

AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO SIMULADOR SOLAR DO CER-UFPE: UNIFORMIDADE, ESTABILIDADE E FATORES AMBIENTAIS

Cláudio Moisés Ribeiro – claudio.ribeiro@ufes.br

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Centro de Energias Renováveis, Universidade Federal de Pernambuco (CER-UFPE)

João Victor Furtado

Centro de Energias Renováveis, Universidade Federal de Pernambuco (CER-UFPE)

Laboratorio Solar, Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEU)

Rodrigo Henrique de Lima Farias

Janis Joplim Bezerra Galdino

Emerson Gomes

Guilherme Costa Neto

Rinaldo Oliveira de Melo

Olga de Castro Vilela

Centro de Energias Renováveis, Universidade Federal de Pernambuco (CER-UFPE)

Resumo: Os módulos fotovoltaicos de grandes dimensões, particularmente os módulos que fazem uso de células bifaciais, requerem controle da irradiância incidente sobre a área exposta (diretamente irradiada pelos simuladores solares), além de atenção com a intensidade, espectro e uniformidade da irradiância sobre a outra face. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo a avaliação de alguns parâmetros técnicos do simulador solar pulsado Argus modelo SMTL-V21.3A+ e também, aspectos relativos ao ambiente no qual o mesmo foi condicionado no Centro de Energias Renováveis da UFPE (CER-UFPE). Esta análise ajuda a quantificar impactos da correta ambientação e indica alguns cuidados necessários com procedimentos de medida. Com base na interpretação do ambiente normativo vigente e críticas disponíveis na literatura, foram conduzidas duas análises: uma sobre intensidade, uniformidade e estabilidade da irradiância na área ativa do simulador e outra para estimar a irradiância refletida incidente na face “não exposta” de um módulo não coberto. O simulador mostrou-se condizente com as expectativas de estabilidade e uniformidade para sua classe e os efeitos do ambiente foram melhor entendidos e podem ajudar na definição de procedimentos para irradiação simultânea de ambas as faces dos módulos bifaciais no futuro. Salienta-se que o objetivo do trabalho não foi uma verificação de aderência às normas da IEC. Neste caso, alguns testes complementares ainda seriam necessários.

Palavras-chave: Simulador solar Argus SMTL-V21.3A+, Módulos bifaciais, IEC TS 60904-1-2.

1. INTRODUÇÃO

Estima-se que em 2032 mais de 90 % dos módulos fotovoltaicos farão uso de células bifaciais, seja em módulos bifaciais (camada protetora transparente em ambas as faces), seja em monofaciais (VDMA, 2022). Módulos bifaciais e módulos monofaciais com células bifaciais têm sua performance dependente, em maior ou menor escala, da parcela de irradiância incidente em sua face traseira. A avaliação de desempenho de módulos bifaciais vem passando por um amplo processo de discussão e definições, dadas as peculiaridades desses módulos e a clara insuficiência dos mecanismos tradicionais aplicáveis a módulos monofaciais (*Standard Test Conditions* - STC) para determinar com precisão sua performance (Liang *et al.*, 2019; Kopecek e Libal, 2021) em condições reais de operação. A dependência de seu desempenho em função da irradiância incidente em sua face traseira impõe a definição de novas condições para testes *indoor*, por exemplo. Uma normativa preliminar (*technical specification*), IEC TS 60904-1-2 (IEC, 2023a), busca definir procedimentos para caracterização dos módulos fotovoltaicos bifaciais, com orientações complementares àquelas definidas pela norma aplicável a módulos monofaciais. Desde sua publicação, alguns grupos buscaram investigar os mecanismos propostos. Lopez-Garcia *et al.* (2022) utilizaram um módulo de pequenas dimensões especialmente montado visando à minimização da não uniformidade, do *mismatch* entre as células e dos efeitos do sombreamento da caixa de conexão e todas as rotas propostas na norma foram testadas, incluindo iluminação de um lado de cada vez e iluminação simultânea de ambos os lados em ambiente aberto e fechado. No ambiente fechado (*indoors*) utilizou-se tanto uma superfície refletora quanto iluminação complementar com LEDs (*led bias light*). Inúmeros trabalhos científicos também têm sido publicados sobre análise de módulos bifaciais em ambiente externo (*outdoors*). No teste externo, a irradiância na traseira do módulo é alterada através de controle do albedo (Deline *et al.*, 2017; Lopez-Garcia *et al.*, 2022).

PVPMC (2023) reúne relevantes informações sobre a avaliação de desempenho e modelos de simulação de operação de módulos bifaciais. Os requisitos para o teste de módulos bifaciais, inclusive aqueles impostos aos testes *indoors* que impactam sobre as condicionantes de ajustes do simulador solar, são discutidos por Lopez-Garcia *et al.* (2022) e serão abordados neste trabalho.

O presente trabalho apresenta uma avaliação preliminar do simulador solar do Centro de Energias Renováveis da UFPE (CER-UFPE) nesse contexto de aperfeiçoamento da base normativa e criação de uma base consistente para caracterização de módulos bifaciais.

2. METODOLOGIA

O trabalho desenvolvido tratou da análise da uniformidade espacial e estabilidade temporal da irradiância produzida por um simulador solar pulsado Argus modelo SMTL-V21.3A+. Além disso, buscou-se estimar a irradiância refletida no ambiente, incidente sobre a face não exposta do módulo bifacial caso a mesma não fosse coberta. Embora os procedimentos contemplem a minimização do efeito desta irradiância refletida, a intenção era ter uma noção de quanto impactante seria negligenciar tal fato. Além disso, o conhecimento das características da parcela refletida pode ser útil para ensaios com iluminação simultânea de ambas as faces do módulo.

2.1 Irradiância Refletida

É importante notar que a irradiância que “vaza” através da área útil do simulador solar não coberta pelas células do módulo fotovoltaico (ou mesmo através de células fotovoltaicas cuja transmitância não seja nula), interage com o ambiente e pode interferir com as medidas em curso. O aproveitamento da irradiância refletida em anteparos selecionados é uma das formas de se iluminar a face traseira de um módulo fotovoltaico bifacial durante sua caracterização tanto em ambiente externo quanto interno (Lopez-Garcia *et al.*, 2022; Deline *et al.*, 2017).

Ensaio foram realizados com o objetivo de estimar a irradiância incidente na face “não iluminada” do módulo durante a caracterização do mesmo, usando o acréscimo da corrente de curto circuito como estimador da irradiância na face oposta. Apenas a título de informação, a sala em que o simulador foi ambientado tem paredes brancas.

As Eq. (1) a (3) partem do pressuposto de que há uma correlação direta entre a irradiância e a corrente de curto-circuito do módulo em teste (Deline *et al.*, 2017) e ilustram o procedimento proposto para estimativa da irradiância na face traseira não coberta de um módulo bifacial cuja frente é iluminada pelo simulador. Pode-se dizer que para cada uma das faces é válida a relação da Eq. (1) desde que a outra face esteja no escuro.

$$G = \alpha \cdot I_{sc} \quad (1)$$

Onde: G é a irradiância (W/m^2); I_{sc} é a corrente de curto-circuito (A); e α é a constante que relaciona irradiância e corrente de curto circuito.

Ao submeter cada uma das faces do módulo às STC no simulador, mantendo-se a outra coberta, pode-se calcular os valores de α_{Frente} e α_{Tras} . Entendendo-se que a corrente de curto circuito do módulo bifacial é dada pela soma das correntes de curto-circuito de cada face, pode-se escrever, para uma dada situação:

$$I_{sc_{Total}} = I_{sc_{Frente}} + I_{sc_{Tras}} = G_{Frente}/\alpha_{Frente} + G_{Tras}/\alpha_{Tras} \quad (2)$$

Portanto, a partir da Eq. (3) pode-se estimar o valor da irradiância refletida incidente na face traseira do módulo. Os valores de a e de $\varphi_{I_{sc}}$ (bifacialidade da corrente de curto-circuito) foram obtidos submetendo-se frente e costas do módulo bifacial às STC, mantendo-se a face oposta coberta, como já explicado.

$$G_{Tras} = \alpha_{Tras}(I_{sc_{Total}} - G_{Frente} / \alpha_{Frente}) = \alpha_{Tras} \cdot I_{sc_{Total}} - G_{Frente} / \varphi_{I_{sc}} \quad (3)$$

2.2 Uniformidade e estabilidade

Para as análises de uniformidade e estabilidade utilizou-se uma célula fotovoltaica de referência (CR) cujas características estão resumidas na Tab. 1. Projetada para a medição de irradiância, ela é composta de duas células montadas na mesma estrutura, uma de silício policristalino e outra de silício monocristalino, conforme mostrado na Fig. 1. Antes das medidas *indoor*, a CR foi submetida a um teste comparativo (calibração) com um piranômetro de referência padrão secundário modelo CMP22 da Kipp & Zonen devidamente calibrado. A partir desta análise comparativa foi feito o ajuste das constantes de calibração das células que compõem a CR.

Tabela 1 - Especificações das células fotovoltaicas da CR modelo HT304N, do fabricante HT Italia

| Tecnologia | Parâmetro | Nominal | Unidade |
|-------------|----------------------|-----------|-------------------------|
| Célula Mono | Sensibilidade | 24,48 | mV/(kW/m ²) |
| | Coef. Temperatura | 0,05 | %/°C |
| Célula Poli | Sensibilidade | 23,97 | mV/(kW/m ²) |
| | Coef. Temperatura | 0,05 | %/°C |
| Ambas | Incerteza | +/-3 | % |
| | Faixa de Medida | 50 a 1400 | W/m ² |
| | Temperatura | -20 a 50 | °C |
| | Ângulo de Incidência | 90+/-25 | ° |



Figura 1 - Célula de Referência HT304N - Fabricante HT- Italia

Fonte: <https://www.tequipment.net/HT-Instruments/HT304N/Solar-Analyzer/>

2.3 Descrição do Simulador solar

As principais características do simulador (ver Fig. 2) são resumidas na Tab. 2 (ARGUS, 2023).



Figura 2 - Simulador solar pulsado ARGUS

Fonte: <https://www.argussolar.net/prolist01s5/72-362.html>

Tabela 2 - Síntese das Especificações do Simulador Solar Argus Modelo SMTL-V21.3A+

| Informação | Especificação/Faixa |
|-----------------------------|--|
| Parâmetros mensuráveis | Curvas I-V e P-V, Isc, Voc, Pmpp, Eficiência (Eff), fator de forma FF, Imp, Vmpp, Rs, Rsh, temperatura da célula, Iuld (corrente a uma determinada tensão fixa), Puld (potência a uma tensão fixa), cujo Uld pode ser definido arbitrariamente |
| Dimensões máximas do módulo | 2400 mm x 1400 mm |
| Velocidade de teste | 240 pcs/h |
| Duração do Flash | 10-150 ms |
| Vida útil da lâmpada | >100.000 <i>flashes</i> (10 ms <i>flash time</i>) |
| Faixa da Irradiância | 200-1200 W/m ² |
| Casamento Espectral | 0,875-1,125 (Grau A+) |

| | |
|------------------------------------|---|
| STI | $\leq 0,25\%$ (Grau A+) |
| LTI | $\leq 1\%$ (Grau A+) |
| Não-homogeneidade da Irradiância | $\leq 1\%$ (Grau A+) |
| Faixa Espectral (IEC 60904-9:2020) | 300-1200 nm |
| Acurácia da Repetição (40 Flashes) | $< 0,3\%$ |
| Escalas de Tensão | 1V/10V/50V/100V/150V/200V |
| Escalas de Corrente | 0,25A/1A/5A/10A/20A |
| Resolução | 16 bit (0,003%) |
| Tipo de lâmpada | Lâmpada tubular de Xenônio |
| Modo de operação | Pulso único |
| Temperatura | Medição com sensor de infravermelho e compensação |

2.4 Normas aplicáveis

Embora não tenha havido uma avaliação de aderência total às referências normativas, é sabido que o pano de fundo do trabalho desenvolvido é definido por dois instrumentos normativos principais: a norma IEC 60904-9 e a norma IEC TS60904-1-2. A primeira (IEC 2023b) define requisitos para classificação de simuladores solares baseada em critérios de casamento espectral e não uniformidade e estabilidade temporal da irradiância. A segunda (IEC, 2023a) descreve procedimentos complementares para a medição de características corrente-tensão de dispositivos fotovoltaicos bifaciais sob iluminação natural ou simulada. De acordo com Lopez-Garcia *et al.* (2022) alguns pontos importantes concernentes à avaliação de módulos bifaciais com irradiância simulada são:

- Não-uniformidade de 5 % para todos os níveis de irradiância utilizados;
- Limite de irradiância no lado não exposto: 3 W/m².

3. RESULTADOS DAS ANÁLISES REALIZADAS

As ações desenvolvidas durante o trabalho podem ser condensadas nas seguintes etapas: calibração da célula de referência; medidas da irradiância na superfície do simulador e avaliação de sua não-uniformidade espacial e temporal; e estimativa da irradiância na face “não iluminada” do módulo fotovoltaico bifacial.

3.1 Avaliação *outdoor* da célula de referência

A célula de referência mostrada na Fig. 1 e cujas características são apresentadas na Tab. 1 foi exposta ao sol entre os dias 16 e 17 de junho de 2023, conforme detalhado na Tab. 3. Com base na comparação com leituras obtidas com um piranômetro de referência, a constante relacionada à sensibilidade da célula foi verificada para diferentes condicionantes.

Tabela 3 - Ensaio *outdoor* da célula de referência *versus* piranômetro

| Parâmetro | Descrição |
|---------------------------|--|
| Início-Fim | 16/6/2023-05:18 a 17/6/2023-11:36 |
| Local | Recife (CER); 8°03'18.6"S; 34°57'16.6"W |
| Resolução | 15 s |
| Temperatura Ambiente | 23,3-29,7 °C (médias de 1 minuto) |
| Datalogger | Campbell CR1000 |
| Ângulo Zenital (Z) Mínimo | 31,40° (@11:20) Estimado através do SPA/NREL (https://midcdmz.nrel.gov/spa/) |
| Piranômetro | Kipp & Zonen CMP22 |

A Fig. 3 mostra o cálculo das constantes de calibração das células fotovoltaicas Mono e Poli, levando-se em consideração médias de 1 minuto, excluindo-se valores com $Z > 85^\circ$.

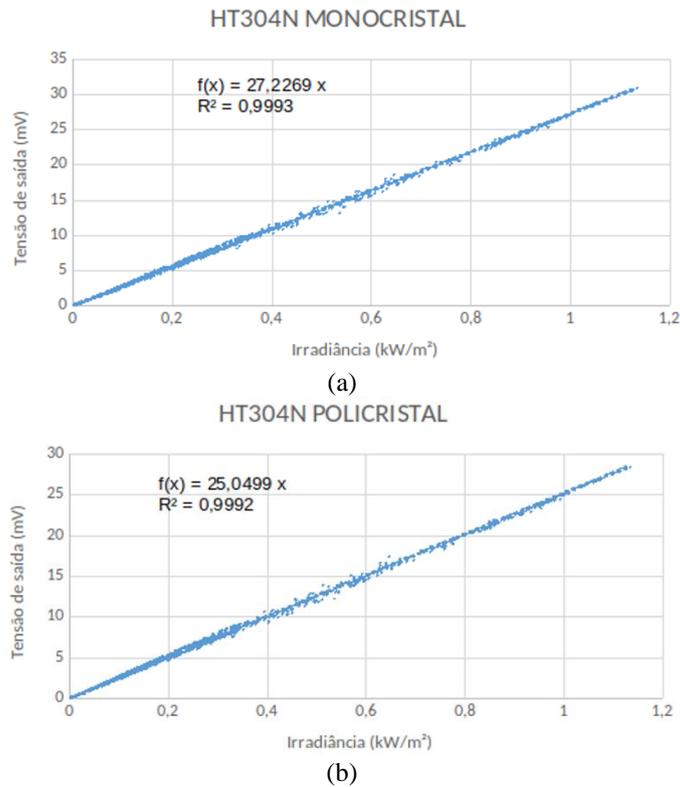


Figura 3 - Calibração da sensibilidade da célula de referência usando-se como base de comparação um piranômetro (Recife, 16-17/6/2023, $Z \leq 85$): (a) célula de silício monocristalino; (b) célula de silício policristalino

Uma análise mais localizada é apresentada na Fig. 4, onde só são considerados valores obtidos para ângulo zenital (Z) entre $47,2^\circ$ e $49,2^\circ$ e $G > 500 \text{ W/m}^2$, buscando-se filtrar os dados para condições de céu claro e trajeto na atmosfera equivalente a uma massa de ar $m=1,5$ (massa de ar geométrica). Desta forma, concentra-se a análise em uma região próxima à faixa de trabalho do simulador (AM1.5; $200\text{-}1200 \text{ W/m}^2$) reduzindo o descasamento espectral entre as condições em que foram estabelecidas as especificações nominais da CR e sua avaliação *outdoor*. Por outro lado, ao escolher estes limites indicados, tende-se a superestimar a sensibilidade da célula de referência dada uma maior temperatura de operação quando comparada com as STC (25°C) além do impacto de erros causados pelo ângulo de incidência. Quanto ao ângulo de incidência, o valor mínimo no período considerado foi de $31,4^\circ$, dificultando uma estratégia de correção da sensibilidade obtida através da Fig. 4.

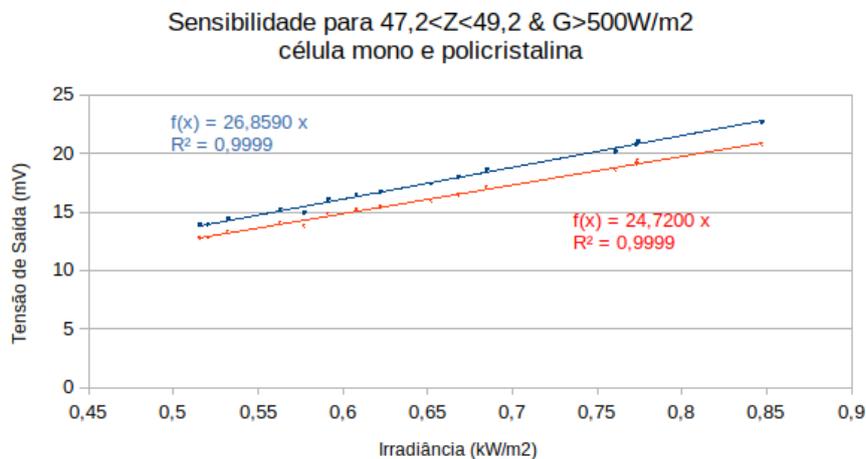


Figura 4 - Calibração da sensibilidade da célula de referência em comparação com piranômetro (Recife, 16-17/6/2023)

A Tab. 4 mostra algumas possibilidades de valores para a sensibilidade das células, ajudando a delimitar as análises. Verifica-se maior discrepância entre os valores nominal e calibrado da sensibilidade da célula monocristalina. Por esta razão as análises contemplam predominantemente a célula Poli.

Tabela 4 - Sensibilidades das células fotovoltaicas da CR modelo HT304N após calibração com CMP22 (intervalo de aquisição 15 s, médias de 1 m) para diversas condições de Z e G*

| Tecnologia | Nominal | Unidade | Z<85° | Z<40° | G>500 W/m ² e 47,2°<Z<49,2° | Corrigido T** |
|----------------------|---------|-------------------------|-------------|-------------|--|---------------|
| Mono | 24,48 | mV/(kW/m ²) | 27,23 | 27,38 | 26,86 | 26,59 |
| Poli | 23,97 | mV/(kW/m ²) | 25,05 | 25,16 | 24,72 | 24,47 |
| nRMSE Poli*** | | % | 3,70 | 3,03 | 1,09 | |

* Z=Ângulo zenital, G=Irradiância global horizontal.

** Sensibilidade obtida para G>500 W/m² e 47,2°<Z<49,2° e corrigida para 25°C com base na constante fornecida pelo fabricante.

*** Erro médio quadrático normalizado pela média para a célula policristalina.

3.2 Células de Referência versus Simulador

A área ativa do simulador (240x140cm) foi dividida em retângulos de 60x28cm e foram tomadas medidas no centro dos retângulos indicados na Fig. 5. No centro de cada retângulo foram coletadas 4 medidas, duas medidas com cada uma das duas células (mono e poli). Ao todo foram coletadas 48 amostras que dão indicações tanto da uniformidade quanto da estabilidade do simulador.

| Pontos | ED | DC | CB | BA |
|--------|----|----|----|----|
| 1 | o | o | o | o |
| 3 | o | o | o | o |
| 5 | o | o | o | o |

Figura 5 - Divisão da superfície ativa do simulador para medição da não-uniformidade da irradiância

A média de todos os valores obtidos e respectivos desvios são apresentados na Tab. 5.

Tabela 5 - Irradiância (W/m²) na superfície do simulador (valores indicados pelo próprio simulador e valores medidos com as células de referência usando-se as constantes de sensibilidade conforme descrito no item 3.1).

| Parâmetro | Simulador* | CR nominal** | | CR calibrado*** | | CORRIGIDO**** | |
|-----------------------|------------|--------------|---------|-----------------|--------|---------------|--------|
| | | Mono | Poli | Mono | Poli | Mono | Poli |
| Média | 1013,3 | 1147,58 | 1068,56 | 1031,8 | 1022,5 | 1056,4 | 1046,5 |
| Máximo | 1013,9 | 1161,15 | 1080,58 | 1044,0 | 1034,0 | 1068,9 | 1058,3 |
| Mínimo | 1012,5 | 1136,68 | 1060,73 | 1022,0 | 1015,0 | 1046,3 | 1038,8 |
| Desvio Médio | 0,24 | | | 4,83 | 4,21 | | |
| Desvio Médio % | 0,02% | | | 0,47% | 0,41% | | |

* Valor apresentado pelo simulador.

** Valor medido com a célula de referência com ajuste de acordo com a sensibilidade nominal.

*** Valor medido com a célula de referência com ajuste pela sensibilidade obtida para Z<85°.

**** Valor estimado com a sensibilidade obtida para G>500W/m² e 47,2°<Z<49,2° e ajustado para NOCT=45°C (utilizando-se o coeficiente recomendado pelo fornecedor da CR (0,05%/°C)).

3.3 Não-uniformidade espacial

A largura do pulso do simulador foi ajustada para 50 ms enquanto o tempo de coleta de dados do datalogger foi ajustado para 10 ms. Ou seja, durante cada pulso foi possível obter até seis valores de irradiância que foram processados para identificar a estabilidade temporal de curta duração, por exemplo. Os valores médios obtidos para cada retângulo

permitiram a comparação indicada na Fig. 6 que mostra o comportamento do desvio em relação à média. Verifica-se que há um certo padrão para a não-uniformidade o que pode estar associado a questões ambientais. A não uniformidade ficou próxima do valor esperado, 1%, como especificado para um simulador classe A+, e como apresentado na Tab. 2.

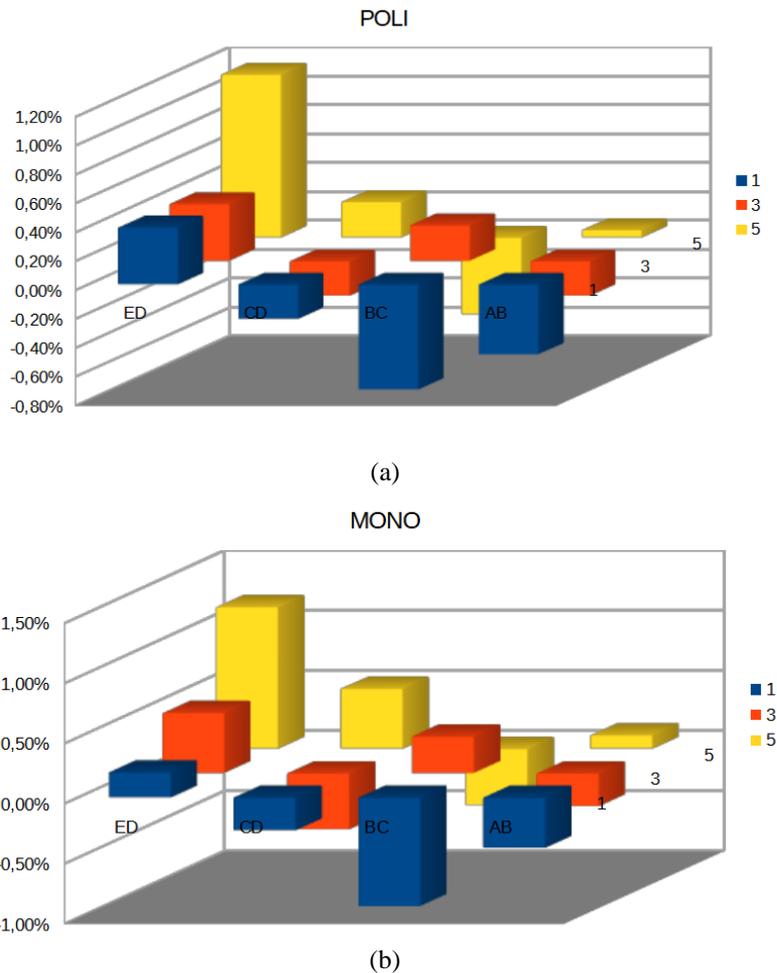


Figura 6 - Uniformidade da irradiância no simulador (desvio em relação à média): (a) medida com a célula de silício policristalino; (b) monocristalino.

A não-uniformidade é calculada a partir da Eq. (4) (Lopez-Garcia *et al.*, 2022). Os valores calculados a partir das leituras com as células mono e policristalina estão mostrados na Tab. 6. Além disso indica-se a não-uniformidade caso opte-se por efetuar a média da leitura de ambas (mono e poli) antes do cálculo da não-uniformidade.

$$\text{Não Uniformidade} = (G_{max} - G_{min}) / (G_{max} + G_{min}) \tag{4}$$

Tabela 6 - Não uniformidade calculada para as medidas nos 12 pontos indicados na Fig. 5

| | Mono | Poli | Média (mono+poli) |
|-------------------------|--------------|--------------|--------------------------|
| Máximo | 1044 | 1034 | 1039 |
| Mínimo | 1022 | 1015 | 1019 |
| Não Uniformidade | 1,04% | 0,93% | 0,98% |

3.4 Estabilidade

A estabilidade foi tratada de duas formas: a primeira buscando-se avaliar a estabilidade da irradiância durante cada pulso; a segunda, a estabilidade da irradiância ao longo de uma série de pulsos.

Durante os pulsos

Cada pulso teve duração ajustada para 50 ms e o *datalogger* foi configurado para fazer uma leitura a cada 10 ms. Portanto, durante cada pulso, até seis medidas de irradiância foram feitas por cada uma das células. Usando como critério a não-uniformidade (Eq. (4)) verifica-se que para os 24 pulsos disparados para a avaliação do simulador a máxima não-uniformidade da irradiância medida durante as seis leituras feitas por pulso ficou em 0,24% para a célula monocristalina e 0,15% para a célula policristalina.

Durante o ensaio

Foram realizadas 48 medidas (24 pulsos) e os dados da Tab. 7 mostram o comportamento do simulador ao longo deste período.

Tabela 7 - Estatística associada a todos os pulsos emitidos durante o ensaio

| Parâmetro | Indicador | Mono | Poli |
|--------------|----------------|--------|--------|
| Estabilidade | Média | 1031,5 | 1022,1 |
| | Máximo | 1044,7 | 1034,2 |
| | Mínimo | 1022,5 | 1015,0 |
| | Desvio Médio | 4,67 | 4,27 |
| | Desvio Médio % | 0,45% | 0,42% |

3.5 Irradiância refletida

Buscou-se estimar o efeito da irradiância refletida incidente na face traseira do módulo bifacial quando a frente do mesmo está sendo submetida às STC, sem cobertura. A lógica da análise é identificar quanto da corrente de curto-circuito medida pode ser atribuída à parcela refletida e a partir daí estimar a irradiância. Dois módulos cujas especificações gerais de interesse encontram-se resumidas na Tab. 8, foram utilizados para esta análise. Para o segundo módulo utilizou-se o valor nominal da bifacialidade (0,70). Omite-se as especificações elétricas dos módulos visto que o foco do trabalho não é a verificação de seu desempenho.

Tabela 8 - Características nominais dos módulos fotovoltaicos bifaciais utilizados

| Parâmetro | Unidade | Módulo A | Módulo B |
|---|----------------|----------|----------|
| Tecnologia | — | C-Si | C-Si |
| Área total | m ² | 2,59 | 2,17 |
| Dimensões das células | mm x mm | 182 x 91 | 166 x 83 |
| Células (half cells) | unidades | 144 | 144 |
| Cobertura da área total dos módulos pelas células | % | 92,0 | 91,3 |

As Tabs. 9 e 10 contêm os valores obtidos para os dois módulos selecionados.

Tabela 9 - Módulo A

| | P (W) | Imp (A) | Vmp (V) | Isc (A) | Voc (V) | FF |
|--------------------------------|---------------|---------|---------|---------------|---------------|-------|
| Frente com traseira exposta I | 550,37 | 12,792 | 43,023 | 13,516 | 50,044 | 81,37 |
| Frente com traseira exposta II | 550,22 | 12,776 | 43,066 | 13,517 | 50,054 | 81,32 |
| Frente com traseira coberta | 529,94 | 12,274 | 43,175 | 13,016 | 50,022 | 81,39 |
| Traseira com frente coberta I | 374,78 | 8,3924 | 44,656 | 9,5753 | 49,491 | 79,08 |
| Traseira com frente coberta II | 374,67 | 8,3906 | 44,653 | 9,5746 | 49,491 | 79,07 |
| Bifacialidade | 0,7071 | | | 0,7356 | 0,9894 | |

Tabela 10 - Módulo B*

| Nominal | P (W) | Imp (A) | Vmp (V) | Isc (A) | Voc (V) | FF |
|-----------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|-------|
| Frente com traseira exposta | 450,03 | 10,666 | 42,194 | 11,358 | 49,442 | 80,14 |
| Frente com traseira coberta | 434,73 | 10,313 | 42,152 | 10,969 | 49,378 | 80,26 |

* Para o módulo B a bifacialidade utilizada foi a fornecida pelo fabricante.

O valor estimado para a irradiância na face traseira foi de 52,2 W/m² para o módulo A e 50,7 W/m² para o módulo B. A pequena discrepância entre esses valores (2,9%) está relacionada com possíveis mudanças no espaço entre os momentos das medidas.

4. CONCLUSÕES

A ideia foi entender o efeito de reflexões sobre o desempenho do módulo fotovoltaico bifacial sob teste. Foram analisadas uniformidade espacial e estabilidade temporal da irradiância além do efeito da irradiância refletida sob a face traseira de módulos bifaciais. Embora as análises não tenham seguido estritamente as normas vigentes, considera-se que os resultados obtidos auxiliam no entendimento dos fenômenos envolvidos. Algumas constatações são relacionadas a seguir:

- Os valores obtidos para não-uniformidade espacial são compatíveis com as especificações do simulador. O padrão de comportamento da não-uniformidade pode indicar também algum efeito ambiental visto que as medidas foram feitas sem proteção da parcela refletida;
- Sobre os valores encontrados para a irradiância, algumas questões relevantes são: a parcela refletida no ambiente pode contribuir para aumento da irradiância medida pela célula de referência; descasamento espectral, temperatura e ângulo de incidência contribuem para a incerteza do processo de medição embora cuidados tenham sido tomados para reduzir tal efeito;
- A estabilidade durante os pulsos e durante todo o ensaio mostrou-se compatível com as especificações do simulador;
- A irradiância refletida que incide sobre a face traseira descoberta dos módulos bifaciais enquanto a frente é submetida às STC ficou em torno de 50W/m² (5%);
- Verificou-se uma discrepância significativa entre o valor nominal e o valor obtido na análise comparativa com o piranômetro para a sensibilidade da célula monocristalina; como o mesmo não aconteceu com a célula policristalina conclui-se que a constante especificada para a célula monocristalina estava incorreta;
- Algumas ações futuras que são desdobramentos do trabalho já realizado são: análise de uniformidade com retículos menores, conforme indicado pela IEC 60904-9; medidas de estabilidade e uniformidade para G>1000W/m²; medição do espectro do simulador; contraste dos valores de irradiância obtidos com a CR com aqueles obtidos com módulos de referência provenientes de esforços interlaboratoriais já em curso; leitura da irradiância e determinação da não uniformidade na face traseira do módulo usando a célula de referência.

REFERÊNCIAS

- Argus. Solar simulator. Disponível em: <http://www.argussolar.net/prolist01s5/72-362.html>. Acesso em nov. de 2023.
- Deline, C.; Macalpine, S.; Marion, B.; Toor, F.; Asgharzadeh, A.; Stein, J. S. Assessment of Bifacial Photovoltaic Module Power Rating Methodologies - Inside and Out. *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 7, no. 2, 2017.
- IEC, IEC TS 60904-1-2:2019 Photovoltaic devices – Part 1-2: Measurement of current-voltage characteristics of bifacial photovoltaic (PV) devices, 1st edition, 2019. <https://webstore.iec.ch/publication/34357>
Acesso em novembro de 2023.
- IEC, IEC 60904-9:2020 Photovoltaic devices - Part 9: Classification of solar simulator characteristics <https://webstore.iec.ch/publication/28973> Acesso em novembro 2023.
- Kopecek, R.; Libal, J.. Bifacial photovoltaics 2021: Status, opportunities and challenges. *Energies*, 2021, vol. 14, no 8, p. 2076.
- Liang, T. S.; Pravettoni, M.; Deline, C.; Stein, J. S.; Kopecek, R.; Singh, J. P.; Luo, W.; Wang, Y.; Aberle, A. G.; Khoo, Y. S. A review of crystalline silicon bifacial photovoltaic performance characterisation and simulation. *The Royal Society of Chemistry*, vol. 12, p. 116-148, 2019.
- Lopez-Garcia, J.; Ozkalay, E.; Kenny, R. P.; Pinero-Prieto, L.; Shaw, D.; PAVANELLO, Diego; SAMPLE, Tony. Implementation of the IEC TS 60904-1-2 Measurement Methods for Bifacial Silicon PV Devices. *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 12, no. 3, 2022.
- VDMA. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV): 2021 Results. 13. Edition, Março, 2022.
- PVPMC. Sandia National Laboratories PV Performance Modeling Collaborative disponível em <https://pvpmc.sandia.gov/pv-research/bifacial-pv-project/> . acesso em novembro de 2023.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF por meio do projeto 23076.009704/2020-56 no âmbito do Programa de P&D ANEEL, como também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) pelo apoio aos bolsistas no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares - PROTEN.

PRELIMINARY EVALUATION OF CER-UFPE SUN SIMULATOR: UNIFORMITY, STABILITY AND ENVIRONMENTAL ASPECTS

Abstract: Large photovoltaic modules, particularly modules that use bifacial cells, require control of the irradiance incident on the exposed area (directly irradiated by solar simulators), in addition to attention to the intensity, spectrum and uniformity of the irradiance on the other side. In this sense, this work aims to evaluate some technical parameters of the Argus pulsed solar simulator model SMTL-V21.3A+ and also aspects related to the environment in which it was conditioned at the UFPE Renewable Energy Center (CER-UFPE). This analysis helps to quantify the impacts of the correct environment and indicates some necessary care with measurement procedures. Based on the interpretation of the current regulatory environment and criticisms available in the literature, two analyzes were conducted: one on intensity, uniformity and stability of irradiance in the active area of the simulator and another to estimate the reflected irradiance incident on the “non-exposed” face of a module not covered. The simulator proved to be consistent with the expectations of stability and uniformity for its class and the effects of the environment were better understood and can help in defining procedures for simultaneous irradiation of both sides of bifacial modules in the future. It should be noted that the objective of the work was not to verify adherence to IEC standards. In this case, some additional tests would still be necessary.

Keywords: Argus SMTL-V21.3A+ Solar Simulator, Bifacial photovoltaic modules, IEC TS60904-1-2