

ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DE ESTIMATIVA DE TEMPERATURA EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS BIFACIAIS

Aline Kirsten Vidal de Oliveira – aline.kirsten@posgrad.ufsc.br

Isadora Maciel Queiroz

Marília Braga

Ricardo Rüther

Universidade Federal da Santa Catarina, Laboratório Fotovoltaica/UFSC

Resumo. Considerando a diversidade de ambientes operacionais, variáveis ambientais como sujidade, conteúdo espectral da luz, umidade e principalmente a temperatura de operação são identificadas como contribuintes cruciais para o desempenho de sistemas fotovoltaicos (FV). Este estudo analisa o desempenho de modelos conhecidos da literatura para a estimativa de temperatura de operação em módulos bifaciais, que atualmente representam mais de 30% do mercado global de FV. Ao avaliar três principais modelos de estimativa de temperatura, Ross, Faiman e PVsyst, os resultados revelam que a resolução temporal dos dados influencia a precisão desses modelos, sendo que menores resoluções temporais geram melhores resultados. Os modelos de Faiman e PVsyst demonstram consistentemente menores erros em comparação com o modelo de Ross. Além disso, a inclusão da irradiância refletida como entrada nos modelos, através do coeficiente de bifacialidade, destaca melhorias significativas na precisão das estimativas de temperatura. Coeficientes de transferência de calor padrão, como os utilizados no PVsyst, mostram-se imprecisos para módulos bifaciais, destacando a necessidade de atualização desses valores. A análise da velocidade do vento indicou uma influência mínima, permitindo simplificações no processo sem comprometer a precisão. Para melhorar a simulação de sistemas no software PVsyst, recomenda-se a utilização de valores específicos para módulos bifaciais para os coeficientes de transferência de calor utilizados ($U_c=40$ e $U_v=0$), evitando erros significativos associados aos coeficientes padrões do PVsyst.

Palavras-chave: Módulos bifaciais, modelos de temperatura de módulos fotovoltaicos, simulação de sistemas fotovoltaicos.

1. INTRODUÇÃO

À medida que a capacidade instalada de geração fotovoltaica (FV) aumenta rapidamente em muitas partes do mundo, a atenção se volta para a confiabilidade tecnológica e o monitoramento e previsão de desempenho de sistemas. Muito ainda é desconhecido sobre o desempenho de longo prazo de sistemas FV em diferentes ambientes operacionais. No entanto, é comum saber que contribuintes específicos para o desempenho de FV, incluindo taxas de sujidade, conteúdo espectral da luz, temperatura e níveis de umidade, diferem amplamente de acordo com a localização e tecnologia de módulo empregada. Além disso, os dados nos quais as projeções de desempenho e custo nivelado de energia (LCOE) das usinas FV são baseados podem variar consideravelmente em precisão, dependendo da qualidade, calibração e manutenção dos instrumentos utilizados (Stein e King, 2013). Uma compreensão mais profunda das variáveis ambientais, e dos padrões para a coleta de dados, pode permitir uma estimativa mais precisa da geração de FV com menor incerteza. Essa é uma questão importante ao considerar o cálculo dos custos de energia e a otimização do despacho de energia na rede elétrica, bem como esforços para aumentar a confiabilidade do FV.

Dentre os fatores determinantes do desempenho do sistema FV, o efeito da temperatura de operação das células é um dos principais após a irradiância. Portanto, uma estimativa precisa da temperatura de operação do módulo é importante para a previsão do rendimento energético. Embora a temperatura do módulo seja um tópico bastante estudado, a precisão de diferentes abordagens para prever os valores de temperatura de módulos FV quando as medições de temperatura na parte traseira do módulo não estão disponíveis ainda precisa ser avaliada, especialmente em novas tecnologias fotovoltaicas como em módulos bifaciais.

Diversos modelos de temperatura de módulos FV são descritos na literatura (Ross, 1981; Faiman, 2008; Mora Segado, Carretero e Sidrach-de-Cardona, 2015). Porém, existe uma lacuna no conhecimento no que diz respeito ao desempenho desses modelos ao modelar módulos FV bifaciais. Esses módulos representam hoje mais de 30% do mercado mundial de FV e têm a tendência de continuar expandindo (VDMA, 2023). Desta maneira, analisar a precisão e confiabilidade dos modelos de estimativa de temperatura de módulos bifaciais é de extrema importância.

Este artigo tem como objetivo avaliar a precisão dos três principais modelos adotados para estimativa de temperatura de módulos FV quando aplicados a módulos bifaciais vidro-vidro de silício cristalino. Além dos modelos em si, o impacto da resolução temporal dos dados e a influência da parametrização dos modelos também são analisados. A precisão dos modelos é determinada comparando-se dados medidos de temperatura do módulo com valores estimados a partir de coeficientes e variáveis ambientais para a mesma localidade. O estudo visa contribuir para a melhoria dos modelos

adotados na estimativa de energia e desempenho de sistemas FV com módulos bifaciais, considerando-se a adoção em larga escala desta tecnologia em usinas de grande escala no mundo todo.

2. METODOLOGIA

2.1 Usina Piloto

Esse trabalho se concentra na análise do comportamento e modelagem da temperatura de módulos bifaciais monocristalinos, tendo como objeto de estudo uma planta FV piloto localizada na cidade de Florianópolis/SC (27,43°S, 48,44°O). A localidade do estudo apresenta clima subtropical úmido de acordo com a classificação de Köppen (Peel, Finlayson e McMahon, 2007). A planta piloto, apresentada na Fig. 1, possui capacidade instalada de aproximadamente 100 kWp, divididos em seis sistemas, sendo um deles composto por módulos de telureto de cádmio (CdTe) e os demais por módulos bifaciais de silício cristalino (c-Si). Os sistemas foram instalados em diferentes tipos de solo, visando a análise do ganho energético proporcionado por solos com diferentes albedos. Este trabalho se concentra na análise do subsistema instalado sobre o solo de areia, destacado na Fig. 1, o qual possui um albedo de 0,41 de acordo com campanha de medição realizada *in loco*.

O subsistema analisado está instalado em um rastreador de um eixo e possui 26 módulos divididos em duas *strings*, totalizando 16,77 kWp. Os módulos bifaciais vidro-vidro de silício monocristalino tipo PERC são de fabricante *Tier 1* com 645 Wp de potência individual.



Figura 1 – Imagem aérea da usina fotovoltaica piloto localizada na sede do laboratório Fotovoltaica/UFSC em Florianópolis-SC (27,43°S, 48,44°O) com destaque para o subsistema analisado neste trabalho. O Norte está apontado aproximadamente para o canto inferior esquerdo da imagem.

2.2 Instrumentação

Na instrumentação deste estudo, foram utilizados dois termorresistores PT1000 classe A com medição a 4 fios para a registro da temperatura na face posterior dos módulos, indicados na Fig. 1 como T1 e T2. Os sensores foram fixados na superfície do módulo fotovoltaico por meio de uma fita adesiva dupla face fornecida pelo fabricante do sensor e são cobertos por uma fita adesiva aluminizada, como mostra a foto da Fig. 2a. Medidas foram tomadas de modo a reduzir o sombreamento na parte posterior módulo ao máximo, conforme a normativa técnica IEC 61724:2021 - *Photovoltaic system performance - Part 1: Monitoring* (International Electrotechnical Commission, 2017). Imagens termográficas foram realizadas para garantir que nenhum ponto quente foi formado em razão da instalação do sensor.

Além disso, o sensor EE08-SS foi utilizado para monitoramento da temperatura ambiente e o anemômetro Gill WindSonic para registro a velocidade do vento em altura próxima a dos sistemas FV da planta piloto (medida a 2 m e sistemas FV a 1,5 m do solo). Sensores instalados ao longo dos rastreadores medem a irradiância incidente no plano dos módulos, tanto frontal, quanto posterior, através de células de referência (IMT Si) e piranômetros classe A (EKO MS-80S), como mostrado na Fig. 2b e na Fig. 2c. A taxa de amostragem e o intervalo médio desses dados foram configurados para 1 segundo e 1 minuto, respectivamente. A coleta de dados ocorreu de outubro de 2022 a outubro de 2023.

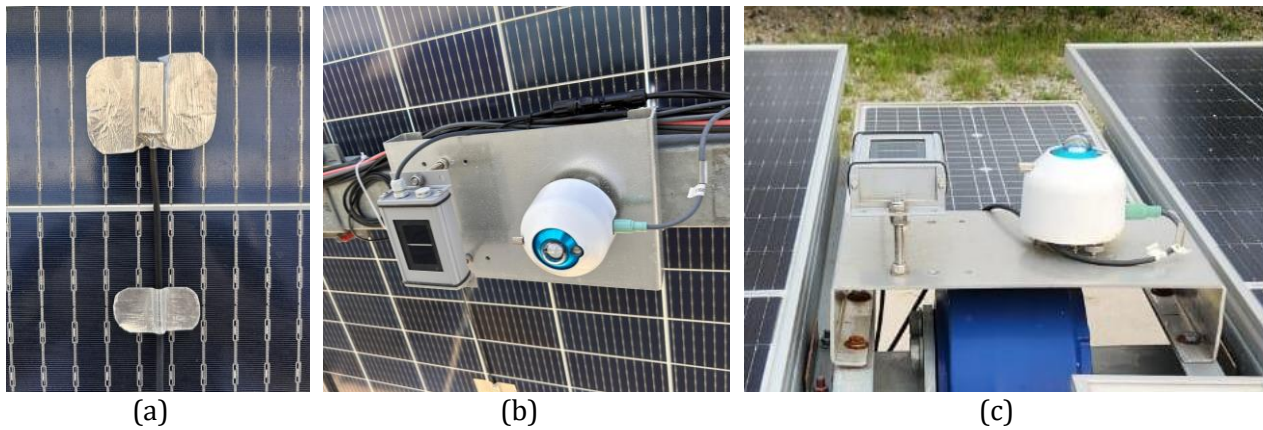


Figura 2 – Imagens dos sensores utilizados no experimento: (a) sensor de temperatura do módulo; (b) célula de referência e piranômetro para medição de irradiação refletida no solo; e (c) célula de referência e piranômetro para medição de irradiação no plano do módulo.

2.3 Tratamento de dados

A qualidade e confiabilidade dos dados foi garantida por filtros, excluindo dias de desligamento para manutenção, substituição de módulos e eventos extremos como ciclones. Os filtros utilizados buscaram atender às seguintes condições:

- Foram utilizados dados dentro da faixa horária das 7:00 às 17:30;
- Dias são considerados válidos quando possuem no mínimo 80 pontos de dados em horários válidos;
- É crucial garantir simultaneidade nos dados registrados para todas as variáveis no ponto de análise.

As lacunas de dados resultantes foram preenchidas utilizando as redundâncias de medições do sistema. Para os dados de irradiação, os dados do piranômetro foram priorizados, sendo substituídos por dados da célula de referência corrigidos por regressão linear quando necessário. Na ausência de dados em ambos os sensores, dados de irradiância global horizontal provenientes da estação solarimétrica (Mantelli, Martins e Ruther, 2019) instalada próxima à usina piloto foram transpostos para o plano do rastreador utilizando sua angulação medida. Para os dados de temperatura, foram utilizadas as médias entre os sensores T1 e T2 (Fig. 1), sendo que os dados de apenas um deles é utilizado quando o outro não está disponível. Uma estimativa baseada na correlação entre os demais sensores e uma regressão foi empregada quando nenhum dos dois sensores está disponível.

2.4 Modelos de estimativa de temperatura de operação

Este estudo tem como propósito a comparação entre dados medidos de temperatura de operação de módulos FV bifaciais, provenientes do Laboratório Fotovoltaica-UFSC, e resultados dos modelos de estimação de temperatura de Ross, Faiman e o empregado no *software* de simulação PVsyst. O objetivo desta comparação é analisar a precisão desses modelos aplicados a módulos bifaciais. Os modelos foram implementados utilizando a biblioteca PVLlib em Python (Holmgren, Hansen e Mikofski, 2018). Vale destacar, que estes modelos não foram originalmente desenvolvidos para módulos bifaciais. Para avaliação da compatibilidade deles com a nova tecnologia, os cálculos foram realizados em dois cenários diferentes, para fins de comparação:

- $G = G_{POA}$: os dados de irradiância utilizados (G) são os medidos no plano do módulo (G_{POA}) (Fig. 2c);
- $G = G_{POA} + b * G_{Ref}$: os dados de irradiância utilizados (G) são os medidos no plano do módulo somados à irradiância refletida (G_{Ref}) (Fig. 2b) multiplicados pelo fator de bifacialidade do módulo (b), fornecido pelo fabricante em seu *datasheet* como sendo de 70 %.

A seguir os modelos de estimativa de temperatura de módulos FV utilizados são detalhados.

Modelo de Ross. O Modelo de Ross (Ross, 1981), uma abordagem mais tradicional, foi empregado utilizando a Eq. (1) a seguir.

$$T_R = T_a + \left[\frac{NOCT - 20}{80} \right] \times G \quad (1)$$

Na equação, temos que:

- T_c é a temperatura da célula em °C;

- T_a é a temperatura do ar em °C;
- NOCT é a Temperatura Nominal de Operação da Célula em graus Celsius (neste trabalho, foi utilizada a temperatura de 37,6 °C);
- G é a irradiância incidente no plano dos módulos em mW/cm².

Modelo Faiman. O Modelo de Faiman utiliza um modelo empírico de fator de perda de calor (Faiman, 2008) e é adotado nas normas IEC de desempenho. A Eq. (2) correspondente é definida a seguir.

$$T_F = T_a + \left[\frac{G}{U_0 + U_1 v} \right] \quad (2)$$

Onde:

- T_F é a temperatura do módulo em °C;
- T_a é a temperatura do ar em °C;
- v é a velocidade do vento em m/s;
- G é a irradiância incidente no plano dos módulos em W/m²;
- U_0 é o coeficiente da dissipação de calor do módulo em W/m²K;
- U_1 é o coeficiente que contabiliza o impacto do vento em W/m³K.

U_0 e U_1 são coeficientes que dependem do tipo de montagem do sistema e são calculados através de uma regressão linear usando dados medidos de irradiância, temperatura ambiente e do módulo. Este procedimento é seguido neste estudo e os coeficientes são calculados para cada variação do intervalo de tempo.

Modelo PVSyst. O modelo de temperatura da célula utilizado no *software* PVSyst (PVSyst, 2023) possui estrutura similar ao modelo de Faiman com parâmetros adicionais de eficiência e absorção, como definido na Eq. (3).

$$T_P = T_a + \left[\frac{\alpha G (1 - \eta_m)}{U_c + U_v v} \right] \quad (3)$$

Onde:

- T_P é a temperatura do módulo em °C;
- T_a é a temperatura do ar em °C;
- v é a velocidade do vento em m/s;
- G é a irradiância incidente no plano dos módulos em W/m²;
- U_c é o coeficiente constante da perda de calor do módulo em W/m²K;
- U_v é o coeficiente que contabiliza o impacto do vento na perda de calor em W/m³K;
- α é o coeficiente de absorção da irradiância solar, com valor padrão de 0,9.
- η_m é a eficiência do módulo fotovoltaico. Neste trabalho, a eficiência utilizada é a fornecida pelo fabricante em seu *datasheet* para STC sem ganho bifacial (padrão) 20,8 %.

Como no caso de Faiman, U_c e U_v podem ser calculados através de uma regressão linear usando dados medidos de irradiância, temperatura ambiente e do módulo. Por padrão, o *software* define U_v como zero, considerando a disponibilidade extremamente limitada de dados de velocidade do vento de alta frequência e de boa qualidade, e que este parâmetro é geralmente medido em altitudes mais elevadas e em ambiente aberto, não sendo representativo do ambiente operacional de um sistema fotovoltaico. Neste trabalho, para fins de comparação, diferentes coeficientes foram avaliados:

- U_c e U_v calculados através da regressão linear dos dados medidos. Neste caso, as temperaturas obtidas são iguais às do modelo de Faiman (Anderson, Kemnitz e Boyd, 2021);
- $U_v=0$ e U_c calculado através da regressão linear dos dados medidos, a fim de avaliar o impacto da velocidade do vento na estimativa de temperatura do *software*;
- $U_c=29$ e $U_v=0$, valores recomendados pelo PVSyst para sistemas instalados em estruturas em solo;
- $U_c=40$ e $U_v=0$, valores sugeridos por fabricantes para simulação de módulos bifaciais vidro-vidro.

2.5 Métricas de avaliação

A avaliação da precisão dos métodos e a comparação entre eles são realizadas por meio das métricas do Erro Médio Absoluto (MAE) e do Erro Quadrático Médio (RMSE). O cálculo destes erros é feito comparando-os com os dados de temperatura medidos em campo. Os dados são avaliados para resoluções de 15, 30 e 60 minutos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar o desempenho dos modelos de estimativa de temperatura dos módulos com dados de diferentes granularidades, os métodos foram aplicados em dados com diferentes resoluções temporais, como mostram os resultados da Tab. 1. Nesta análise, os coeficientes de temperatura dos modelos de Faiman e PVsyst foram calculados através de regressão linear, gerando estimativas idênticas de temperatura, por isso são apresentados de forma conjunta.

Tabela 1 – Resultados de MAE e RMSE para os modelos de temperatura para 15, 30 e 60 minutos. Os melhores resultados de cada modelo são destacados em negrito.

Erros (°C)	Ross			Faiman/PVsyst		
	15 min	30 min	60 min	15 min	30 min	60 min
MAE	2,06	2,00	1,94	2,02	1,96	1,91
RMSE	3,20	3,11	3,00	3,13	3,04	2,94

A análise mostra que os modelos analisados apresentam melhores resultados (menores erros) para resoluções temporais mais baixas (intervalos maiores entre pontos), o que é esperado considerando a natureza de estado de equilíbrio dos modelos. Contudo, o aumento da resolução temporal dos dados não impactou significativamente os erros obtidos, principalmente para o método empregado em simulações de sistemas FV. Esta comparação, contudo, foi realizada com o cálculo dos coeficientes de transferência de calor através de regressão linear para a mesma resolução temporal e considerando-se a velocidade do vento, o que não são as condições padrão utilizadas no PVsyst. O modelo de Faiman apresentou os menores erros entre os modelos, para todas as resoluções. A baixa diferença entre os valores de MAE e RMSE indica que os erros não são uniformes, porém os dados de temperaturas estimadas não apresentam muitos *outliers*.

A Fig. 3 apresenta uma comparação entre as temperaturas dos módulos medidos e modelados com os modelos de Ross e Faiman com diferentes resoluções temporais (15 e 60 minutos) em um dia parcialmente nublado. Para a maior resolução temporal (15 min), os modelos estimam variações maiores de temperatura do que os dados medidos demonstram, devido às rápidas variações na irradiância e velocidade do vento, que são dados de entrada para os modelos. Isso acontece pois os modelos não consideram a inércia térmica dos módulos entre os intervalos de tempo. À medida que o passo de simulação se torna maior, as variações nos dados de entrada do ambiente são suavizadas, tendo assim um impacto menor na temperatura prevista.

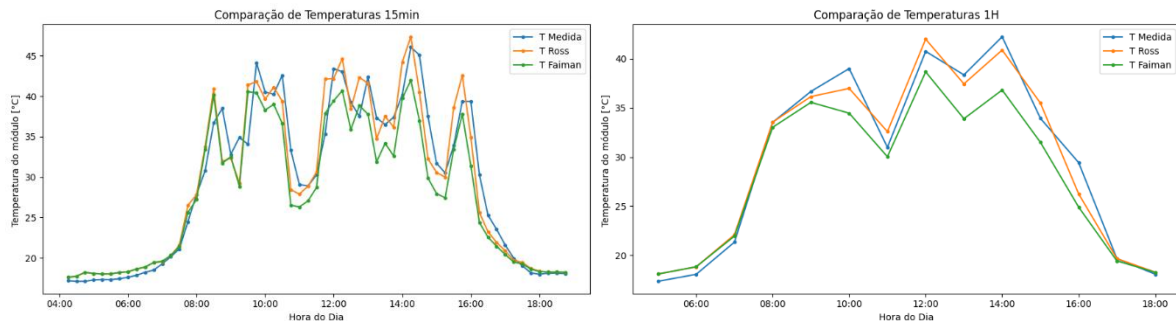


Figura 3 – Temperaturas medidas e estimadas com os modelos Ross e Faiman no dia 01/10/2023 com dados em diferentes resoluções temporais: 15 minutos (esquerda) e 60 minutos (direita).

Outra comparação realizada, refere-se ao efeito da inclusão da irradiância refletida como entrada nos modelos de predição de temperatura, realizada através do coeficiente de bifacialidade (Seção 2.4). A Tab. 2 mostra os resultados obtidos para esta análise.

Tabela 2 – Resultados de MAE para os modelos de temperatura para dados de 15, 30 e 60 minutos, avaliando o efeito da inclusão da irradiância refletida pelo solo como entrada dos modelos. Os melhores resultados de cada modelo são destacados em negrito.

MAE (°C)	Ross			Faiman/PVsyst		
	15 min	30 min	60 min	15 min	30 min	60 min
$G = G_{POA}$	2,06	2,00	1,94	2,02	1,96	1,91
$G = G_{POA} + b * G_{Ref}$	2,10	2,03	1,97	1,96	1,90	1,85

Para o caso do modelo Ross, o uso da irradiância refletida pelo solo trouxe um impacto negativo nos resultados. Este efeito acontece pois os mesmos parâmetros da equação utilizados nas duas situações foram os mesmos, alterando-se apenas o dado de entrada da irradiação. Como tais parâmetros foram determinados para módulos antigos, monofaciais, os resultados pioram com o acréscimo da irradiação refletida. Já para os modelos Faiman e PVsyst, o impacto da alteração é positivo, já que os coeficientes de transferência de calor dos modelos foram recalculados utilizando as medições de irradiação total na regressão linear. Dessa maneira, os modelos se adaptam ao novo conjunto de dados, através da mudança de seus parâmetros. Isso faz com que o modelo seja mais fidedigno aos dados medidos, já que o efeito da irradiação refletida na temperatura está sendo considerado. Este resultado mostra que há um ganho importante na inclusão da irradiância refletida no modelo térmico usado em projeções de desempenhos de sistemas fotovoltaicos, principalmente no *software* PVsyst. Vale destacar, contudo, que os dados empregados para irradiância refletida foram medidos em campo, sendo que no *software* estes dados seriam estimados. A qualidade dos dados modelados de irradiância refletida pelo PVsyst não são objeto deste estudo, mas possuem relação direta com a precisão do método de estimativa de temperatura empregando esta variável no *software*. A Tab. 3 a seguir apresenta os coeficientes calculados através de regressão linear para os modelos Faiman e PVsyst.

Tabela 3 – Valores encontrados para os coeficientes de transferência de calor empregados nos modelos Faiman e PVsyst para diferentes resoluções temporais e cenários de irradiância considerada.

	Faiman						PVsyst					
	15 min		30 min		60 min		15 min		30 min		60 min	
	U_0	U_1	U_0	U_1	U_0	U_1	U_c	U_v	U_c	U_v	U_c	U_v
$G = G_{POA}$	41,64	4,81	41,92	4,05	41,45	4,85	30,52	3,04	29,58	3,08	29,54	3,46
$G = G_{POA} + b * G_{Ref}$	45,77	4,64	45,90	4,24	45,51	5,00	33,52	3,14	32,40	3,22	32,44	3,57

É interessante notar que os valores de constantes U_0 calculadas para o caso do modelo de Faiman são bastante superiores aos valores tidos como padrões para a estimativa (entre 24 e 27 W/m²K (Faiman, 2008)). Por outro lado, os valores de U_1 são inferiores aos valores típicos (entre 6 e 8 W/m²K (Faiman, 2008)), indicando uma menor influência do vento no conjunto de dados analisado. Para o caso do modelo PVsyst, o valor de U_c sugerido pelo *software* ($U_c=29$ W/m²K (PVsyst, 2023)) é inferior a todos os valores de U_c calculados. Para U_v , o valor sugerido pelo *software* é 0, ignorando o impacto do vento na temperatura. A fim de avaliar o efeito da velocidade do vento nos resultados, a regressão linear foi refeita, dessa vez limitando o valor de U_1 e U_v a 0. Os coeficientes calculados são mostrados na Tab. 4 a seguir.

Tabela 4 – Valores encontrados para os coeficientes de transferência de calor empregados nos modelos Faiman e PVsyst para diferentes resoluções temporais e cenários de irradiância considerada, e desconsiderando-se velocidade do vento.

	Faiman						PVsyst					
	15 min		30 min		60 min		15 min		30 min		60 min	
	U_0	U_1	U_0	U_1	U_0	U_1	U_c	U_v	U_c	U_v	U_c	U_v
$G = G_{POA}$	49,48	0	48,76	0	49,65	0	35,66	0	34,77	0	35,39	0
$G = G_{POA} + b * G_{Ref}$	53,90	0	53,06	0	53,98	0	38,83	0	37,83	0	38,47	0

Os coeficientes de transferência de calor encontrados para diferentes resoluções temporais e desconsiderando-se o vento mostram uma variação inferior a 1 W/m²K e sem tendência clara com o aumento da resolução temporal dos dados. Este resultado mostra que a modelagem térmica dos sistemas não é um fator limitante para o aumento da resolução temporal do passo de simulações até 15 min utilizando o modelo de Faiman modificado hoje empregado pelo PVsyst, mesmo que a determinação dos coeficientes seja realizada para outra resolução temporal. Este resultado é importante, pois a simulação de sistemas FV com maior resolução temporal tem aplicações importantes no setor. Claro que ainda devem ser consideradas as limitações dos demais modelos empregados na simulação, como o de decomposição das componentes da irradiância, o qual possui menor precisão para dados com maior granularidade, e sua transposição. Contudo, é possível que seja viável a redução do passo de simulação sem ônus a precisão dos resultados quando dados medidos de irradiância no plano dos módulos são empregados nas simulações.

A partir da Tab. 4, foram calculadas as previsões dos modelos analisados utilizando os diferentes coeficientes calculados, bem como valores padrões comumente utilizados nas análises no PVsyst. Os resultados são apresentados na Fig. 5. Novamente, os resultados empregando a regressão linear para o cálculo dos coeficientes resultam em resultados idênticos para o método Faiman e PVsyst, por este motivo os indicadores de erro são apresentados de forma conjunta.

Tabela 5 – Resultados de MAE e RMSE para os modelos de temperatura Faiman e PVsyst comparando diferentes estratégias para o cálculo dos coeficientes de temperatura.

	MAE (°C)				RMSE (°C)			
	Faiman/ PVsyst		PVsyst		Faiman/ PVsyst		PVsyst	
	Regressão		Valores padrão		Regressão		Valores padrão	
	U ₀ e U ₁ calculados	U ₀ calculado e U ₁ =0	U _c =29 U _v =0	U _c =40 U _v =0	U ₀ e U ₁ calculados	U ₀ calculado e U ₁ =0	U _c =29 U _v =0	U _c =40 U _v =0
$G = G_{POA}$	1,91	1,94	2,12	2,08	2,94	2,97	3,30	3,14
$G = G_{POA} + b * G_{Ref}$	1,85	1,88	2,30	1,92	2,81	2,84	3,51	2,89

Os resultados evidenciam que a velocidade do vento influencia a estimativa de temperatura, embora os erros resultantes sejam insignificantes, podendo ser negligenciados em prol da praticidade. Adicionalmente, os dados de temperatura empregados na análise foram medidos na mesma altura que o sistema FV analisado, e possuem alta qualidade; uma realidade que não é comum em projetos FV. Porém, o uso dos coeficientes padrões do PVsyst ($U_c=29$ e $U_v=0$) produzem erros significativos nos resultados de estimativas de temperatura para os modos bifaciais avaliados. Tais erros se traduzem em imprecisão nos resultados energéticos das simulações e portanto, não se recomenda o uso deste conjunto de coeficientes de transferência de calor na simulação de módulos bifaciais. Uma melhor aproximação é obtida com os valores de $U_c=40$ e $U_v=0$, que produz erros de magnitude aceitável, já que elimina a exigência de uma regressão linear com os dados medidos. Outra conclusão importante é a recomendação da contabilização da irradiância refletida para estimativa de temperatura, que ofereceu resultados melhores em quase todas as alternativas avaliadas. Até o momento da elaboração deste artigo, este método não é adotado pelo *software* PVsyst, sendo que os cálculos são realizados utilizando-se somente a irradiância no plano dos módulos.

A Fig. 4 apresenta um gráfico de dispersão dos dados medidos e estimados pelos modelos avaliados. A linha preta central apresenta os dados medidos, e as linhas coloridas mostram as regressões dos dados estimados, considerando dados de irradiância total na entrada dos modelos, incluindo a irradiância refletida pelo solo. Na elaboração do gráfico foram utilizados somente dados entre 10 e 14 h, para focar a análise nos momentos de maior interesse de geração solar e maior impacto da temperatura no desempenho do sistema. A imagem mostra que o uso dos coeficientes padrões do PVsyst ($U_c=29$ W/m²K e $U_v=0$ W/m²K), mostrado no gráfico na cor ciano, superestima muito a temperatura do módulo. O uso dos coeficientes $U_c=40$ W/m²K e $U_v=0$ W/m²K, por outro lado, reduz as temperaturas calculadas, sendo os menores valores modelados. Os modelos de Ross e Faiman/PVsyst com coeficientes calculados a partir de dados medidos, demonstram resultados muito próximos do resultado desejado, sendo que o primeiro tende a sobrestimar a temperatura e o segundo subestimar. Como o aumento da temperatura significa o aumento das perdas, a pequena superestimação do modelo de Ross é mais interessante do que os resultados subestimados dos modelos Faiman/PVsyst, para evitar a minimização das perdas estimadas e manter as estimativas de energia mais conservadoras. Além disso, o modelo de Ross tem a vantagem de ser calculado facilmente e não necessitar de dados de velocidade do vento.

A Fig. 5 reafirma as conclusões obtidas com a Fig. 4 ao apresentar um exemplo de comparação entre as temperaturas dos módulos medidos e modelados com os diferentes parâmetros de entrada dos modelos analisados com dados do dia 26/08/2023. Os valores altos de temperatura estimada para o modelo PVsyst com $U_c=29$ W/m²K se justifica pela desconsideração do efeito do vento na redução das temperaturas e pelo valor pequeno para o parâmetro U_c , que é responsável por contabilizar a perda de calor do módulo. Assim, um valor pequeno gerará menor perda de calor e logo, uma sobrestimação da temperatura. Da mesma maneira, quando comparamos os resultados do modelo Faiman/PVsyst com a realização da regressão com os dados medidos, sem e com inclusão da velocidade do vento no cálculo (na figura em verde e laranja), a exclusão do impacto da velocidade do vento nas perdas de temperatura (em verde), gera temperaturas maiores. Como mostrado na Tab. 4, o parâmetro térmico calculado para o modelo do PVsyst para o caso da regressão linear realizada sem a consideração do vento ($U_c=38,47$) é pouco inferior ao valor de $U_c=40$ mostrado lilás no gráfico. Assim, os dois casos geraram resultados bastante próximos sendo que o maior coeficiente de perdas gerou valores maiores, como esperado. O resultado demonstra a boa aproximação do coeficiente $U_c=40$ com os dados modelados, sendo possível utilizar a constante como padrão para simulações, evitando a necessidade de uma regressão com dados medidos.

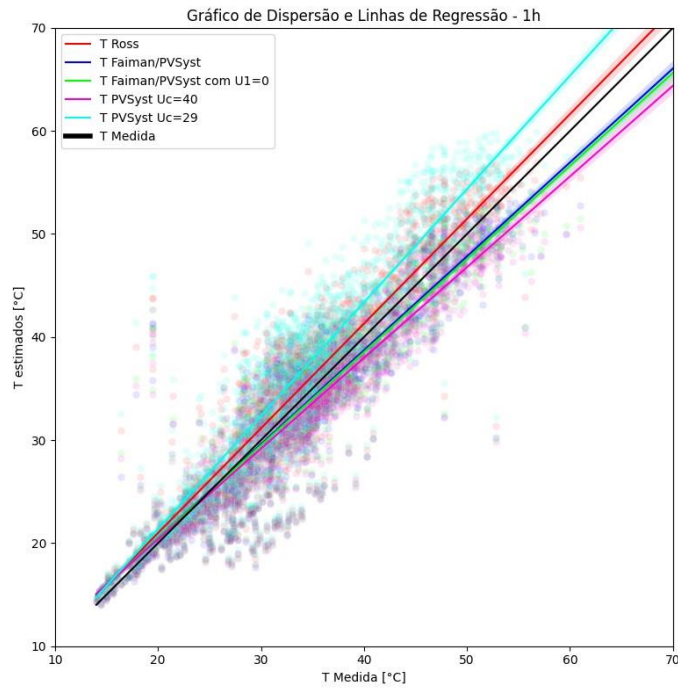


Figura 4 – Gráfico de dispersão e linhas de regressão para comparação entre dados medidos e estimados através dos modelos e coeficientes analisados.

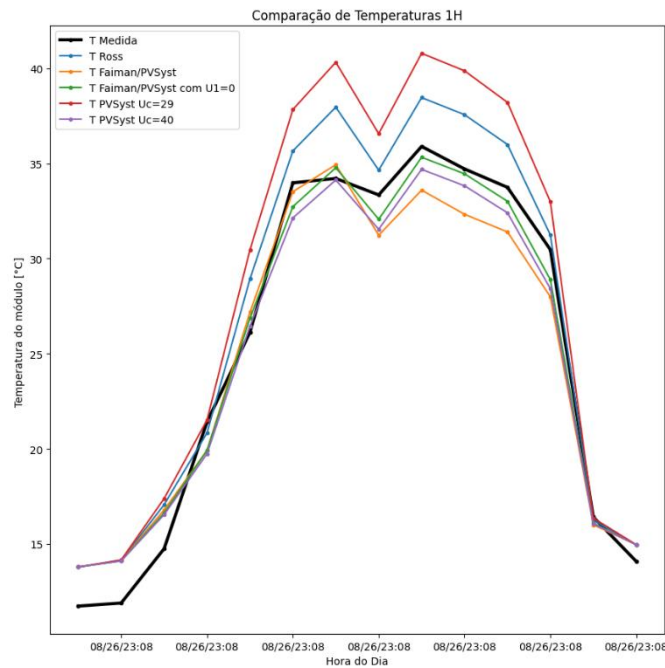


Figura 5 – Comparação entre dados medidos e estimados através dos modelos e coeficientes analisados para o dia 26/08/2023.

4. CONCLUSÃO

Este artigo buscou avaliar a precisão dos três principais modelos utilizados na estimativa de temperatura de módulos FV ao serem aplicados a módulos bifaciais vidro-vidro de silício cristalino. Além de examinar os modelos em si, foram investigados o impacto da resolução temporal dos dados e a influência da parametrização dos modelos. A avaliação da precisão dos modelos foi realizada através da comparação entre os dados medidos da temperatura do módulo e os valores estimados com base em coeficientes e variáveis ambientais para a mesma localidade. Os resultados obtidos pretendem contribuir para a otimização dos modelos empregados na previsão de energia e desempenho de sistemas FV com módulos bifaciais, considerando a crescente adoção dessa tecnologia em usinas de grande escala ao redor do mundo. Essas

conclusões reforçam a importância de aprimorar as técnicas de modelagem para garantir uma representação mais precisa e confiável do comportamento térmico dos módulos bifaciais em cenários práticos.

A avaliação do desempenho dos modelos de estimativa de temperatura para módulos FV, considerando diferentes granularidades de dados, é de extrema importância para a correta simulação e avaliação de desempenho de sistemas FV. Os resultados destacam que todos os modelos apresentam melhores resultados em resoluções temporais menores, o que é esperado considerando a natureza de estado de equilíbrio dos modelos.

Outro fator avaliado foi o uso de coeficientes padrões na modelagem de temperatura empregando o modelo Faiman modificado utilizado pelo PVsyst. Neste caso, os valores padrão sugeridos para simulação de sistemas em solo e com livre circulação de ar resultou em temperaturas muito acima das medidas, o que resulta em perdas exageradas por temperatura em simulações de módulos bifaciais instalados em rastreadores solares, configuração mais empregada em novas usinas FV de grande escala no Brasil. O uso de uma constante da perda de calor do módulo recomendada por fabricantes de módulos FV para simulação de módulos bifaciais, por outro lado, resultou em subestimativas da temperatura do módulo, o que causaria uma estimativa de geração demasiadamente otimista para o sistema FV. Estes resultados mostram a necessidade de atualização dos valores sugeridos pelo software para simulação de módulos bifaciais.

A análise específica da influência da inclusão da irradiância refletida no solo como entrada nos modelos revelou efeitos distintos para o modelo Ross e os modelos Faiman/PVsyst. Enquanto o modelo Ross apresentou impacto negativo, os modelos Faiman/PVsyst mostraram melhorias, ajustando-se aos novos dados de irradiação total. Os coeficientes de transferência de calor recalculados refletem essa adaptação, sendo crucial notar que os valores obtidos para o modelo de Faiman com irradiância refletida diferem dos padrões convencionais. Este resultado mostra que há um ganho importante na inclusão da irradiância refletida no modelo térmico do *software*.

Por fim, a análise da velocidade do vento na estimativa de temperatura demonstrou influência mínima, permitindo a simplificação do processo sem comprometer a precisão, como já recomendado pelo *software* PVsyst para módulos monofaciais. No entanto, a utilização dos coeficientes padrões do PVsyst resultou em erros significativos para módulos bifaciais, destacando a importância de ajustar esses parâmetros. Recomenda-se a utilização de $U_c=40$ e $U_v=0$ para uma melhor aproximação, eliminando a necessidade de regressão linear com os dados medidos.

O estudo realizado oferece *insights* valiosos para aprimorar a precisão dos modelos de estimativa de temperatura, considerando diferentes variáveis e ajustes. Em razão disso, estudos futuros irão ampliar a análise realizada considerando outros climas e tipos de módulos, de maneira a avaliar a aplicabilidade dos resultados em outras condições de teste.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CTG Brasil pelo suporte financeiro a este estudo através do projeto PD-10381-0620/2020 realizado em parceria com o SENAI-RN ISI-ER e a UNESP-Ilha Solteira no âmbito do programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Os autores agradecem também aos colegas do laboratório Fotovoltaica-UFSC que não participaram diretamente desta pesquisa, mas ajudaram na instalação e manutenção dos sistemas e sensores utilizados no estudo, e pelas discussões frutíferas sobre os temas abordados nesse artigo. Em especial, gostaríamos de agradecer aos colegas Thamires Alves da Silva e Lessandro Formagini, que auxiliaram no levantamento e tratamento dos dados utilizados. Marília Braga agradece ainda o apoio recebido da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior –Brasil (CAPES) através de suas bolsas de doutorado.

REFERÊNCIAS

- Anderson, K., Kemnitz, J. e Boyd, M., 2021. Evaluating cell temperature models and the effect of wind speed in PV system capacity testing. In: 2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). [online] 2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). Fort Lauderdale, FL, USA: IEEE. pp.1663–1669. <https://doi.org/10.1109/PVSC43889.2021.9519077>.
- Holmgren, W., Hansen, C. e Mikofski, M., 2018. pvlib python: a python package for modeling solar energy systems. *Journal of Open Source Software*, 3(29), p.884. <https://doi.org/10.21105/joss.00884>.
- Faiman, D., 2008. Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 16(4), pp.307–315. <https://doi.org/10.1002/pip.813>.
- International Electrotechnical Commission, 2017. IEC 61724-1:2017 -Photovoltaic System Performance Monitoring - Guidelines For Measurement, Data Exchange And Analysis.
- Mantelli N., S. L., Martins, G. L. e Ruther, R. Uncertainty Analysis Of Solar Monitoring Station: A Case Study. In: ISES Solar World Congress 2019. DOI: 10.18086/swc.2019.44.03.
- Mora Segado, P., Carretero, J. e Sidrach-de-Cardona, M., 2015. Models to predict the operating temperature of different photovoltaic modules in outdoor conditions. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 23(10), pp.1267–1282. <https://doi.org/10.1002/pip.2549>.
- Peel, C.M., Finlayson, B.L. e McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, pp.1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- PVsyst, 2023. Array thermal losses. Available at: <https://www.pvsyst.com/help/thermal_loss.htm> [Accessed 30 November 2023].

- Ross, R. G. Jr., 1981. Design Techniques for Flat-Plate Photovoltaic Arrays. In: 15th IEEE Photovoltaic Specialist Conference. 15th IEEE Photovoltaic Specialist Conference. Orlando, FL.
- Stein, J.S. e King, B.H., 2013. Modeling for PV Plant Optimization. Photovoltaics Int, 19 th(February), pp.101–109.
- VDMA, 2023. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) - 2022 Results.

COMPARATIVE ANALYSIS OF TEMPERATURE ESTIMATION MODELS IN BIFACIAL PHOTOVOLTAIC MODULES

Abstract. *Considering the diversity of operating environments, environmental variables such as soiling, spectral content of light, humidity and especially operating temperature are identified as crucial contributors to the performance of photovoltaic (PV) systems. This study analyzes the performance of models known from the literature for the estimation of operating temperature in bifacial modules, which currently account for more than 30% of the global PV market. By evaluating three main temperature estimation models, Ross, Faïman and PVsyst, the results reveal that the temporal resolution of the data influences the accuracy of these models, and lower temporal resolutions generate better results. Faïman's and PVsyst's models consistently demonstrate lower errors compared to Ross's model. In addition, the inclusion of reflected irradiance as input in the models, through the bifaciality coefficient, produces significant improvements in the accuracy of temperature estimates. Standard thermal coefficients, such as those used in PVsyst, are inaccurate for bifacial modules, highlighting the need to update these values. Wind speed analysis indicated minimal influence on the results, allowing for simplifications in the process without compromising accuracy. To improve the simulation of systems in the PVsyst software, it is recommended to use specific values for bifacial modules for the thermal coefficients used ($U_c=40$ and $U_v=0$), avoiding significant errors associated with the standard PVsyst coefficients.*

Keywords: *Bifacial modules, temperature models of photovoltaic modules, simulation of photovoltaic systems.*