, por diminuir a tensão elétrica na célula mesmo que a corrente elétrica aumente de modo inexpressivo. Além disso, as elevadas temperaturas podem degradar significativamente as células fotovoltaicas e, portanto, reduzir a vida útil do módulo. Na Fig. 4 [15] é possível verificar a influência da temperatura na curva I-V característica da célula fotovoltaica.

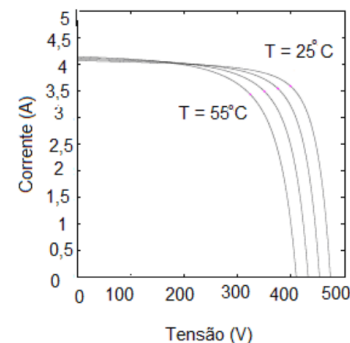


Fig. 4. Influência da temperatura na curva I-V da célula fotovoltaica.

Usualmente, a perda de potência é da ordem de $-0,41\%/^{\circ}\text{C}$ [16] e acontece pela expressiva queda de tensão de circuito aberto para cada grau de aumento da temperatura. Na Fig. 5 [15] pode-se perceber o quanto a potência do módulo diminui em relação ao aumento da temperatura. A partir disso, pode-se dizer que quanto menor for a temperatura de operação do painel, maior poderá ser a produção de energia.

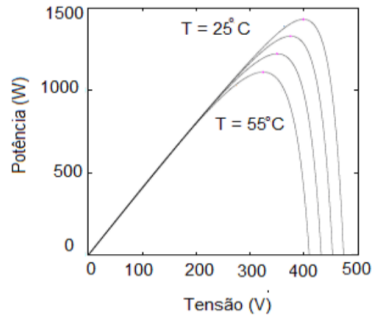


Fig. 5. Influência da temperatura na potência de saída do módulo.

Em locais de clima quente e de pouca ventilação a temperatura dos módulos fotovoltaicos pode superar os 80°C [17]. Note-se que, geralmente os módulos fotovoltaicos possuem temperatura máxima de operação de até 85°C . Acima dessa temperatura podem ocorrer danos ao módulo. Por isto para cada localidade é necessário registrar-se os valores de irradiância e calcular a temperatura de operação do módulo.

Existem inúmeras formas de se calcular a temperatura do módulo fotovoltaico e a complexidade da equação depende, principalmente, pela necessidade de se obter valores mais precisos. Nesse estudo, utilizou-se (1) [18], pois é uma das fórmulas mais conhecidas e de simples aplicação para obter os valores de temperatura do módulo (T_M).

$$T_M = T_a + \frac{(\text{NOCT} - 20)}{800} \cdot G \quad (1)$$

A equação é definida para a temperatura nominal de operação da célula (NOCT) do tipo de módulo utilizado em $^{\circ}\text{C}$, pela temperatura ambiente (T_a) em $^{\circ}\text{C}$ e pela irradiância (G) em W/m^2 [18].

IV. ESTUDO DE CASO

A análise de um estudo de caso se faz necessária para se determinar o efeito do arrefecimento sobre os módulos e verificar, portanto, o aumento de eficiência para cada configuração. Os dados climáticos utilizados neste artigo são da cidade de Santa Maria que está localizada no Rio Grande do Sul (RS), Brasil. A principal finalidade dessa simulação é mostrar a influência que o arrefecimento pode ter na geração de energia elétrica nas diferentes configurações de instalação fotovoltaica.

A. Informações para a simulação

Para o estudo de caso levou-se em conta informações tanto do clima como dos equipamentos elétricos. O módulo fotovoltaico usado foi disposto na inclinação que viabiliza a

maior média anual de produção de energia elétrica nesse local. Já a temperatura do módulo foi calculada através da (1) de acordo com os dados climáticos e especificações do módulo cuja NOCT é de 45°C . Nesse estudo são utilizados três módulos do tipo monocristalino com eficiência de $17,23\%$ com potência nominal de 335 W cada um, podendo operar de -40°C até 85°C [16].

O inversor utilizado para as configurações módulo fixo e com rastreamento possuem uma eficiência máxima de 90% e 1 kW de potência nominal para o processamento de energia elétrica. Sabendo que a geração de energia é maior para a configuração com espelhos e rastreamento, por segurança dimensionou-se o inversor, nesse caso, para a potência nominal de $2,2\text{ kW}$. As perdas por depósito de poeira na superfície dos módulos e as perdas por degradação das células fotovoltaicas não foram consideradas na simulação.

B. Arrefecimento à Água

O arrefecimento dos módulos fotovoltaicos, além de aumentar a eficiência na geração elétrica, pode também aquecer a água. Alguns modos de arrefecimento podem acontecer por jato de água sobre a superfície do módulo ou, por sopro de vento em aletas de dissipação de calor, dentre outras. Contudo, neste trabalho aborda-se o arrefecimento por circulação de água com tubos fixos na parte de trás do painel fotovoltaico, sem aproveitamento do aquecimento de água.

A serpentina que fica atrás do módulo pode ser de cobre ou alumínio, devido ao fato desses materiais possuírem alta condutividade térmica. Contudo, a pequena área de contato entre os tubos e a parte de trás do módulo requerem camadas de lâminas de alumínio para aumentar a área da troca de calor e fazer com que o arrefecimento aconteça de forma mais homogênea nas células fotovoltaicas [19].

Além da serpentina, o circuito de arrefecimento foi feito pelo controle de fluxo do fluido, por uma bomba d'água e por um reservatório de armazenamento da água. A Fig. 6 adaptada de [19] ilustra a estrutura da geração de energia elétrica fotovoltaica com arrefecimento por circulação de água.

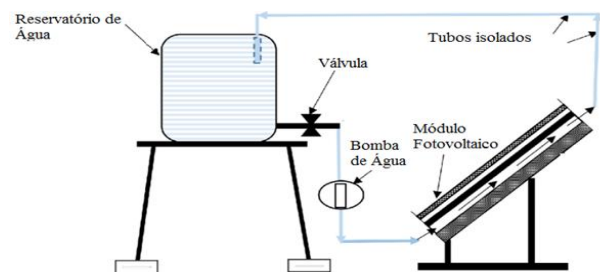


Fig.6. Módulo fotovoltaico com arrefecimento por circulação de água.

O controle da velocidade do fluxo de água pode ser realizado de tal forma a otimizar o arrefecimento, tanto no consumo de energia elétrica da bomba de circulação de água, como no dimensionamento do diâmetro dos tubos da serpentina. Neste estudo de caso foi utilizado o HCC (*Hill Climbing Control*) para estabelecer o controle ótimo do fluxo de água.

O HCC é um algoritmo de controle que aumenta ou diminui a velocidade do fluxo de água para atingir o ponto de máxima troca térmica. Isto é feito através de sensores da temperatura de saída e de entrada de água do circuito de arrefecimento. Dessa forma, a bomba de circulação de água dosa o fluxo da água após o HCC estabelecer a velocidade ideal da melhor troca de calor possível.

C. Simulações computacionais

O programa utilizado nas simulações do estudo de caso é o *OpenDSS* [20] que consiste em uma ferramenta para simulação de sistemas de energia elétrica. O *OpenDSS* é amplamente utilizado no estudo do fluxo de potência, principalmente na área de geração distribuída e energias renováveis. Além disso, esse *software* possui licença de código aberto (utilização livre).

Entre os parâmetros que foram inseridos no *OpenDSS* pode-se citar: (i) potência máxima total do conjunto dos módulos (P_{mpp}) para 1 kW/m² de irradiância a 25 °C de temperatura; (ii) variação da P_{mpp} em função da temperatura e da irradiância; (iii) curva de eficiência do inversor; (iv) valores de temperatura do painel; (v) curva de irradiância.

Foram realizadas simulações para as diferentes configurações dos módulos fotovoltaicos durante um ano com os dados obtidos de hora em hora ao longo desse período. O arrefecimento por circulação de água foi feito com um reservatório que armazena água na temperatura ambiente. Dessa forma, a temperatura dos módulos foi parametrizada no simulador para que o HCC a mantivesse dentro de uma margem de no máximo 5 °C a mais que a temperatura ambiente. Portanto, o arrefecimento refrigera os módulos em todas as estações do ano dentro da margem estabelecida referente à temperatura ambiente.

Os valores de otimização obtidos na simulação em relação ao aumento de eficiência por arrefecimento da geração de energia elétrica pelos módulos não considerou o consumo da bomba de circulação de água e nem do consumo do controle do fluxo de água. O consumo da bomba d'água é mínimo por não haver diferença de altura do ponto de partida da água que é o mesmo de chegada. Os gráficos dos resultados mostram a relação de aumento entre o aprimoramento que ocorre na eficiência dos módulos com e sem arrefecimento para cada configuração analisada.

V. RESULTADOS

Nos estudos realizados para o arrefecimento dos módulos observou-se que ele proporciona um aumento da eficiência em todas as configurações analisadas. Os resultados obtidos para as três configurações estudadas (fixo, com rastreamento e com espelhos e rastreamento) foram agrupados para o dia 06/01, um dia típico de verão na região e dia 06/07, um dia típico de inverno. Com isto, é possível analisar também, como a eficiência do arrefecimento pode ser influenciada pela mudança climática. O sinal negativo dos valores de energia (kWh), que aparecem nas figuras deste tópico mostra que a energia está sendo apenas gerada e não consumida.

Para a análise dos dados obtidos, primeiramente apresenta-se os dados da otimização que ocorreu num dia típico de verão (06/01) para as três configurações analisadas sem arrefecimento. A Fig. 7 mostra o perfil de geração elétrica dos módulos fixo, com rastreamento e com espelhos e rastreamento para que se possa visualizar o perfil que cada tipo de arranjo possui.

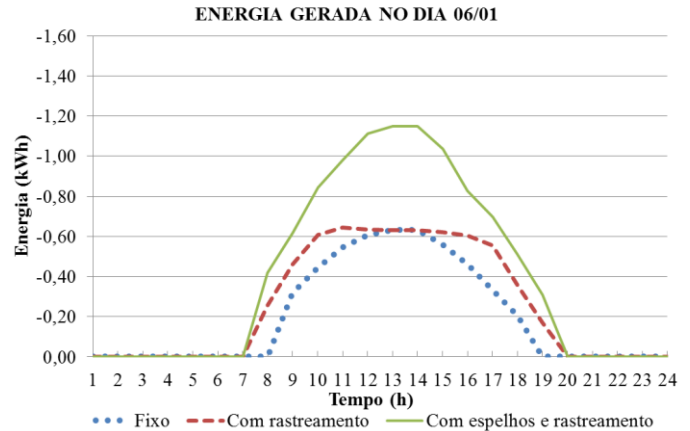


Fig. 7. Produção de energia elétrica de três configurações de módulos fotovoltaicos sem arrefecimento para o verão.

Na Fig. 7 o painel com espelhos e rastreamento apresenta a maior produção de energia elétrica, seguido pelo painel com rastreamento e, por último, o painel fixo. O desempenho que a combinação de espelhos com rastreamento proporciona pode ser destacado nessa figura. Por outro lado, a temperatura de operação dos painéis na configuração com espelhos e rastreamento ultrapassou a temperatura máxima permitida nas especificações do fabricante em alguns períodos da simulação.

A Fig. 8 mostra o que acontece com a geração fotovoltaica quando é adicionado o arrefecimento nos módulos. Em relação a Fig. 7, é possível observar-se que houve um aumento significativo na geração de energia nos módulos fixo, com rastreamento e com espelhos e rastreamento. A otimização da eficiência de cada tipo de arranjo analisado pode ser vista de forma mais clara na Fig. 9. Essa figura ilustra que a eficiência proporcionada pelo arrefecimento é maior no período das 10h00 às 16h00 principalmente, pois nesse período são concentrados os maiores valores de irradiância e de temperatura ambiente. Ou seja, é principalmente nessas condições que o arrefecimento consegue evitar grandes perdas na potência de saída dos painéis. Isso também pode ser visto para o painel com espelhos e rastreamento, sobretudo, no período das 13h00 às 14h00 onde ocorre o ápice da otimização (próxima de 28%) pelo arrefecimento.

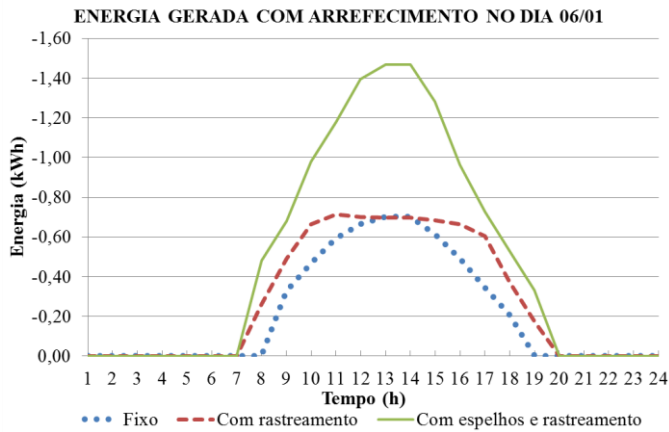


Fig. 8. Produção de energia elétrica de três configurações de módulos fotovoltaicos com arrefecimento em um dia de verão.

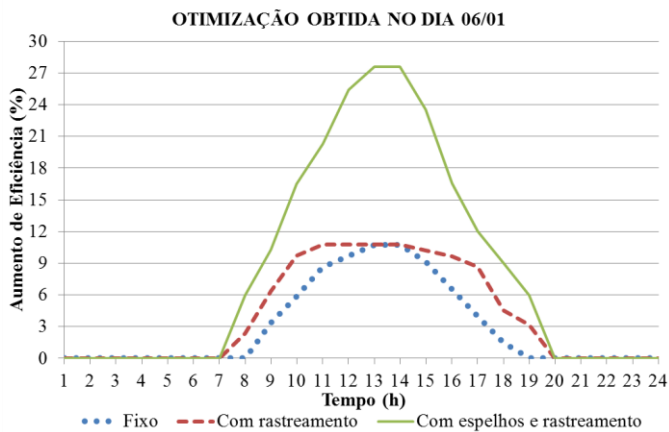


Fig. 9. Otimização da eficiência obtida em um dia típico de verão através do arrefecimento em três configurações de módulos fotovoltaicos.

A partir da análise da otimização em um dia de verão, apresenta-se como o arrefecimento se comporta para um dia típico de inverno (06/07). A Fig. 10 mostra o perfil das configurações em condições climáticas com menor temperatura ambiente ao longo do dia e os valores de irradiância e período de incidência solar menores.

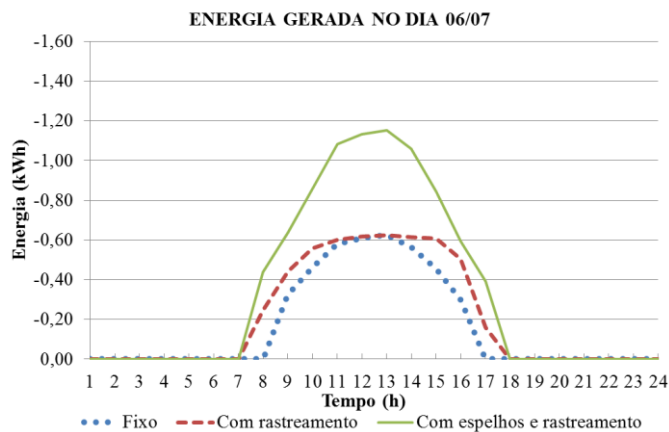


Fig. 10. Produção de energia elétrica de três configurações de módulos fotovoltaicos sem arrefecimento para um dia de inverno.

A Fig. 11 mostra o perfil dos arranjos fotovoltaicos considerando o arrefecimento dos módulos. A produção de energia elétrica não é alterada de forma significativa para as configurações com rastreamento e fixo, pois a temperatura de operação dos módulos nesse período do ano se torna menor devido às condições climáticas. Todavia, o arranjo fotovoltaico com espelhos e rastreamento mostra um aumento significativo na geração de energia elétrica, uma vez que o arrefecimento contribui para o controle da temperatura elevada pela radiação solar concentrada na superfície dos painéis.

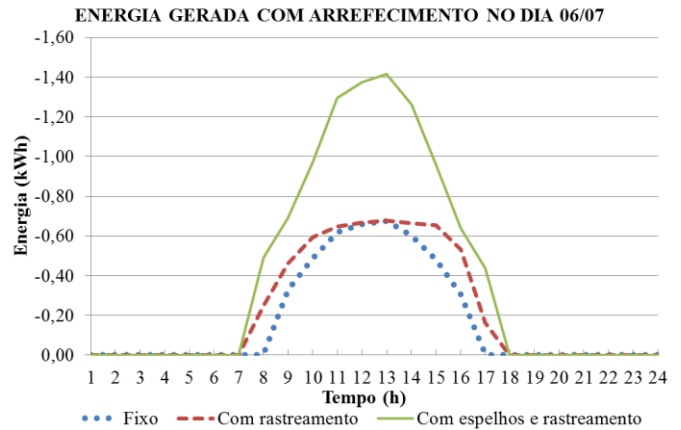


Fig. 11. Produção de energia elétrica de três configurações de módulos fotovoltaicos com arrefecimento em um dia de inverno.

Neste estudo, nota-se que apesar das temperaturas no inverno serem menores é possível chegar-se a valores em torno de 8% no aumento da eficiência de geração fotovoltaica com arrefecimento tanto nas configurações de módulos fixos e com rastreamento e, de até 22% para o arranjo com espelhos e rastreamento. A otimização proporcionada pelo arrefecimento pode ser mais bem visualizada na Fig. 12.

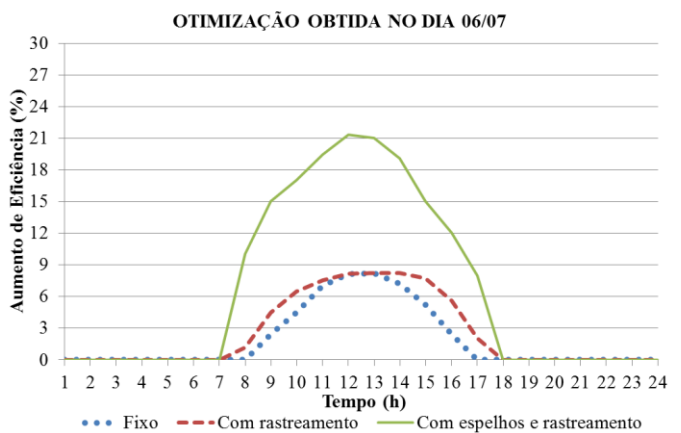


Fig. 12. Otimização da eficiência obtida em um dia típico de inverno através do arrefecimento em três configurações de módulos fotovoltaicos.

VI. CONCLUSÕES

Este artigo permite concluir que o arrefecimento de painéis fotovoltaicos tem um papel fundamental para a otimização da geração fotovoltaica. Isto acontece, principalmente, em locais com clima quente e quando utilizam-se concentradores de radiação solar. Conforme abordado neste trabalho, confirma-se que a temperatura impacta negativamente na produção de energia elétrica e o controle dela através do arrefecimento por circulação de água, é uma excelente solução para minimizar o efeito negativo e aumentar a eficiência dos módulos.

Os resultados obtidos mostram que a configuração de módulos fotovoltaicos com espelhos e rastreamento obteve o maior aproveitamento do arrefecimento tanto no verão como no inverno e, com isso, mostra-se como o melhor arranjo para utilizar o arrefecimento. Além disso, o arrefecimento mantém a temperatura de operação dos módulos dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante. Nesse sentido, o arrefecimento proporciona o aumento de produção de energia e, também, traz maior confiabilidade ao conjunto.

As configurações do tipo módulo fixo e com rastreamento possuem significativa melhora na eficiência no período do verão, porém, não é tão expressiva no período de inverno onde o clima possui temperatura média baixa. Assim, conclui-se que cada tipo de configuração precisa ser analisada particularmente, junto às condições climáticas de operação dos equipamentos e às ferramentas que proporcionam o estudo de forma mais próxima possível da realidade.

A análise dos fatores climáticos é fundamental para a implantação de arrefecimento em módulos fotovoltaicos. Conforme os resultados mostram, existe uma variação de quase 6% entre a otimização máxima de um dia de verão e de um dia de inverno, esse fato se deve pela maior retirada de calor dos módulos em períodos quentes do que em períodos frios. Além disso, essa variação aumenta ou diminui de hora em hora durante o período simulado.

As três configurações de módulos fotovoltaicos analisados possuem características intrínsecas e eficiências que variam, principalmente, de acordo com o clima. No entanto, o arrefecimento nessas três configurações mostra que a eficiência total é aprimorada, ou seja, é possível gerar mais energia elétrica com o uso do arrefecimento. Dessa forma, este estudo proporcionou a análise técnica, do qual importante é implantar o arrefecimento e qual configuração de módulos produz mais energia com o controle da temperatura. Ainda, salienta-se que estudos práticos devem ser realizados para validar a afirmação da viabilidade técnica do arrefecimento em módulos fotovoltaicos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001. Os autores agradecem a CAPES, ao Programa de Excelência Acadêmica (PROEX) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- [1] Agência Nacional De Energia Elétrica (ANEEL), “Matriz de Energia Elétrica.” Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidade_Brasil.cfm>. Acesso em: 27 jun. 2018.
- [2] Agência Nacional De Energia Elétrica (ANEEL), “Resolução Normativa N° 482, de 17 de abril de 2012.” pp. 1-30, 2012.
- [3] Agência Nacional De Energia Elétrica (ANEEL), “Resolução Normativa N° 687, de 24 de novembro de 2015.” 2015.
- [4] Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), “Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos,” 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2018.
- [5] M. M. Fouada, L. A. Shihatab, E. I. Morgan, “An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 1499–1511, 2017.
- [6] K. A. Moharram, M. S. Abd-Elhady, H. A. Kandil, H. El-Sherif, “Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling,” *Ain Shams Engineering Journal*; vol. 4, pp. 869–877, 2013.
- [7] M. S. Abd-Elhady, M. M. Fouad, T. Khalil, “Improving the efficiency of photovoltaic (PV) panels by oil coating,” *Energy Conversion and Management*; vol. 115, pp. 1–7, 2016.
- [8] M. E. Meral, F. Dinçer, “A Review of the factors affecting operation and efficiency of Photovoltaic based electricity generation systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 2176–2184, 2011.
- [9] S. A. Hamid, M. Y. Othman, K. Sopian, S. H. Zaidi, “An overview of photovoltaic thermal combination (PV/T combi) technology,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, pp. 212–222, 2014.
- [10] I. S. Mendes, “Avaliação do desempenho do sistema de mini-geração fotovoltaico na Faculdade de Ciências,” *Dissertação de Mestrado*, Universidade de Lisboa, 2016.
- [11] F. O. Martins, “Seguidor solar de dois eixos com motores passo-a-passo,” *Dissertação de mestrado*, Universidade Nova de Lisboa, 2016.
- [12] I. L. Alboteanu, C. A. Bulucea, S. Degeratu, “Estimating Solar Irradiation Absorbed by Photovoltaic Panels with Low Concentration Located in Craiova, Romania,” *Sustainability*, vol. 7, pp. 2644–2661, 2015.
- [13] I. S. Hermenean, I. Visa, A. Duta, D. V. Diaconescu, “Modelling and Optimization of a Concentrating PV-Mirror System,” *Renewable Energy & Power Quality Journal*, vol. 1 (8), 2010.
- [14] M. M. O. Júnior, D. O. Filho, A. Ribeiro, “Modelagem e estudo de concentradores solares planos.” *VI Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 2016.
- [15] V. R. S. Sant’Anna, “Concentradores solares planos para sistemas fotovoltaicos,” *Dissertação de mestrado*, Universidade Federal de Viçosa, 2010.
- [16] Canadian Solar, “Solar Modules,” Disponível em: <https://www.canadiansolar.com/downloads/datasheets/v5.5/Canadian_Solar-Datasheet-MaxPower-CS6U-M-1500V-v5.52en.pdf>, Acesso em: 13 jul. 2018.
- [17] R. Ruther, L. Nascimento, J. U. Junior, P. Pfitscher, T. Viana, “Performance assessment of a microcrystalline Si PV installation in a warm climate.” In: *Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1027–1031, 2010.
- [18] A. Colmenar-Santos, A. Buendia-Esparcia, C. de Palacio-Rodríguez, D. Borge-Diez, “Water canal use for the implementation and efficiency optimization of photovoltaic facilities: tajo-Segura transfer scenario,” *Solar Energy*, vol. 126, pp. 168–194, 2016.
- [19] G. Zanlorenzi, A. L. Szejka, O. Canciglieri, “Hybrid photovoltaic module for efficiency improvement through an automatic water cooling system: A prototype case study,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 196, pp. 535–546, 2018.
- [20] OPENDSS. Open Distribution System Simulator. Program Sourceforge .Net. 2017. Disponível em:<<https://sourceforge.net/projects/electricdss/files/>> Acesso em: 10 nov. 2017.