

ANÁLISE DOS COEFICIENTES TÉRMICOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS BIFACIAIS UTILIZANDO SIMULADOR SOLAR E ILUMINAÇÃO NATURAL

Indhirha Deckmann - indhirha.deckmann@ufrgs.br

Júlia Hartmann Mozetic

Fernando Schuck de Oliveira

Thiago Vasconcelos Ellwanger

Ingrid Ingrid Moraes Führ

Arno Krenzinger

Fabiano Perin Gasparin

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Energia Solar

4.2. Tecnologias e ensaios de módulos fotovoltaicos

Resumo. A conversão de energia solar pelos módulos fotovoltaicos é dependente da radiação solar, da posição geográfica, das condições climáticas, temperatura local entre outros fatores sendo que essas variáveis influenciam diretamente o desempenho dos módulos fotovoltaicos. Dentre os fatores que influenciam este desempenho, os coeficientes térmicos (CT) têm papel importante, visto que representam a variação dos parâmetros dos módulos fotovoltaicos em função da temperatura. Para este trabalho foi selecionado um módulo bifacial para fazer a comparação dos coeficientes térmicos determinados pelos métodos indoor e outdoor. No procedimento outdoor o módulo foi caracterizado em um dia de céu limpo e com irradiância solar superior a 900 W/m^2 . No procedimento indoor foi confeccionado uma câmara termostática e utilizado o simulador SunSim 3c, da empresa suíça Pasan, a fim de determinar os coeficientes na faixa de operação dos módulos de 25 a $65 \text{ }^\circ\text{C}$ com irradiância de 1000 W/m^2 . Em cada método foram determinados os coeficientes α , β e γ . Há uma diferença mensurável entre os valores dos coeficientes térmicos entre as medidas indoor e outdoor, sendo que as curvas obtidas utilizando a iluminação natural foram corrigidas para irradiação STC. Como apresentado no trabalho, com os ensaios realizados foi possível obter retas de regressão com coeficiente de determinação maiores que $0,99$ em praticamente todos os casos, tornando os resultados satisfatórios. O trabalho apresentado possibilitou o aperfeiçoamento e a difusão da metodologia para a comparação de medições dos coeficientes térmicos em simulador solar e iluminação natural, procedimentos essenciais na caracterização dos dispositivos fotovoltaicos. Pesquisas futuras podem abordar o comportamento dos coeficientes térmicos em mais detalhes e ajudar a melhorar a metodologia para a obtenção destes coeficientes de modo mais preciso, dado a sua importância na caracterização dos módulos fotovoltaicos.

Palavras-chave: Módulo fotovoltaico, Coeficientes térmicos, Métodos indoor e outdoor

1. INTRODUÇÃO

As fontes de energia renováveis estão cada vez mais inseridas na matriz energética global, devido em parte ao seu menor impacto ambiental. No Brasil, o mercado de energia solar fotovoltaica está crescendo em um ritmo acelerado. Segundo a agência internacional de energias renováveis, no final do ano de 2022 o país atingiu aproximadamente 24 GW de potência acumulada, ficando entre os dez países com maior capacidade absoluta acumulada em sistemas fotovoltaicos (IRENA, 2023). Já a capacidade instalada mundial de sistemas fotovoltaicos teve um aumento de 22% (1053 GW) no período entre 2021 e 2022 (IRENA, 2023). Nesta situação de crescimento do emprego da energia solar fotovoltaica, os módulos fotovoltaicos bifaciais (que convertem a radiação solar incidente tanto na parte frontal como na posterior) estão cada vez mais sendo usados em novas instalações, inclusive existe a previsão de serem mais comercializados que os módulos monofaciais nos próximos anos.

A conversão de energia solar em energia elétrica pelos módulos fotovoltaicos é dependente da radiação solar, da posição geográfica, das condições climáticas, temperatura local além de outros fatores. Essas variáveis influenciam diretamente o desempenho dos módulos fotovoltaicos e dentre elas estão os coeficientes térmicos (CT). Estes coeficientes possuem papel importante, visto que a potência dos módulos fotovoltaicos tende a diminuir com o aumento da temperatura e, por consequência a eficiência também. Este decréscimo na eficiência do módulo, em virtude desse aumento na temperatura, é um fenômeno conhecido e deve ser considerado nas análises de desempenho dos módulos. Além disso, esses coeficientes térmicos têm importância para a correção das curvas em diversas condições de operação (Gasparin, 2020).

2. COEFICIENTES TÉRMICOS

O processo de determinação dos CT consiste na medição da curva característica I-V do módulo fotovoltaico (FV) em diferentes temperaturas que representem as condições de operação em campo (a norma IEC 60891 estipula a variação

da temperatura de 25 a 65 °C). Os fabricantes dos módulos apresentam no *datasheet* apenas os coeficientes para a irradiância padrão de 1000 W/m² e distribuição espectral de AM 1,5. Os CT são determinados de maneira genérica a partir da Eq. (1), em que a variação do parâmetro em análise, neste caso um parâmetro Z, é normalizado pelo valor do parâmetro em uma temperatura padrão (Emery, 1996).

$$CT \left(\frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right) = \frac{1}{Z(T_n)} \frac{\partial Z}{\partial T} \quad (1)$$

em que, o produto *CT* é definido como sendo o coeficiente térmico do parâmetro de interesse Z, *T* é a temperatura da célula fotovoltaica e por fim *T_n* é a temperatura de normalização (25 °C), sendo considerado como temperatura padrão para ensaios em dispositivos fotovoltaicos. Quando o coeficiente térmico é determinado para o parâmetro Z e normalizado para a temperatura *T_n*, o parâmetro em questão *Z₁* pode ser trasladado de uma temperatura *T₁*, para o valor *Z₂* em outra temperatura como *T₂*, utilizando a Eq. (2).

$$Z_2 = Z_1 + \frac{CT \cdot Z_1 \cdot (T_2 - T_1)}{1 - CT \cdot (T_n - T_1)} \quad (2)$$

O coeficiente de variação da corrente de curto-circuito (*I_{sc}*) com a temperatura (*T*) é denominado *α*. O aumento da temperatura leva a um aumento da corrente, em virtude de o *bandgap* de energia dos dispositivos fotovoltaicos diminuir com o aumento da temperatura e o coeficiente de absorção banda a banda aumentar. O cálculo para obter este coeficiente é determinado pela Eq. (3).

$$\alpha = \frac{1}{I_{sc}(T_n)} \frac{\partial I_{sc}}{\partial T} \quad (3)$$

O coeficiente de variação da tensão de circuito aberto (*V_{oc}*), em função da temperatura é calculado utilizando a Eq. (4). A redução de *V_{oc}* com o aumento da temperatura resulta na alteração da curva I-V característica do módulo FV, causando redução da potência entregue pelo dispositivo.

$$\beta = \frac{1}{V_{oc}(T_n)} \frac{\partial V_{oc}}{\partial T} \quad (4)$$

Tanto o coeficiente *α* quanto o *β*, são indispensáveis na translação dos pontos de uma curva cuja temperatura é diferente da condição padrão descrita na IEC 60891 (2021). Esta norma também descreve o procedimento para a determinação experimental destes coeficientes. Por fim, o coeficiente de variação da máxima potência (*P_m*) com a temperatura é definido como *γ* podendo ser determinado com a Eq. (7).

$$\gamma = \frac{1}{P_m(T_n)} \frac{\partial P_m}{\partial T} \quad (7)$$

O conhecimento desses coeficientes permite a determinação do comportamento do módulo FV em diferentes temperaturas de operação. O processo de obtenção dos CT pode ser realizado através dos métodos utilizando o simulador solar (*indoor*) ou através da iluminação natural (*outdoor*).

No método *outdoor*, os módulos fotovoltaicos devem ser acomodados em um suporte para exposição solar com uma cobertura para bloquear a incidência da radiação antes do início das medidas. O módulo FV deve ter uma temperatura próxima a 25 °C antes de iniciar o ensaio. Em seguida, a cobertura do módulo é retirada, expondo-o à radiação solar. Neste processo, a radiação solar promove o aquecimento do módulo FV, o que dificulta as medições em condições padrão de teste, mas é conveniente para a determinação dos coeficientes térmicos (Gasparin e Krenzinger, 2015).

Já o método *indoor*, consiste em utilizar uma fonte artificial de luz (simulador solar), para determinar a curva I-V em condições controladas. Para a determinação dessas curvas em várias temperaturas, pode ser empregado uma câmara de aquecimento a fim de se regular a temperatura até o valor requerido. Este método tem a desvantagem na demora no tempo de estabilização da temperatura do módulo, sendo a variação da temperatura de 5 em 5°C.

Considerando a importância do aperfeiçoamento das metodologias empregadas na determinação de coeficientes térmicos de módulos fotovoltaicos, este trabalho tem por objetivo obter estes coeficientes a partir de dois métodos a fim de compará-los entre si e também com o valor nominal fornecido pelo fabricante.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O módulo FV bifacial cujas características elétricas estão apresentadas na Tab. 1 foi selecionado para fazer a comparação dos CT determinados pelos métodos *indoor* e *outdoor*, semelhante ao realizado por Gasparin (2015). No procedimento *outdoor* o módulo foi caracterizado em um dia de céu limpo e com irradiância solar superior a 900 W/m² e

no procedimento *indoor* foi utilizado o simulador *SunSim 3c*, da empresa suíça *Pasan*, variando-se a temperatura em uma faixa de 25 a 65 °C e mantendo a irradiância constante em 1000 W/m². Em cada método foi determinado os três coeficientes térmicos (α , β e γ).

Tabela 1 – Parâmetros nominais do módulo utilizado na caracterização

Módulo	Marca	Peso (kg)	P_m (W)	V_{oc} (V)	V_{mp} (V)	I_{sc} (A)	I_{mp} (A)	η (%)	α (%/°C)	β (%/°C)	γ (%/°C)
LR4-72HBD-450M	LONGI	27,5	450	49,60	41,40	11,58	10,87	20,70	+0,050	-0,265	-0,340

2.1 Método *indoor*

Para método *indoor*, foi realizada a modificação da primeira versão da câmara termostática confeccionada no laboratório e descrita em Gasparin *et al.* (2020), Kipper *et al.* (2018^a) e Kipper *et al.* (2018^b). A atualização consiste na troca do material e aumento das dimensões da câmara. A nova câmara possui as dimensões 2410 mm x 1450 mm x 168 mm e o material utilizado foi chapa de alumínio com 1 mm de espessura.

A câmara foi revestida internamente por placas de policarbonato de 6 mm na face posterior e nas laterais, cujo objetivo é compor o sistema de aquecimento. Na face posterior, entre a chapa de alumínio e o policarbonato, foi inserido isolante térmico de lã de rocha com 15 mm de espessura. A parte externa foi revestida com espuma elastomérica adesiva, também conhecida como isolante k-flex. Nas faces superior e inferior e nas portas, este revestimento foi aplicado tanto na parte interna como na externa, com o objetivo de promover isolamento térmico. Este material também apresenta baixa refletividade, sendo uma condição necessária para a obtenção da uniformidade espacial da radiação no plano do módulo.

Após ser colocado, o revestimento externo foi lixado com uma lixa grão 50 para minimizar a reflexão da radiação emitida pela lâmpada de xenônio do simulador solar. Conforme testes feitos em Hincapie (2014), constatou-se que ao lixar o material do revestimento a refletividade do material reduz. Por fim, a câmara passou por pintura na cor preta, a fim de reduzir a reflexão do alumínio, conforme mostra a Fig. 1. Ainda na Fig. 1, é possível visualizar que dentro dessa estrutura foi acondicionado um suporte de alumínio para a fixação do módulo em formato paisagem que consiste em dois perfis de alumínio com trilhos móveis de 30 mm x 30 mm nas laterais com orientação vertical e dois na horizontal, permitindo ajustar a altura do módulo no interior da câmara.

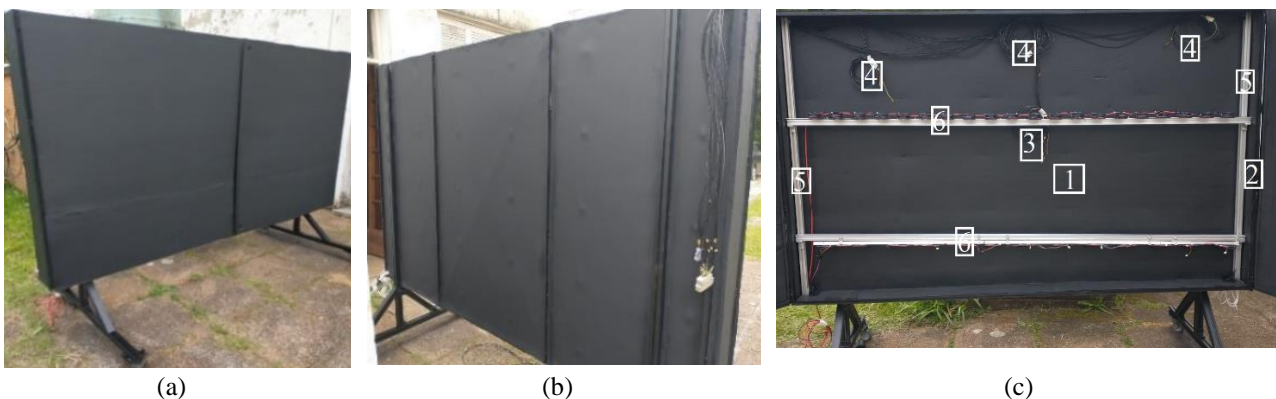


Figura 1 – Câmara termostática: (a) face frontal externa, (b) face posterior externa e (c) parte interna. Na parte interna estão indicados: (1) placa de policarbonato para aquecimento da parte posterior do módulo, (2) placa de policarbonato para aquecimento das laterais do módulo, (3) sensores de temperatura usados pelo controlador PID para o controle de do aquecimento do módulo, (4) sensores para monitorar a uniformidade da temperatura no módulo, (5) perfis verticais utilizados para deslizamento dos perfis horizontais e (6) perfis horizontais inferior e superior com ventiladores acoplados.

O sistema de aquecimento é constituído por uma resistência construída a partir de um fio de níquel cromo com isolamento de silicone da marca *Pan Electric*, cujo aquecimento máximo é de 200 °C. Este fio foi introduzido na placa de policarbonato alveolar com dimensões de 2390 mm x 1430 mm, totalizando, aproximadamente, 3028 W quando ligado à rede elétrica de 220 V.

A placa de aquecimento é composta por sete blocos resistivos de 17 cm de altura. Cada bloco tem potência aproximada de 432 W quando alimentados em 220 V e equivale a um fio com comprimento aproximado de 35 metros. No total foram utilizados, aproximadamente, 245 metros de fio. Para o controle do aquecimento ficar mais eficiente na direção vertical, melhorando assim a uniformidade de temperatura no módulo, a placa de aquecimento foi dividida em três zonas com controle de temperatura independente. A zona inferior é composta por três blocos de resistências, o que equivale a 1296 W. Para o controle do aquecimento foi utilizado um controlador PID modelo N1030, cuja temperatura é monitorada por um sensor do tipo Pt100, que é fixado com fita metálica na parte inferior do módulo FV sob ensaio.

A zona central é composta por dois blocos de resistências, com aproximadamente 864 W, também com controle independente, cujo sensor é fixado na parte central do módulo. A zona superior é composta pelos dois blocos restantes, também possuindo 864 W e um terceiro controlador que é usado no controle de temperatura desta zona, sendo o sensor de temperatura fixado na parte superior do módulo FV.

Além dos circuitos de controle de temperatura, foram instalados na face posterior do módulo nove sensores para o monitoramento da temperatura do módulo, conectadas a quatro fios na unidade de aquisição de dados modelo Keysight 34980A comandada pelo software Benchlink 34980 A. Os sensores de temperatura são fixados da seguinte maneira: três na zona superior, três na central e três na inferior. Os valores de temperatura são registrados a cada 10s e depois exportados para uma planilha eletrônica.

Por fim, foi construído um sistema para auxílio na uniformização da temperatura do módulo. Para isso, foram inseridos no perfil inferior 14 ventiladores de 8 cm x 8 cm, cuja tensão e potência são de 12 V e 2,4 W, respectivamente. No perfil superior são montados 20 ventiladores de 6 cm x 6 cm, cuja tensão é 12 V e a potência 2,8 W, conforme mostra a Fig. 2. Estes ventiladores promovem a uniformização da temperatura através de convecção forçada ao provocar o deslocamento ascendente do ar pela face posterior e descendente pela face frontal do módulo FV. Para alimentar os ventiladores foi utilizada uma fonte de alimentação chaveada com saída de 12 V/20 A.



Figura 2– Instalação dos ventiladores aos longo dos perfis horizontais internos, sendo em (a) os ventiladores superiores e em (b) os ventiladores inferiores

O acionamento dos ventiladores é realizado por meio de duas botoeiras pulsantes instaladas no painel de um quadro de comando, operando em um sistema de auto retenção. As resistências são acionadas por relés de estado sólido que permitem o acionamento de cargas até o limite de 25 A. O controle dos relés é feito pelos três controladores de temperatura N1030 já mencionados. O quadro de comando está descrito em Gasparin *et al.* (2020).

Após a confecção, a câmara foi inserida no simulador solar, o módulo com dimensões de 2094 mm x 1038 mm x35 mm foi acomodado e fixado. Para iniciar os ensaios, com a câmara fechada, o sistema de aquecimento do módulo é ligado. Quando a temperatura estabiliza, a câmara é momentaneamente aberta para expor o módulo à radiação do simulador para que se faça a medida da curva I-V. Após a medida, a câmara é fechada no menor tempo possível de modo a minimizar a perda de calor do módulo para o túnel do simulador. Repete-se este procedimento para as diversas temperaturas utilizadas no ensaio (25 °C e 65 °C), mantendo a irradiância a 1000 W/m². Para que este método seja satisfatório, a temperatura do módulo deve ser uniforme em toda sua extensão, de modo que as incertezas das medidas possam ser reduzidas.

As medições e a visualização dos resultados de ensaios realizados no simulador solar são controladas por um microcomputador que está conectado a uma carga eletrônica que polariza o módulo e faz a medida da curva I-V, além de controlar todas as funções do simulador. Com a utilização do software SPROD V.291 de operação do simulador é possível ajustar os parâmetros para o teste de cada módulo específico. Os arquivos de dados, fornecidos pelo programa do simulador solar, foram tratados utilizando o software *Excel*. O programa calcula e fornece os parâmetros I_{sc} , V_{oc} e P_m das curvas I-V medidas. Foram construídos gráficos destes parâmetros em função da temperatura e uma linha de regressão linear foi utilizada para obter os coeficientes de variação para cada um destes parâmetros. A variação de cada parâmetro é normalizada conforme Eq. (1) em função valor do parâmetro obtido pela reta de regressão a 1000 W/m² e 25 °C e assim, pode se avaliar o valor relativo do CT, isto é, em variação percentual do parâmetro por unidade de variação de temperatura.

2.2 Método outdoor

Inicialmente, o módulo FV é acomodado em uma estrutura metálica, com a face posterior coberta usando como material o acetato de vinila (EVA), cujo objetivo é eliminar o máximo de incidência solar refletida pelo solo. Ainda neste módulo, foi fixada em sua moldura uma célula de referência do modelo SOZ-03 para medida da irradiância solar. Antes do ensaio, o módulo FV é coberto por uma placa de cloreto de vinila (PVC) com revestimento de alumínio na parte posterior para bloquear a radiação antes do ensaio e minimizar o aquecimento do módulo FV. Por fim, é ajustada a inclinação e o azimute da estrutura metálica de modo a ter incidência normal da radiação solar, cuja verificação é feita utilizando o equipamento gnômon, conforme mostra a Fig. 3.



Figura 3 – (a) Módulo acomodado na estrutura, mostrando o detalhe da cobertura posterior do módulo (1) e a célula de referência (2) e (b) gnômon (1) e cobertura frontal (2).

Após, foi realizada a configuração do traçador de curvas *outdoor* por meio do software *Tracer* (desenvolvido pela equipe do LABSOL) para a aquisição dos dados. Resumidamente, o traçador de curvas é composto de cinco multímetros Agilent 34411A, cada um medindo um parâmetro, sendo eles: tensão, corrente, temperatura do módulo, irradiância e temperatura da célula e uma carga capacitiva para realizar a polarização do módulo FV.

Neste software são configurados os parâmetros da medida e constantes da célula de referência e dos resistor utilizado para medir corrente elétrica (*shunt*), conforme ilustrado na Fig. 4. Outro parâmetro que deve ser configurado é a pré-carga do capacitor, que é uma tensão negativa utilizada para compensar a queda de tensão nos cabos do sistema de medição que conectam o equipamento ao módulo. O traçador de curvas mede irradiância (G), temperatura (T), corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente (I_{mp}) e tensão (V_{mp}) de máxima potência e, por fim, a potência máxima do módulo e o fator de forma, conforme mostra a Fig. 5. Após a finalização das medições é obtido uma planilha eletrônica com os dados de cada ensaio realizado.

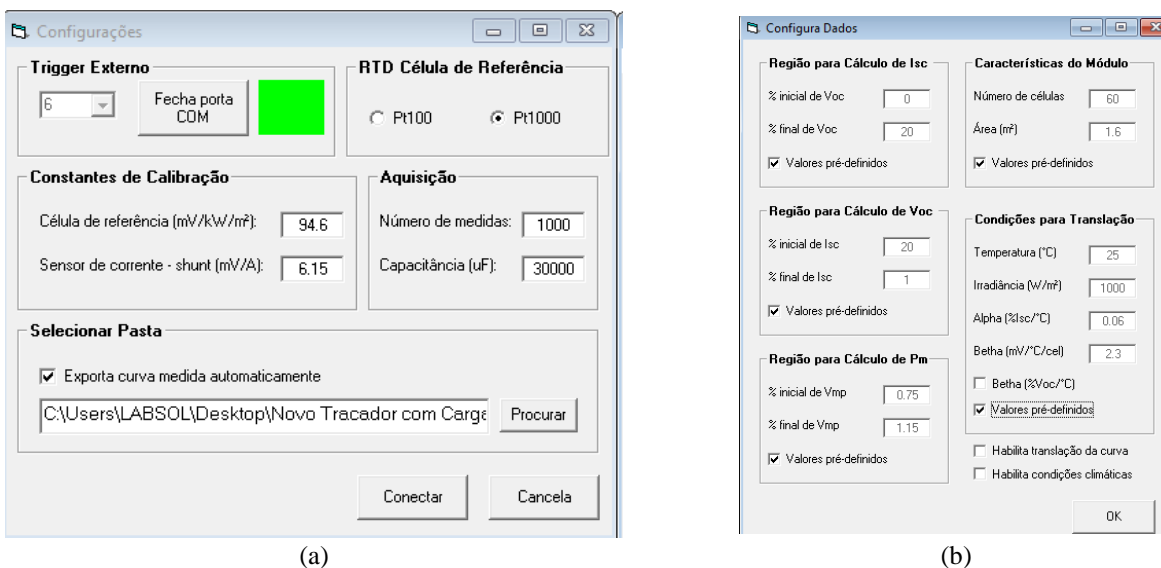


Figura 4 – Telas de configuração do traçador de curva I-V, sendo em (a) as configurações iniciais do sistema e em (b) as configurações utilizadas para o cálculo de parâmetros elétricos dos módulo e as condições para a correção da curva obtida em uma condição diferente do ensaio.

Após a aquisição dos dados, é necessário corrigir a curva obtida para a irradiância de 1000 W/m^2 , mantendo a temperatura medida. Essa correção é feita através de uma planilha eletrônica utilizando o método de translação desenvolvido pela equipe do LABSOL com base na norma IEC 60891. Para utilizar a planilha é feita a inserção dos dados de corrente e tensão medidos, os CT do módulo (α , β e γ) fornecidos pelo fabricante a 25°C e 1000W/m^2 , além da irradiância e temperatura medidas. A partir deste método, novos valores para corrente e tensão são calculados.

Os CT são determinados medindo os parâmetros extraídos da curva I-V já corrigida pela irradiância em diferentes temperaturas. Os dados de V_{oc} , I_{sc} e P_m são plotados em função da temperatura e uma linha de regressão linear é utilizada para obter os coeficientes para estes parâmetros. A variação de cada parâmetro é normalizada conforme Eq. (1) em função do valor do parâmetro obtido pela reta de regressão a 1000 Wm^2 e 25°C e assim, pode se obter o CT para cada parâmetro.

O cálculo de incertezas na determinação dos coeficientes térmicos para o módulo LR4-72HBD-450M foi determinado a partir do erro padrão expandido do coeficiente angular da reta de regressão obtida por mínimos quadrados. A reta de melhor ajuste é utilizada para calcular o CT e o erro padrão determina a distância média em que os valores

medidos diferem da reta de regressão (Taylor, 2012). O erro padrão é expandido utilizando o coeficiente t de Student para o número de medidas.

4. RESULTADOS

A partir dos ensaios *outdoor* e *indoor* foram obtidas curvas I-V para cada ensaio, conforme mostra a Fig. 6, a fim de demonstrar a influência da temperatura sobre a curva dos módulos FV.

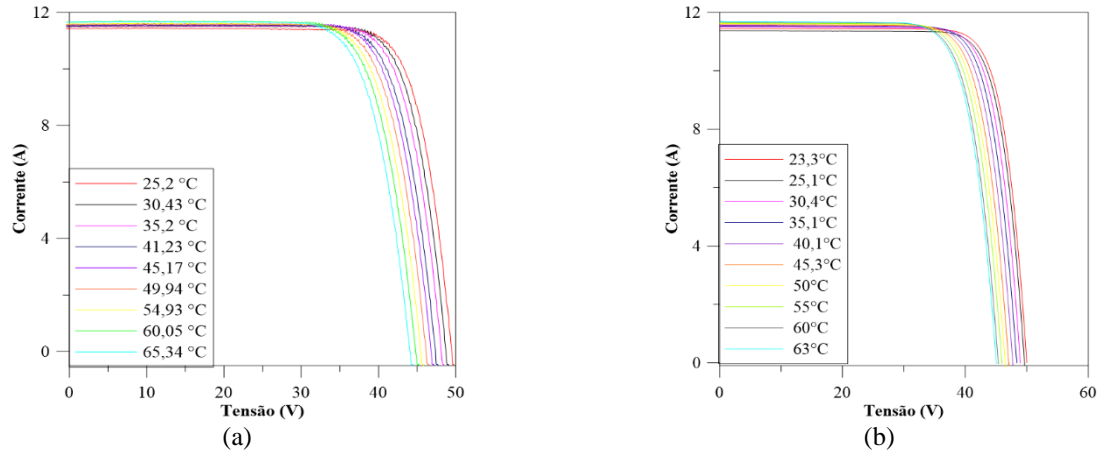


Figura 6 – Curvas I-V em diferentes temperaturas e irradiância de 1000 W/m^2 para o módulo LR4-72HBD-450M, sendo em (a) método *indoor* e (b) método *outdoor*.

Para a obtenção dos CT para o módulo bifacial LR4-72HBD-450M da marca LONGI foram realizados nove ensaios partindo de 25°C e aquecendo o módulo até estabilização nas temperaturas desejadas, sendo que o tempo de estabilização entre cada temperatura foi, em média, 30 minutos. Os resultados obtidos nos ensaios *outdoor* e *indoor* estão apresentados nas Tabs. 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 – Resultados dos parâmetros do módulo FV obtidos por meio do ensaio *outdoor* para cada temperatura.

T ($^\circ\text{C}$)	I_{sc}	V_{oc}	FF	I_{mp}	V_{mp}	P_m
23,3	11,444	50,0293	0,799	10,904	41,998	457,974
25,1	11,461	49,667	0,797	10,914	41,592	453,947
30,4	11,504	48,965	0,791	10,919	40,831	445,861
35,1	11,534	48,377	0,787	10,929	40,182	439,150
40,1	11,558	47,733	0,782	10,924	39,485	431,362
45,3	11,579	47,069	0,777	10,919	38,770	423,368
50,0	11,619	46,498	0,772	10,933	38,155	417,147
55,0	11,636	45,963	0,767	10,928	37,568	410,544
60,0	11,665	45,374	0,763	10,931	36,935	403,724
63,0	11,686	45,065	0,760	10,935	36,603	400,280

Tabela 3 – Resultados dos parâmetros do módulo FV obtidos por meio do ensaio *indoor* para cada temperatura.

T ($^\circ\text{C}$)	I_{sc}	V_{oc}	FF	I_{mp}	V_{mp}	P_m
25,20	11,465	49,493	0,791	10,921	41,109	448,953
30,43	11,525	48,754	0,787	10,972	40,307	442,248
35,20	11,551	48,151	0,783	10,977	39,650	435,260
41,23	11,568	47,381	0,776	10,968	38,787	425,431
45,17	11,618	46,834	0,772	11,000	38,185	420,036
49,94	11,599	46,174	0,767	10,952	37,528	411,027
54,93	11,633	45,511	0,760	10,942	36,786	402,495
60,05	11,709	44,830	0,755	10,984	36,083	396,348
65,34	11,703	44,096	0,749	10,954	35,305	386,720

Para o ensaio, em que o simulador foi utilizado (*indoor*), a temperatura utilizada no cálculo dos CT foi a média dos nove sensores de temperatura, que foram obtidas por meio do programa do instrumento utilizado no monitoramento da temperatura da câmara termostática. A irradiância neste ensaio é sempre de 1000 W/m^2 . Já para o ensaio utilizando a radiação natural, as curvas obtidas foram corrigidas para a irradiância de 1000 W/m^2 .

Para ilustrar os resultados para ambos os métodos, a Fig. 7 apresenta a variação da corrente de curto-circuito (I_{sc}) com a temperatura. Essa variação de I_{sc} com a temperatura é utilizada para determinar o coeficiente α . Neste caso, o

elevado coeficiente de correlação (R^2) obtido demonstra a boa concordância das medidas realizadas com o comportamento linear deste coeficiente.

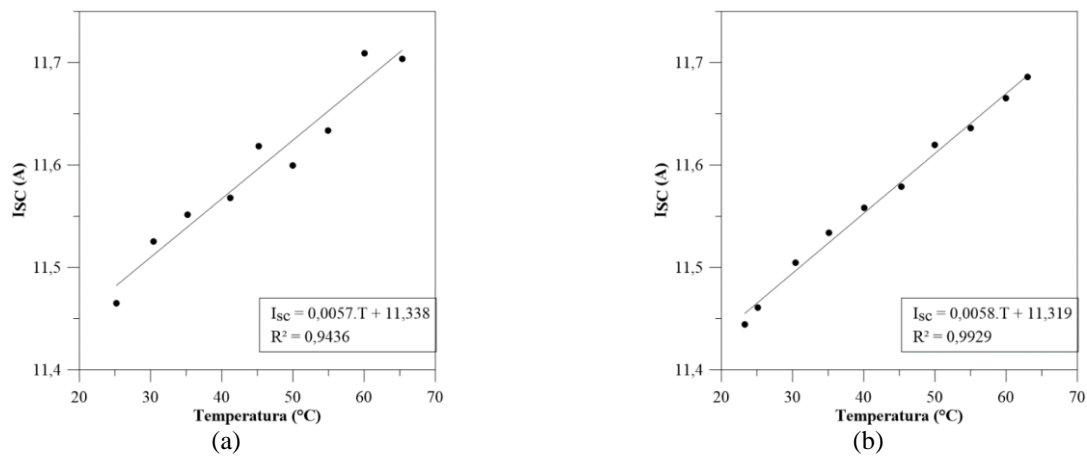


Figura 7 – Variação de I_{sc} com a temperatura do módulo LR4-72HBD-450M, sendo em (a) obtido pelo método *indoor*. (b) pelo método *outdoor*.

A Fig. 8 apresenta a variação da tensão de circuito aberto (V_{oc}) com a temperatura. A variação de V_{oc} com a temperatura é utilizada para determinar o coeficiente β . Verifica-se o comportamento linear do coeficiente e alta correlação obtida.

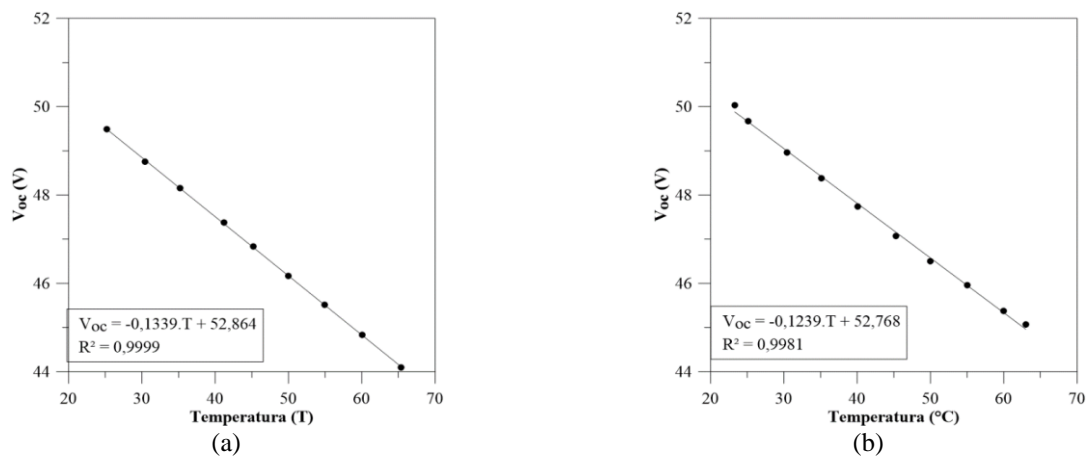


Figura 8 – Variação de V_{oc} com a temperatura do módulo LR4-72HBD-450M, sendo em (a) obtido pelo método *indoor*. (b) pelo método *outdoor*.

Na Fig. 9 está representado a variação da máxima potência (P_m) em função das temperaturas para ambos os métodos. A variação de P_m com a temperatura é utilizada para determinar o coeficiente γ . Verifica-se o comportamento linear do coeficiente e alta correlação obtida.

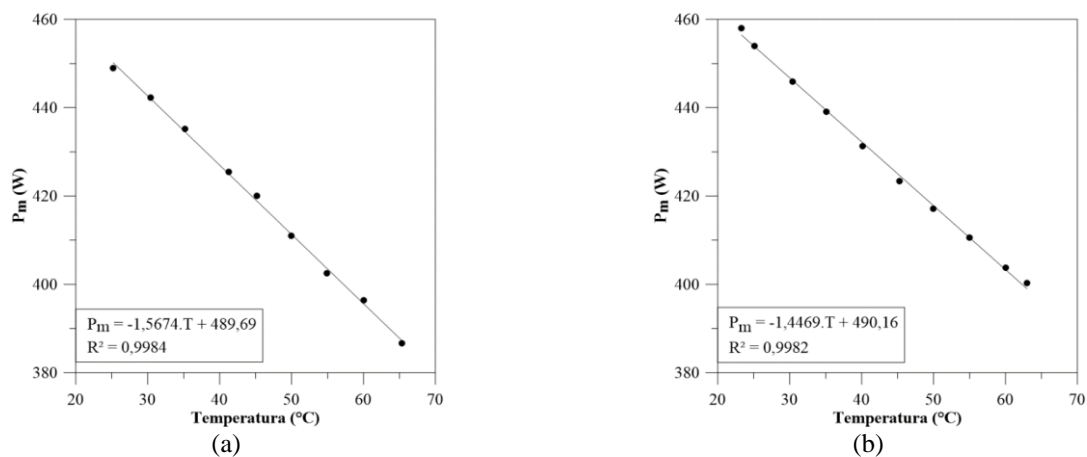


Figura 9 – Variação de P_m com a temperatura do módulo LR4-72HBD-450M, sendo em (a) obtido pelo método *indoor*. (b) pelo método *outdoor*.

A variação do fator de forma em função das temperaturas para ambos os métodos é apresentada na Fig. 10. Percebe-se um comportamento semelhante ao demonstrados pelos parâmetros I_{sc} , V_{oc} e P_m .

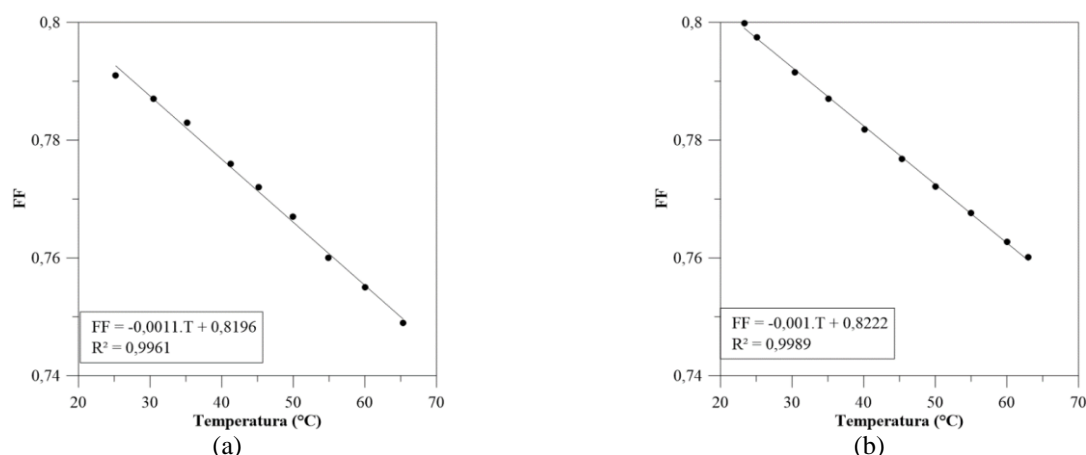


Figura 10 – Variação de FF com a temperatura do módulo LR4-72HBD-450M, sendo em (a) obtido pelo método *indoor*. (b) pelo método *outdoor*.

Diferenças eventuais nos valores dos coeficientes térmicos são possíveis entre as medidas *indoor* e *outdoor*, sendo que as curvas I-V utilizando a radiação natural foram corrigidas para 1000 W/m^2 . Para o módulo analisado, foram obtidos os resultados apresentados na Tab. 4, em que constam os coeficientes térmicos, além dos dados de I_{sc} , V_{oc} e P_m para ambos os métodos, onde a incerteza indicada é apenas a elétrica. Os valores fornecidos pelo fabricante estão indicados para referência do valor nominal.

Tabela 4 – Resultados obtidos a 25°C e 1000W/m^2 .

Parâmetros	Dados nominais (A)	Ensaio <i>Indoor</i> (B)	Ensaio <i>Outdoor</i> (C)	Diferença A e B	Diferença A e C	Diferença B e C
I_{sc} (A)	11,580	$11,465 \pm 0,057$	$11,461 \pm 0,057$	1,04%	1,04%	0,00%
V_{oc} (V)	49,600	$49,49 \pm 0,10$	$49,67 \pm 0,10$	0,22%	0,14%	0,33%
P_m (W)	450,0	$449,0 \pm 3,0$	$454,0 \pm 3,0$	0,23%	0,88%	1,13%
α (%/°C)	0,050	$0,050 \pm 0,011$	$0,051 \pm 0,004$	0,00%	0,001%	0,001%
β (%/°C)	-0,265	$-0,270 \pm 0,003$	$-0,249 \pm 0,009$	0,005%	0,016%	0,021%
γ (%/°C)	-0,340	$-0,348 \pm 0,012$	$-0,319 \pm 0,011$	0,008%	0,021%	0,029%

5. CONCLUSÕES

A modificação da câmara termostática para aquecimento de módulos fotovoltaicos, já existente no Laboratório de Energia Solar da UFRGS, propiciou um equipamento de melhor qualidade e com maiores dimensões, melhorando a infraestrutura essencial para ensaios de módulos fotovoltaicos com o simulador solar. A uniformidade de temperatura dentro da câmara ficou dentro do limite de $\pm 2^\circ\text{C}$ preconizada pela norma internacional IEC 60891, devido as modificações realizadas na câmara termostática.

Os resultados dos ensaios de coeficientes térmicos em simulador solar têm as variáveis mais controladas, ficando próximo dos valores fornecidos pelo fabricante. No ambiente externo, as medidas não são realizadas exatamente na mesma irradiância e, portanto, é necessária a correção da curva para a irradiância de 1000 W/m^2 , o que causa maior dispersão dos pontos. Entretanto, em ambos os métodos os coeficientes térmicos obtidos são próximos nas medidas realizadas com simulador solar (*indoor*) e sob iluminação natural (*outdoor*).

Como apresentado, os ensaios realizados permitiram obter retas de regressão com coeficiente de determinação R^2 maiores que 0,99 em praticamente todos os casos. O trabalho apresentado possibilitou o aperfeiçoamento e a difusão da metodologia para a comparação de medições dos coeficientes térmicos em simulador solar e iluminação natural, procedimentos essenciais na caracterização dos dispositivos fotovoltaicos.

A incerteza na medida do coeficiente α é menor para o método *outdoor* quando comparado com *indoor*, ao passo que para os coeficientes β a incerteza *outdoor* é aproximadamente três vezes maior. Para o coeficiente γ as incertezas são *indoor* e *outdoor* são semelhantes. Os dados fornecidos pelo fabricante para os coeficientes térmicos estão dentro do intervalo de incertezas obtidos, tornando os resultados deste trabalho satisfatórios.

Pesquisas futuras podem abordar o comportamento dos coeficientes térmicos em mais detalhes e ajudar a melhorar os modelos para a obtenção destes coeficientes e o cálculo de incertezas mais precisos. O descarte da primeira ou da última medida altera ligeiramente o valor do CT e uma análise da pertinência deste descarte no cálculo da reta de regressão pode ser um aperfeiçoamento futuro na metodologia.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao grupo de pesquisa do LABSOL- UFRGS pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho e principalmente ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo fomento à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Emery, K., Burdick, Y., Caiyem, D., Dunlavy, H., *et al.*, 1996. Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems, 25 th PVSC, May 13-17, Washington, D.C.
- Gasparin, F.P., Krenzinger, A., 2015. Comparação entre coeficientes térmicos de módulos fotovoltaicos determinados com simulador solar e com iluminação natural, Revista Brasileira de Energia Solar, vol 6, n. 2, pp. 102 -111.
- Gasparin, F. P. Kipper, F. D. Krenzinger, A., 2020. Câmara Termostática para a determinação de coeficientes térmicos de módulos fotovoltaicos com simulador solar. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza.
- Gasparin, F. P., Kipper, F.D., Oliveira, F. S., Kreninger, A., 2022. Assessment on the variation of temperature coefficients of photovoltaic modules with solar irradiance. Solar Energy. Vol. 244. págs.126 – 133.
- Hincapie, C. O., Piccoli Junior, L. A., Gasparin, F. P., Krenzinger, A., 2014. Estudo e montagem de túnel para simulador solar. V Congresso Brasileiro de Energia Solar – Recife.
- IEC, International Electrotechnical Commission., 2009. IEC 60904-3 - Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data.
- IEC, International Electrotechnical Commission., 2016 IEC 61215-2 -Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval – Part 2: Test procedures.
- IEC, International Electrotechnical Commission., 2021. IEC 60891 – Procedures for temperature and irradiance correction to measure I-V characteristics.
- IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY., 2023. Renewable capacity statistics. 2023. Disponível em: https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2023.pdf?rev=d2949151ee6a4625b65c82881403c2a7. Acesso em 30 maio.2023.
- Kipper, F. D., Gasparin, F. P., Kreninger, A., 2018^a. Análise da variação dos coeficientes térmicos de módulos fotovoltaicos com a irradiância. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.
- Kipper, F. D., Gasparin, F. P., Ruschel, C.S., Kreninger, A., 2018^b. Ensaios de módulos fotovoltaicos para análise da variação da resistência em série e em paralelo com a temperatura. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 22, págs. 1-13.
- Taylor, J. R., 2012. Introdução à análise de erros: o estudo de incertezas em medições físicas; tradução Waldir Leite Roque – 2. Ed – Porto Alegre. Bookmann

ANALYSIS OF THERMAL COEFFICIENTS OF BIFACIAL PHOTOVOLTAIC MODULES USING SOLAR SIMULATOR AND NATURAL LIGHTING

Abstract. *The conversion of solar energy by photovoltaic modules is dependent on solar radiation, geographic position, climatic conditions, local temperature, among other factors, and these variables directly influence the performance of photovoltaic modules. Among the factors that influence this performance, thermal coefficients (CT) play an important role, as they represent the variation in photovoltaic module parameters as a function of temperature. For this work, a bifacial module was selected to compare the thermal coefficients determined by the indoor and outdoor methods. In the outdoor procedure, the module was characterized on a clear day with solar irradiance greater than 900 W/m². In the indoor procedure, a thermostatic chamber was created and the SunSim 3c simulator, from the Swiss company Pasan, was used in order to determine the coefficients in the modules' operating range of 25 to 65 °C with irradiance of 1000 W/m². In each method, the coefficients α , β and γ were determined. There is a measurable difference between the thermal coefficient values between indoor and outdoor measurements, and the curves obtained using natural lighting were corrected for STC irradiation. As presented in the work, with the tests carried out it was possible to obtain regression lines with coefficient of determination greater than 0.99 in practically all cases, making the results satisfactory. The work presented made it possible to improve and disseminate the methodology for comparing measurements of thermal coefficients in solar simulators and natural lighting, essential procedures in the characterization of photovoltaic devices. Future research can address the behavior of thermal coefficients in more detail and help improve the methodology for obtaining these coefficients more precisely, given their importance in characterizing photovoltaic modules.*

Keywords: *Photovoltaic module, Thermal coefficients, Indoor and outdoor methods.*