AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE RESFRIAMENTO PARA PLACAS FOTOVOLTAICAS

1st Anderson Zini
Universidade Federal de Santa Maria
Campus Cachoeira do Sul
Cachoeira do Sul, Brasil
andersonzini@live.com

2nd Vandrei Rubin Steffanello
Universidade Federal de Santa Maria
Campus Cachoeira do Sul
Cachoeira do Sul, Brasil
vandrei.rubin@acad.ufsm.br

3rd Paulo César Vargas Luz
Universidade Federal de Santa Maria
Campus Cachoeira do Sul
Cachoeira do Sul, Brasil
paulo.c.luz@ufsm.br

***Resumo*—A geração de energia elétrica através de placas fotovoltaicas vem se destacando dentre as fontes de energias renováveis. Mas, infelizmente, as placas absorvem apenas parte da radiação solar incidente para a conversão em energia elétrica, sendo a maior parte convertida em calor, que eleva a temperatura das células dessas placas, causando a diminuição da energia gerada e, consequentemente, da sua eficiência elétrica. Assim, com o intuito de aumentar a eficiência elétrica e melhorar a produção de energia das placas fotovoltaicas, foi realizado, neste trabalho, um estudo sobre métodos de resfriamento para essas placas. Avaliaram-se os efeitos que esses métodos causam na eficiência e nos parâmetros das placas com resfriamento. Para realizar a análise, foi desenvolvido um sistema de medição para realizar leitura, coleta e o armazenamento, em um dataset, dos dados dessas placas e das condições climáticas. Por fim, é realizada a estimativa da viabilidade econômica desses métodos através do cálculo do payback. O resfriamento por lâmina de água apresentou o maior impacto no aumento da eficiência energética, com um incremento máximo de 3,922 %.**

***Palavras-chave*—Placa fotovoltaica, resfriamento, eficiência**

I. Introdução

Quando se trata do desempenho elétrico das placas fotovoltaicas, ele está diretamente relacionado ao tipo de placa utilizada. Essas placas convertem parte da radiação solar em eletricidade, variando conforme o tipo das células e as condições do clima. O restante da radiação é refletido ou transformado em calor, o que eleva a temperatura das células da placa fotovoltaica e reduz sua eficiência elétrica. Existem técnicas para diminuir essa temperatura; uma das formas é a utilização de sistemas de resfriamento conectados às placas, como, por exemplo, o resfriamento por aletas, serpentina de água e lâmina de água.

Esse estudo tem o intuito de analisar o comportamento dessas placas em termos de eficiência elétrica, utilizando métodos de resfriamento passivo e/ou ativo. Ainda, visando desenvolver uma metodologia de análise do impacto que os sistemas de resfriamento causam à eficiência elétrica ao serem adicionados às placas fotovoltaicas, este trabalho realiza uma análise e comparação detalhada dos dados coletados das placas fotovoltaicas sem e com resfriamento.

II. Referencial Teórico

A. Placas Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas produzidas a partir de lâminas de silício cristalino (c-si) monocristalino ou policristalino, que representam a primeira geração dessa tecnologia, continuam a dominar o mercado global [1]. As células fotovoltaicas de silício monocristalino possuem uma eficiência maior (15 % a 18 %), mas são rígidas e frágeis, necessitando montagem em painéis para resistência mecânica, com custo de produção alto. Já as células de silício policristalino, com eficiência menor (13 % a 15 %) devido a imperfeições estruturais que dificultam o movimento de elétrons, têm custo de produção mais baixo, oferecendo melhor relação custo-benefício [2]. Ambas apresentam uma eficiência geral baixa em termos de conversão de energia solar em eletricidade.

O aumento da temperatura da célula da placa fotovoltaica causa uma diminuição em seu desempenho, com isso causando a diminuição da eficiência e, consequentemente, da potência gerada por essa placa [3]. Desta forma, a próxima seção apresenta uma revisão do impacto da temperatura na geração de energia, para um maior entendimento de como isso afeta a eficiência das placas fotovoltaicas.

B. Geração Versus Temperatura

A temperatura da célula fotovoltaica altera suas características elétricas. A tensão de circuito aberto da célula tende a diminuir consideravelmente com o aumento da temperatura. Ao mesmo tempo, a corrente de curto circuito sofre um aumento muito pequeno, onde esse aumento não compensa a queda da tensão, acarretando na queda da potência gerada [4].

O coeficiente de variação em função da temperatura também pode ser definido, possibilitando a comparação do desempenho elétrico do painel fotovoltaico com o intuito de prever a resposta devido à alteração das condições climáticas. Para

isso, é fundamental determinar a temperatura de operação do módulo fotovoltaico [4].

O coeficiente de variação da potência máxima com a temperatura (γ) é encontrado pela Equação (1). Este coeficiente é um valor que quantifica a variação de potência máxima de uma placa fotovoltaica em função da variação de temperatura desta placa, sendo um valor típico para um módulo de c-Si -0,5 %/°C [4].

$$\gamma = \frac{\Delta P_{\text{MP}}}{\Delta T} \tag{1}$$

Onde ΔP_{MP} é a variação da potência máxima e ΔT é a variação de temperatura na célula. A Fig. 1 ilustra o comportamento da potência gerada do módulo de c-Si em relação ao aumento da temperatura de operação.

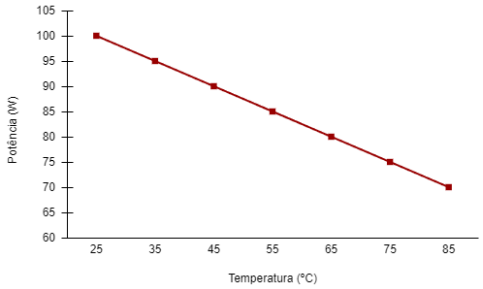


Fig. 1. Influência do aumento da temperatura de operação sobre a potência do módulo de c-Si.

A partir da Fig. 1, é possível observar que a potência gerada depende de forma direta da temperatura de operação, pois com o aumento da temperatura influencia negativamente o material da célula, causando a queda da potência gerada e, consequentemente, a diminuição da eficiência elétrica. Sendo um gráfico linear especificadamente para o módulo de c-Si [5].

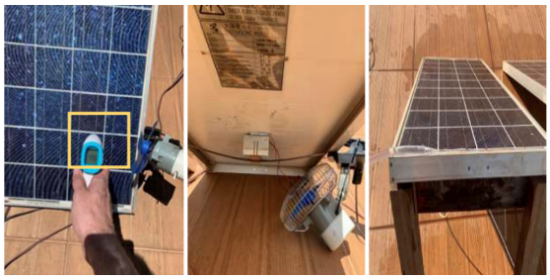
Este comportamento levanta a tese de que sistemas de resfriamento para placas fotovoltaicas possam ser viáveis. Isto porque, ao reduzir a temperatura nas placas, a eficiência das mesmas aumenta, consequentemente aumentando a geração de energia elétrica. Desta forma, a próxima seção apresenta uma revisão de estudo de sistemas de resfriamento de placas, na busca do incremento de eficiência.

C. Métodos de Resfriamento Para Placas Fotovoltaicas

Como visto, a eficiência das placas fotovoltaicas está ligada de forma direta à temperatura da sua superfície. Nesse caso, é muito importante o controle da temperatura da placa fotovoltaica. Para esse controle, podem ser utilizadas duas técnicas de resfriamento, classificadas como passivas ou ativas, com o objetivo de melhorar o desempenho do sistema, reduzindo a temperatura das placas fotovoltaicas e, consequentemente, aumentando a eficiência [6].

A técnica utilizada em sistemas passivos é a troca de calor por convecção livre. Nesse caso, são utilizados tubos ou dissipadores de calor e o fluido utilizado nesse sistema é o ar. Nesse caso, os dissipadores são acoplados sob a placa, como, por exemplo, aletas. Para os sistemas ativos, a técnica utilizada é a convecção forçada. Nesse caso, é utilizado um sistema de bombeamento do fluido (ar, água, entre outros), podendo incluir elementos adicionais como ventilação forçada e bomba d'água. Nesse caso, pode ser acoplado sob a placa uma serpentina por onde passará o fluido, mas, para isso, será consumida energia elétrica para fazer o bombeamento desse fluido. Esse consumo de energia varia de acordo com a vazão, tipo do fluido, entre outros parâmetros [7].

Há diversos estudos envolvendo resfriamento de placas fotovoltaicas, sendo um exemplo o estudo realizado por MELLO (2021). Ele avaliou o desempenho de quatro metodologias para resfriamento das placas: 1º) Ventilação forçada na parte frontal, 2º) Ventilação forçada na parte traseira, 3º) Resfriamento com célula Peltier e 4º) Aplicação de lâmina de água. A Fig. 2(a), (b) e (c) apresenta esses sistemas projetados [8].



(a) (b) (c)

Fig. 2. Sistema de resfriamento projetado. (a) Ventilação forçada na parte frontal (b) Célula Peltier (c) Lâmina de água

Os dados foram coletados e armazenados em planilhas dentro de um intervalo de sete horas. Os principais resultados obtidos pelo autor podem ser observados na Fig. 3. A energia gerada representa o aumento da mesma em relação ao caso sem resfriamento.

Sistema de Resfriamento	Ventilação Frontal	Ventilação Posterior	Célula Peltier	Lâmina de Água
Diferença de Temperatura	11ºC	-	33ºC	26ºC
Energia Gerada	2,16%	0,17%	2,30%	4,09%

Fig. 3. Resultados obtidos por diferentes sistemas de resfriamento.

A partir do estudo realizado pelo autor, ficou evidente a funcionalidade para diminuir a temperatura da célula e, principalmente, o benefício no aumento da eficiência em ambos os métodos utilizados. Também ficou evidente que todos os métodos utilizados ainda estão sendo aplicados em pequena escala, devido a não ter um método que se destaque como o melhor e seu custo para a implementação em grande escala.

III. Proposta e Metodologia

Este trabalho tem como proposta o desenvolvimento de uma metodologia de análise do impacto do resfriamento de placas fotovoltaicas. Com o intuito de avaliar as consequências que o método de resfriamento proposto causa nos parâmetros elétricos das placas, serão calculadas e analisadas as variações

dos parâmetros dessas placas fotovoltaicas em função da temperatura, e serão comparados esses resultados com os parâmetros dessas placas sem o resfriamento. Além da análise técnica/elétrica, também será avaliada a questão financeira do método de resfriamento proposto. Para isso, será calculado o payback de forma simples e superficial, onde será possível entender a viabilidade econômica do sistema de resfriamento que foi incrementado nas placas fotovoltaicas. O método que será aplicado para realizar a análise consiste em fazer a aquisição de dados elétricos e climáticos para placas com e sem sistemas de resfriamento. Esses dados são processados e traçadas curvas, calculado o indicador e ainda o payback dos sistemas. O fluxograma apresentado na Fig. 4 ilustra tal metodologia.

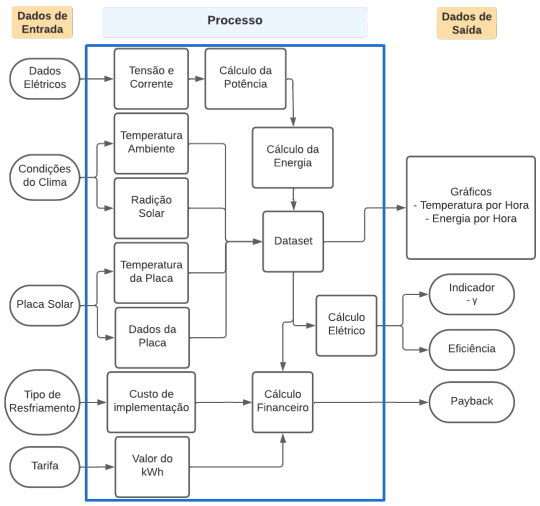


Fig. 4. Fluxograma da metodologia.

A partir da Fig. 4, é possível observar que o fluxograma está dividido em três partes, onde constam os dados de entrada, o processo e os dados de saída. Primeiramente, são coletados os dados de entrada, sendo eles: Os dados elétricos, as condições do clima, informações da placa solar, o tipo de resfriamento adotado nesse sistema e a tarifa.

Com esses dados coletados, é possível começar a executar o processo. Para isso, é realizado o cálculo da potência que está sendo gerada e o cálculo da energia. Os resultados são armazenados junto com os outros dados em um dataset para ter uma maior organização e um maior entendimento deles. Juntamente com o processo, é realizada a análise financeira.

Após realizar o armazenamento das informações, é possível obter os dados de saída desse fluxograma. Eles são utilizados para comprovar e quantificar o quanto de incremento de eficiência elétrica haverá com o sistema de resfriamento proposto para as placas solares em relação às placas sem o resfriamento. São obtidos gráficos com o intuito de visualizar o aumento da eficiência elétrica, bem como a energia gerada, mas também obter os resultados dos cálculos elétricos, obtendo os valores de eficiência e o indicador de potência. Por fim, observar o resultado do payback, com base no investimento para a implantação e o incremento de geração.

A. *Dados Elétricos*

Os dados elétricos têm um papel fundamental, pois a partir desses valores coletados nos dois sistemas, um com resfriamento da placa solar e o outro sem o resfriamento (caso base), é possível observar/analisar a quantidade de energia obtida através do cálculo da energia e gerar o gráfico dessa energia no tempo. A Fig. 5 representa como foi realizada a coleta dos dados elétricos.

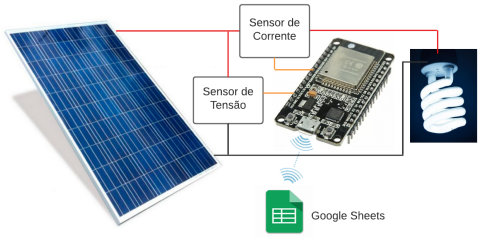


Fig. 5. Sistema para coleta dos dados elétricos.

Para a leitura da corrente, foi utilizado um sensor ACS712. A leitura da tensão das placas foi feita com um divisor de tensão, projetado para reduzir a tensão do painel solar em dez vezes, evitando danos ao equipamento de medição. A coleta dos dados foi realizada com um microcontrolador ESP-32, equipado com um módulo WiFi, permitindo armazenar os dados em um dataset (Google Excel) com uma frequência de amostragem de 3 minutos.

A partir da Fig. 6, é possível observar o template do dataset, onde todos os dados ficam alocados de forma organizada, possibilitando o fácil entendimento e manipulação desses dados.

DATA	Temperatura Superior	Temperatura Central	Temperatura Inferior	Tensão	Corrente	Temperatura Ambiente
2024/02/28 07:01:19	23,98	22,67	24,23	12,12	0,28	24,16
2024/02/28 07:05:22	23,98	22,67	24,23	12,12	0,31	24,23
2024/02/28 07:08:32	23,91	22,67	24,16	12,18	0,26	24,1
2024/02/28 07:11:41	23,91	22,67	24,23	12,59	0,45	24,16
2024/02/28 07:14:51	24,04	22,85	24,35	12,6	0,42	24,29
2024/02/28 07:18:04	24,1	22,92	24,41	12,57	0,35	24,29
2024/02/28 07:21:14	24,1	22,92	24,41	12,51	0,35	24,29
2024/02/28 07:24:23	24,23	23,04	24,48	12,27	0,41	24,41
2024/02/28 07:27:32	24,29	23,16	24,6	12,48	0,41	24,48
2024/02/28 07:30:46	24,48	23,35	24,79	12,34	0,53	24,6
2024/02/28 07:33:54	24,54	23,41	24,91	12,29	0,48	24,66
2024/02/28 07:37:03	24,79	23,66	25,16	12,47	0,67	24,73

Fig. 6. Dataset.

A partir dos dados elétricos alocados no dataset, é possível calcular a eficiência elétrica (η), Equação (2).

$$\eta = \frac{Ganho_{dia}}{Energia_{base}} 100\% \tag{2}$$

Onde $\text{Ganho}_{\text{dia}}$ é o ganho de energia gerado por dia e a $\text{Energia}_{\text{base}}$ é a energia diária gerada pela placa sem resfriamento.

Também é possivel calcular o coeficiente horário da variação da potência máxima com a temperatura ($\gamma_{\text{horário}}$) através da Equação (3).

$$\gamma_{\text{horário}} = \left(\frac{Ganho\ \ Pot._{\text{horário}}}{Diferença\ \ de\ \ Temp._{\text{horário}}}\right)\left(\frac{100\%}{Pot._{nominal}}\right) \quad (3)$$

Onde Ganho Pot.$_{\text{horário}}$ é o ganho de potência média horária, Diferença de Temp.$_{\text{horário}}$ é a diferença de temperatura média horária e Pot.$_{\text{nominal}}$ é a potência nominal da placa fotovoltaica em condições de teste padrão (STC), que para esse estudo é de 100 Watt pico (Wp).

Por fim, para obter o coeficiente de variação da potência máxima com a temperatura (γ), é realizado o somatório do coeficiente horário da variação da potência máxima com a temperatura ($\gamma_{\text{horário}}$) das horas analisadas dividido pelo número de horas analisadas no dia, Equação (4).

$$\gamma = \frac{\sum \gamma_{\text{nº horas}}}{\text{nº horas}} \quad (4)$$

B. Condições do Clima

As condições do clima são dados de extrema importância para a geração de energia elétrica envolvendo as placas fotovoltaicas, pois dependendo das condições que a placa está exposta, isso vai interferir diretamente na sua geração de energia e também na temperatura de operação dessas placas. Com isso, há três parâmetros cruciais a se monitorar, sendo eles: A temperatura ambiente, a temperatura de operação da placa com e sem resfriamento e a radiação solar.

Para a leitura da temperatura ambiente, foi utilizado um sensor DHT11, enquanto três sensores DS18B20 foram fixados na parte posterior de cada placa para medir a temperatura em condições de operação. Ambos os sensores foram conectados ao microcontrolador ESP32, que armazena os dados no dataset via WiFi. Os dados de radiação solar foram coletados pela estação meteorológica da Universidade Federal de Santa Maria, campus Cachoeira do Sul (UFSM-CS).

C. Placa Solar

Foram utilizadas duas placas, uma delas foi usada como caso base, enquanto a outra foi equipada com os tipos de resfriamento propostos de forma individual. A partir dos valores coletados nos dois sistemas, foi possível observar/analisar a variação da eficiência e do indicador obtido através de cálculos. Essas placas fazem parte da bancada de geração distribuída disponível no laboratório de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria, campus de Cachoeira do Sul (UFSM-CS). São placas policristalinas RSM-100P (100 W) com eficiência de até 15,44 % da empresa Resun Solar e com dimensões de 102 x 67 x 3 cm.

D. Tipo de Resfriamento

São estudados três tipos de resfriamento, onde um tipo de resfriamento é passivo e dois ativos, sendo eles: Resfriamento por aletas, resfriamento por serpentina de água e resfriamento por lâmina de água. Para cada tipo de resfriamento, foi realizada a coleta dos dados em dias diferentes e durante vários dias, sempre consumindo o máximo da energia fornecida pelo painel.

Primeiramente, foi estudado o método de resfriamento passivo por aletas, onde são adicionadas aletas na parte posterior da placa fotovoltaica para aumentar a área de transferência de calor por convecção do ar. As aletas foram construídas através de chapas com dimensões de 100 x 15 x 0,04 cm. Onde elas foram modeladas em formato de L, sendo 5 cm para a fixação na estrutura e 10 cm para a aleta e no comprimento necessário para encaixar na parte posterior da placa fotovoltaica. Essas aletas foram distribuídas de forma ordenada na parte posterior da placa fotovoltaica, sendo no total 8 aletas, 2 para cada coluna de células fotovoltaicas. O projeto teve 6 aletas com comprimento de 95 cm e 2 aletas com comprimento de 81 cm. Após a construção das aletas, foram fixadas através de rebites em uma chapa de alumínio com dimensões iguais a 97 x 60 x 0,04 cm, que serve de estrutura/base para as mesmas. Por fim, para ajudar na fixação da estrutura de alumínio na placa fotovoltaica e também ajudar na transferência/dissipação do calor da placa para a estrutura com as aletas, foram passados 100 gramas de pasta térmica Implastec entre a estrutura e a placa fotovoltaica, Fig. 7.

Fig. 7. Resfriamento por aletas.

O segundo método de resfriamento que foi estudado é o ativo por serpentina de água, onde consiste em adicionar uma serpentina na parte posterior da placa, através dela vai circular a água. A serpentina foi construída a partir de um tubo de alumínio flexível com dimensões iguais a 1000 cm de comprimento e 1,27 cm de diâmetro externo. A mesma foi distribuída de forma ordenada na estrutura, onde foi fixada através de abraçadeiras. Por fim, também foi utilizada pasta térmica entre a estrutura e a placa fotovoltaica, Fig. 8.

Fig. 8. Resfriamento por serpentina de água.

O terceiro método de resfriamento que foi estudado é o ativo com lâmina de água, onde consiste em jogar água na parte

frontal da placa através de algum equipamento, por exemplo, mangueira, cano, sprinkler, entre outros. Nesse caso, é usado um cano PVC com dimensões iguais a 100 cm de comprimento e 2 cm de diâmetro, sendo modelado com perfurações ordenadas ao decorrer dele, com distância de 1,5 cm entre elas (43 perfurações). Mas foi necessário tampar algumas perfurações com fita devido ao excesso de perfurações. Foram tampadas de forma estratégica, para que ela formasse a lâmina de água mais perfeita possível, resultando em 37 perfurações no total para os testes práticos. Por fim, esse cano PVC tem seu ponto de fixação na lateral da placa fotovoltaica através de uma cantoneira de alumínio em formato de L, isso se repete em ambos os lados, Fig. 9. Para evitar o desperdício de água e coletá-la após passar pela placa fotovoltaica, foi adicionado uma calha na parte inferior da mesma, onde a água foi armazenada.

Fig. 9. Resfriamento por lâmina de água.

E. Tarifa

A tarifa de energia é fundamental para a realização do estudo, pois, assim como o custo de implementação do resfriamento proposto, o valor do kWh (fornecido pela concessionária de energia) também está totalmente ligado ao cálculo do payback, Equação (5).

$$Payback = \frac{Custo_{resfriamento}}{Economia_{anual}} \tag{5}$$

Onde é utilizado o custo de implementação do tipo de resfriamento pelo valor da economia anual. Após realizar o cálculo do payback para os três tipos de resfriamento, cada caso separadamente, é possível identificar quanto tempo leva para ter o retorno do valor investido no resfriamento das placas fotovoltaicas.

IV. Resultados

Nos testes de ambos os métodos de resfriamento, foram utilizadas duas placas fotovoltaicas, sendo uma o caso base, sem resfriamento, e a outra equipada com o resfriamento. Ambas as placas têm a mesma inclinação de 15º e a mesma orientação de 15º Norte. Ambos os dados de inclinação e orientação foram baseados nas placas fotovoltaicas da usina solar localizada na UFSM-CS. Ambos os testes para ambos os métodos de resfriamento são de 12 horas por dia, das 7 às 19 horas.

Para realizar a coleta dos dados, foi utilizado dois sistemas de medição idênticos, um para cada placa fotovoltaica, Fig. 10.

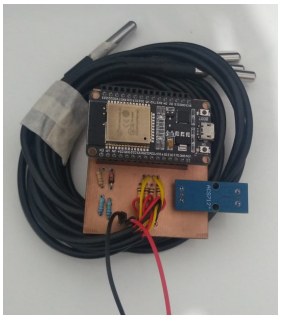


Fig. 10. Sistema de medição.

Outros equipamentos também foram utilizados para auxiliar na realização dos testes práticos, sendo eles: Controlador de carga solar - Kajia (MPPT), bateria estacionária Freedom de 12 V, termostato, timer e, como carga, foram utilizadas duas lâmpadas incandescentes em paralelo, totalizando 200 W.

Para a coleta dos dados dos resfriamentos, foram padronizados os estudos de caso. Sendo a exceção o resfriamento das aletas de forma passiva (apenas aletas); com intuito de aprofundar os estudos no sistema de resfriamento com aletas, foi proposto adicionar a ventilação forçada a esse método, simulando locais com boa exposição e constância do vento. Resfriamento com a bomba de água/ventilador ligado por 12 horas; resfriamento com a bomba de água/ventilador ligando às 10 horas e desligando às 14 horas pelo timer; resfriamento com a bomba de água/ventilador ligando quando a parte central da placa atingisse 40 ºC e desligando quando a mesma atingisse 35 ºC pelo termostato. Foram realizados no total 23 dias de ensaios.

Com os dados coletados nos estudos de caso, foi possível construir os gráficos da Fig. 11.

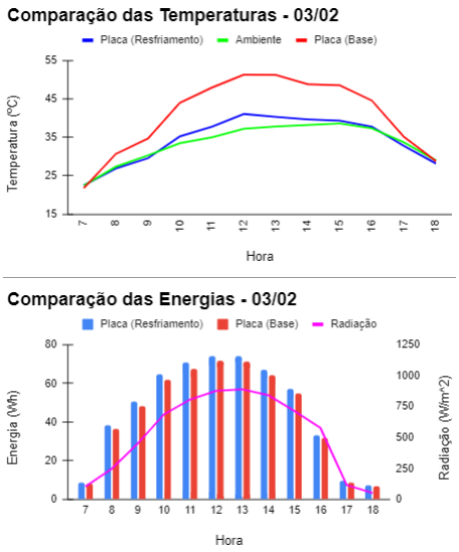


Fig. 11. Gráficos gerados com os dados coletados da lâmina de água (12h)

Para ambos os dias de análise, foram construídos esses gráficos e, com os dados dos mesmos, foi possível realizar a análise elétrica e financeira. Os resultados obtidos para ambos os métodos de resfriamento e seus estudos de caso podem ser observados na tabela da Fig. 12.

Resfriamento	Energia Média Sem Resf. (Wh/dia)	Ganho Médio (Wh/dia)	Eficiência Média (%)	Média das Diferenças de Temperaturas Médias Horárias (ºC)	Coeficiente (γ) (%/ºC)	Investimento (R$)	Economia Anual (R$/ano)	Payback
Sem Ventilador/Bomba de Água								
Aletas	385,795	7,397	1,917	-0,465	-0,508	195,7	1,917	102 anos e 1 mês
Com Ventilador/Bomba de Água (12H)								
Aletas	483,167	17,786	3,681	-2,197	-0,594	195,7	4,61	42 anos e 6 meses
Serpentina	403,624	11,208	2,777	-0,58225	-0,594	250,1	2,905	86 anos e 1 mês
Lâmina	510,189	20,01	3,922	-4,95825	-0,4	111	5,187	21 anos e 5 meses
Com Ventilador/Bomba de Água (Timer)								
Aletas	516,556	14,79	2,863	-1,86	-0,479	195,7	3,834	51 anos e 1 mês
Serpentina	509,82	11,876	2,329	-0,8295	-0,589	250,1	3,078	81 anos e 3 meses
Lâmina	462,545	13,286	2,872	-2,40167	-0,557	111	3,444	32 anos e 3 meses
Com Ventilador/Bomba de Água (Termostato)								
Aletas	517,258	15,922	3,078	-1,403	-0,53	195,7	4,127	47 anos e 5 meses
Serpentina	544,554	13,581	2,494	-1,024	-0,4	250,1	3,52	71 anos e 1 mês
Lâmina	379,446	12,545	3,306	-2,685	-0,546	111	3,252	34 anos e 2 meses

Fig. 12. Resultados de ambos os métodos de resfriamento e estudos de caso.

A partir dos dados da tabela da Fig. 12, foi possível obter algumas conclusões sobre os métodos de resfriamento. O resfriamento por lâmina de água teve os melhores resultados de eficiência e redução de temperatura nos estudos de caso, seguido das aletas com o ventilador e a serpentina, tendo a pior eficiência e redução de temperatura o resfriamento que utiliza apenas as aletas. Sendo conclusões interessantes devido ao resfriamento por lâmina de água ser o mais barato e o que utiliza a serpentina o mais caro. Com isso, o método de lâmina de água apresenta o menor payback e a serpentina o maior, com exceção do resfriamento apenas pelas aletas, devido ao seu payback ser extremamente alto. Com relação ao coeficiente de variação da potência máxima com a temperatura (γ), os métodos de resfriamento com seus estudos de caso obtiveram resultados aproximados em suas práticas. Com os coeficientes diários, foi calculada a média geral para cada resfriamento individualmente, onde resultou em um coeficiente (γ) de -0,521 %/ºC para o resfriamento por aletas, -0,544 %/ºC para o resfriamento por serpentina e -0,483 %/ºC para o resfriamento por lâmina de água.

V. Conclusão

Portanto, com a construção dos métodos de resfriamento, a obtenção dos dados e a avaliação dos mesmos no dataset para os resfriamentos e seus estudos de caso, foram obtidos os resultados do capítulo anterior e, a partir desses resultados, foram feitas as seguintes observações: A serpentina, apesar de ser o método mais caro e com maior payback, apresenta eficiência intermediária, mantendo o fluido limpo e fornecendo água quente, útil para condomínios, hotéis, regiões urbanas e placas fotovoltaicas em telhados com pouco espaço; a lâmina de água obteve a melhor avaliação, maior redução de temperatura, menor investimento e payback, além de manter a placa fotovoltaica limpa. Ideal para usinas de solo em zonas rurais; as aletas tiveram baixo desempenho e dependência do vento, resultando em menor economia e maior payback. Com ventilação forçada, superou a serpentina. Ideal para usinas de solo em locais com boa exposição e constância do vento.

Com relação aos resultados elétricos, todos os casos apresentaram resultados interessantes de incremento de eficiência, mostrando que, independente do método de resfriamento e seus estudos de caso, todos obtiveram resultados positivos no incremento de eficiência. Destacando-se com o maior incremento de eficiência, o resfriamento por lâmina de água, chegando a ter um incremento máximo de 3,922 %, seguido das aletas com ventilador, chegando a no máximo de 3,681 %, e, por fim, o resfriamento por serpentina de água, chegando a no máximo de 2,777 %. Destacando-se com o menor incremento de eficiência, o resfriamento apenas pelas aletas, com um incremento de 1,917 %. Também foram obtidos resultados interessantes para o coeficiente (γ) encontrado para cada estudo de caso, onde resultaram em valores que ficam entre -0,4 e -0,594 %/ºC entre os resfriamentos. Sendo os resultados encontrados do coeficiente (γ) para cada método de resfriamento pela média dos coeficientes diários entre -0,483 e -0,544 %/ºC. Resultando em valores extremamente interessantes, devido serem muito próximos ao seu valor teórico de -0,5 %/ºC para placas fotovoltaicas de silício cristalino, de acordo com a literatura. Com relação à parte econômica, não é viável que o consumidor final construa seu próprio método de resfriamento, sendo necessária uma análise econômica por parte do fabricante para avaliar a viabilidade e os custos de implementação em larga escala.

Referências

[1] TOLMASQUIM, M. T. Solar. In: . Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. Rio de Janeiro: EPE, 2016. p. 310–400.

[2] VILLALVA, M. G. Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações, sistemas isolados e conectados à rede. 2. ed. São Paulo: Editora Étic, 2015.

[3] SIMIONI, T. O impacto da temperatura para o aproveitamento do potencial solar fotovoltaico do Brasil. 2017. 222 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

[4] PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2014. 530 p. Acesso em 30 ago. 2023. Disponível em: ¡http://www.cresesb.cepel.br/ publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf¿.

[5] HASANUZZAMAN, M. et al. Global advancement of cooling technologies for pv systems: a review. Solar Energy, v. 137, p. 25–45, 2016.

[6] NIŽETIC, S.; GIAMA, E.; PAPADOPOULOS, A. Comprehensive analysis and general ´ economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, part ii: active cooling techniques. Energy Conversion and Management, v. 155, p. 301–323, 2018.

[7] DWIVEDI, P. et al. Advanced cooling techniques of p.v. modules: A state of art. Case Studies in Thermal Engineering, v. 21, p. 100674, 2020.

[8] MELLO, G. O. L. D. Estudo da influência da temperatura na produção de energia gerada por placas fotovoltaicas. 2021. 53 p. Dissertação (Mestrado na Área de concentração: Dispositivos) — Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso do Sul, 2021.