

ANÁLISE DA CURVA I-V DE MÓDULO FOTOVOLTAICO BIFACIAL PARA DETERMINAÇÃO DE GANHO BIFACIAL E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Júlia Hartmann Mozetic – julia.mozetic@ufrgs.br

Indhirha Deckmann

Fernando Schuck de Oliveira

Fabiano Perin Gasparin

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Resumo. As fontes renováveis de energia ganharam destaque nos últimos anos, sendo a energia solar fotovoltaica muito discutida como uma das fontes de energia limpa mais relevantes para o alcance da descarbonização nos países desenvolvidos. A busca por novas tecnologias de aumento da produção energética se tornou imprescindível para manter a energia solar fotovoltaica relevante no mercado internacional. Os módulos fotovoltaicos bifaciais têm papel importante nesse tema, uma vez que permitem um incremento na produção energética, utilizando os mesmos componentes, matérias primas e espaço físico para produção de energia. Neste artigo foram utilizados dois módulos fotovoltaicos da mesma fabricante e de mesma potência nominal, sendo um monofacial e outro bifacial. Foram traçadas curvas de corrente e tensão para análise do ganho bifacial instantâneo em um dia de céu limpo. A curva I-V indicou um ganho bifacial de 5,9% em relação ao módulo monofacial. Foi possível observar que durante o amanhecer e entardecer o ganho bifacial apresentou a tendência de crescimento, chegando em 7,5% para o modelo analisado. A eficiência energética diária da face bifacial do módulo fotovoltaico foi de 10% em média, atingindo seu valor máximo de 14% para o período de dados analisado. O mesmo módulo bifacial apresentou eficiência global de 23% e o módulo monofacial de 22%. O albedo do substrato teve papel importante na análise dos valores de eficiência, uma vez que o albedo da brita rosa medido por uma célula de referência foi de aproximadamente 8% enquanto para o piranômetro foi de 12,5%. As análises indicaram que o ganho energético na utilização do módulo bifacial é vantajoso, mas ainda apresenta um comportamento a ser explorado a depender das condições de diferentes substratos, montagem e albedo.

Palavras-chave: Curva I-V, Ganho bifacial, Albedo.

1. INTRODUÇÃO

Os efeitos da mudança climática global são cada vez mais sentidos por todas as partes do mundo de forma radical e devastadora com enchentes, incêndios, ondas de frio e calor incompatíveis com a existência da espécie humana. A transição e a eficiência energética são vistas como protagonistas no papel na desaceleração do aquecimento global, sendo as fontes de energias renováveis grandes responsáveis na redução do aquecimento da Terra até 2050 (Gielen *et al.*, 2019). A energia solar fotovoltaica está entre as fontes com maior potencial de produção energética no Brasil apresentando um crescimento de 82,4% entre os anos de 2021 e 2022 (EPE, 2023; Santos and Lucena, 2021).

A indústria fotovoltaica almeja a maximização da performance dos módulos e a redução do custo produtivo, de forma que a tecnologia dos módulos fotovoltaicos bifaciais conquistou 60% do mercado em 2022 e apresenta tendência de representar mais de 80% de toda a produção mundial nos próximos 10 anos (Hwang *et al.*, 2023). A capacidade de geração de energia em razão do custo produtivo é de 2 a 8% maior em módulos bifaciais em comparação aos módulos monofaciais, além de terem potencial de produzir até 20% mais energia a depender das características do sistema (Ganesan *et al.*, 2023). A célula bifacial se diferencia por absorver a radiação refletida no entorno que atinge a superfície posterior e alguns fatores como o albedo, ângulo de inclinação da estrutura e a altura em relação ao solo são relevantes para o resultado da produção energética do sistema (Manuel Longares *et al.*, 2023).

A Comissão Internacional de Eletrotécnica (IEC) publicou em 2019 a especificação técnica TS 60904-1-2 voltada aos métodos de caracterização *indoor* e *outdoor* de módulos bifaciais (IEC, 2019). Ainda que se tenha solucionado muitos dos questionamentos em relação aos ensaios de caracterização, são encontrados desafios para replicação do método de medição *outdoor* seguindo os padrões determinados (Lopez-Garcia *et al.*, 2022).

O ganho bifacial indica o percentual de aumento de potência devido a bifacialidade do módulo fotovoltaico possibilitando a análise das condições ideais para incremento da produção energética. Segundo estudos realizados por Alam *et al.* (2023), dias com índice de claridade elevado resultam em um ganho bifacial inferior a dias com índice baixo, uma vez que em dias nublados observa-se uma predominância da radiação difusa. Além disso, o aumento da altura em relação ao solo tem um efeito de aumento de energia maior nos módulos bifaciais em relação ao módulo monofacial (Tina *et al.*, 2021).

O controle e monitoramento das instalações fotovoltaicas é indispensável para validação e análise dos indicadores de incremento de geração de energia pelo ganho bifacial. Um dos ensaios realizados é a curva de corrente *versus* tensão, também conhecida como curva I-V. A curva I-V permite que seja identificado o comportamento elétrico do sistema e possíveis locais de falha ou defeito, bem como determinação da performance (García-Valverde *et al.*, 2016).

Este trabalho teve por objetivo analisar as tendências de comportamento de um módulo bifacial comparado a um módulo monofacial. Foi realizado ensaio *outdoor* da curva I-V dos módulos em um dia de céu limpo para se observar o ganho bifacial instantâneo ao longo do tempo. Além disso, foram coletados dados de produção energética durante vinte e dois dias com o objetivo de verificar o ganho bifacial energético.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados ensaios de módulos fotovoltaicos no Laboratório de Energia Solar (LABSOL) localizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul em Porto Alegre no estado do Rio Grande do Sul. Para a realização dos testes do estudo, foram escolhidos dois módulos fotovoltaicos da fabricante JA SOLAR de mesma potência nominal, sendo um do tipo monofacial e o outro bifacial, cujos dados nominais são apresentados na Tab. 1.

Tabela 1 – Especificações e parâmetros elétricos nominais dos módulos fotovoltaicos, em condições padrão de teste.

	JAM72S20-455/MR	JAM72D20-455/MB
Tipo	Monofacial	Bifacial
Célula	Monocristalina	Monocristalina
Dimensões (mm)	2112 x 1052 x 35	2117 X 1052 X 35
Pmax (W)	455	455
Voc (V)	49,85	49,75
Vmp (V)	41,82	41,52
Isc (A)	11,41	11,46
Imp (A)	10,88	10,96
Eficiência (%)	20,5	20,4
Condições padrão de teste: irradiância 1000 W/m ² , temperatura da célula 25 °C, espectro AM 1.5 G		

Para a determinar as características elétricas de cada módulo, foi obtida, no simulador solar, a curva característica corrente *versus* tensão, conforme previsto na norma internacional IEC 61215. A Fig. 1 apresenta a imagem dos módulos fotovoltaicos posicionados para o ensaio. O módulo fotovoltaico bifacial foi submetido ao teste tanto na sua face frontal quanto na face posterior, sendo o lado não submetido ao teste coberto com material polimérico preto para bloquear a passagem de radiação solar.

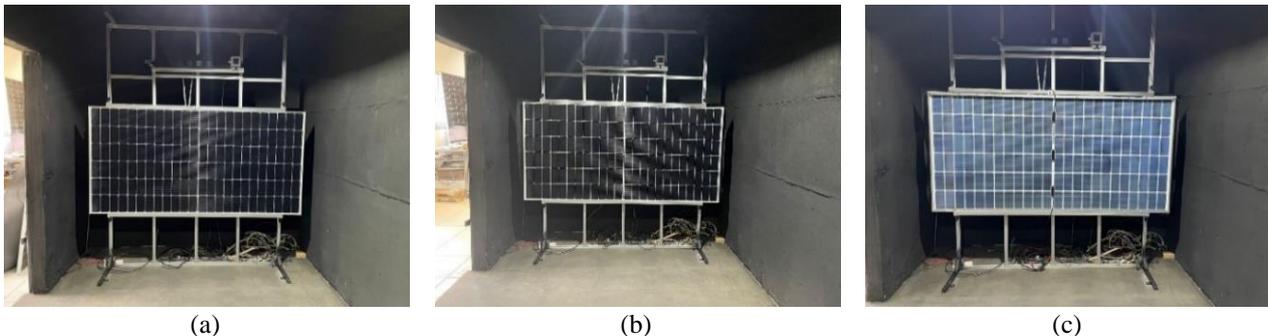


Figura 1 – Módulos fotovoltaicos instalados no suporte do simulador solar: monofacial (a), módulo bifacial face frontal (b), módulo bifacial face posterior (c).

O ensaio *outdoor* foi realizado com os mesmos módulos fotovoltaicos, instalados lado a lado em um estrutura no terraço do LABSOL para uma análise comparativa entre os resultados. O período de captação de dados de monitoramento *outdoor* compreende o intervalo de tempo entre os dias 28 de agosto 2023 e 26 de outubro de 2023. Foram coletados os dados de radiação global da face frontal e posterior dos módulos por dois piranômetros e duas células de referência, as temperaturas dos módulos fotovoltaicos e das células de referência foram aferidas por sensores de temperatura Pt100, conforme ilustrado na Fig. 2.

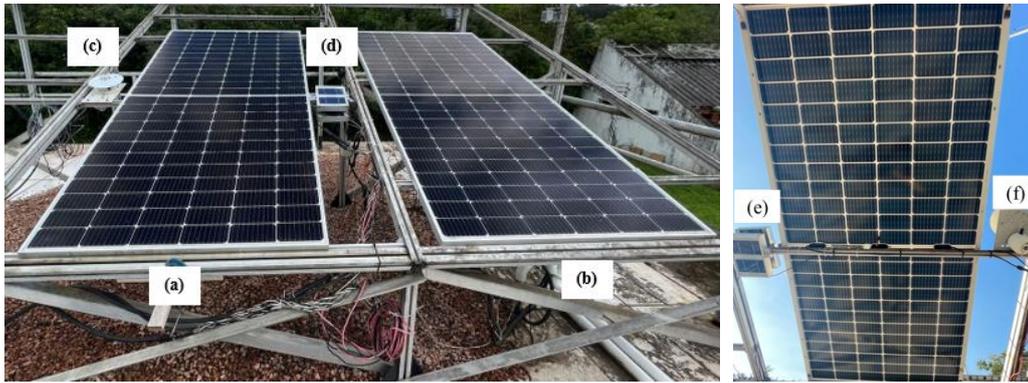


Figura 2 – Módulo bifacial (a), módulo monofacial (b), piranômetro direcionado para cima (c), célula de referência direcionada para cima (d), célula de referência direcionada para baixo (e), piranômetro direcionado para baixo (f).

Os módulos fotovoltaicos foram conectados cada um a um microinversor da fabricante Apsystems modelo QS1A para medição da energia produzida. Para o registro de tensão e corrente foi utilizado a aquisição de dados Agilent 34972A registrando os valores em intervalos de um minuto e a aquisição dos dados dos sensores de medição de radiação solar e temperatura foi realizada por um *datalogger* (Novus FieldLogger) com uma medição das variáveis a cada segundo e registro da média a cada minuto (Fig. 3).

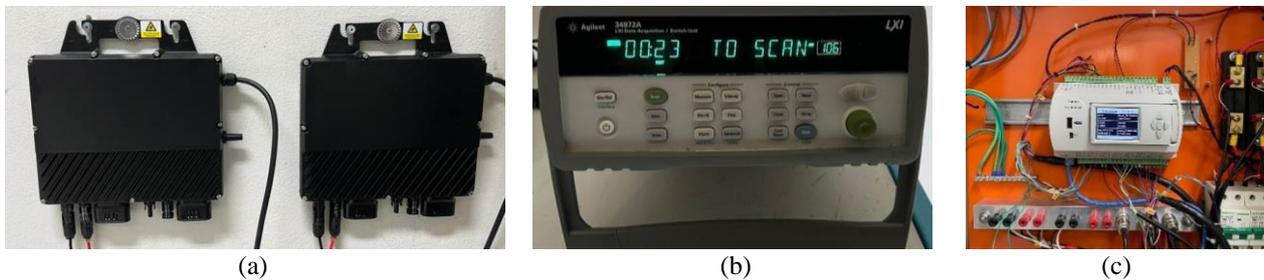


Figura 3 – Microinversores Apsystems modelo QS1A (a), aquisição de dados Agilent 34972A (b), datalogger (c).

Foi realizado o ensaio de curva de corrente *versus* tensão para o módulo monofacial e bifacial em um dia de céu limpo nas condições de substrato de brita rosa. Inicialmente identificou-se um comportamento não esperado em relação ao ponto de máxima potência do módulo monofacial apresentando uma potência equivalente ao do módulo bifacial em algumas medidas. Este comportamento levantou a hipótese de que o módulo monofacial estaria captando radiação pelo lado posterior do módulo. A fim de verificar tal comportamento foi realizado o ensaio no simulador solar da face posterior módulo monofacial.

A Fig. 4 evidenciou a hipótese levantada uma vez que a face posterior do módulo monofacial apesar de ser coberta com uma *backsheet* de policloreto de vinila (Tedlar) ainda absorvia parte da irradiação de 1000 W/m^2 gerando uma corrente de curto-circuito de aproximadamente 3A e potência máxima de 100 W.

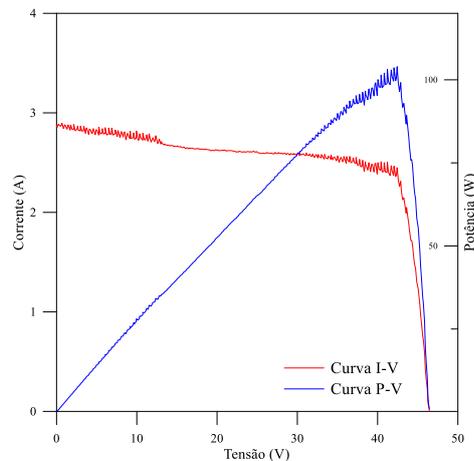


Figura 4 – Curva I-V e Curva P-V do módulo monofacial face posterior.

A fim de solucionar o ganho de radiação refletida pelo módulo monofacial, a *backsheet* foi coberta com material não refletivo de lona preta conforme mostra a Fig. 5 (a). Isto foi necessário pois a metodologia está baseada na comparação entre os módulos, e o módulo monofacial por ser praticamente idêntico ao bifacial permite ter uma referência de comparação adequada.



Figura 5 – Face posterior do módulo monofacial à esquerda e módulo bifacial à direita (a), módulo bifacial coberto com anteparo (b).

Foram medidas diversas curvas I-V no dia 28 de agosto de 2023 a cada meia hora iniciando a medição às 9h e finalizando às 16h. Para cada horário, foram traçadas três curvas I-V sendo uma a do módulo monofacial com a cobertura posterior de lona, a segunda curva do módulo bifacial e a terceira curva do módulo bifacial com a parte posterior coberta com anteparo de EVA ilustrado na Fig. 5 (b), a fim de determinar o ganho bifacial instantâneo.

A caracterização elétrica dos módulos fotovoltaicos é realizada pelo traçador de curva de corrente e tensão e de curva de potência e tensão em diversas irradiâncias e temperaturas que variaram ao longo do dia. A Fig. 6 ilustra uma curva I-V e uma curva P-V genérica destacando a corrente de curto-circuito que é a corrente máxima do módulo quando a tensão tende a zero, a tensão de circuito aberto que é a maior tensão do módulo quando a corrente tende a zero, além disso podem ser verificadas a corrente de máxima potência, o ponto de máxima potência e a tensão de máxima potência (Lyvia *et al.*, 2020).

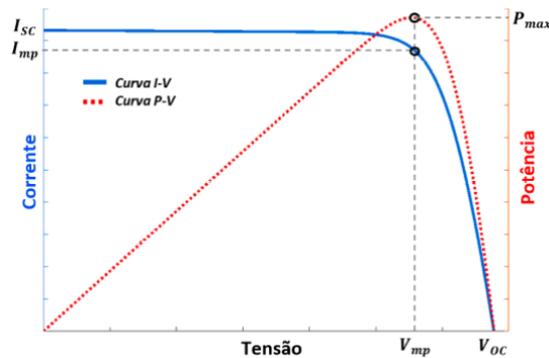


Figura 6 – Curva I-V e Curva P-V genérica [Fonte:(Lyvia *et al.*, 2020)].

As curvas I-V foram medidas com o objetivo de avaliar o ganho instantâneo do módulo bifacial. Foi utilizado o traçador de curvas disponível no laboratório para polarização dos módulos e captação dos dados para as curvas I-V. O traçador de curvas utiliza multímetros para a medida dos pares corrente *versus* tensão, sendo também medidas a irradiância por uma célula de referência, a temperatura da célula de referência e a temperatura do módulo FV. A polarização dos módulos é realizada por um capacitor. A Fig. 7 ilustra o traçador de curvas I-V utilizado.



Figura 7 – Traçador de curvas de corrente e tensão.

O substrato de brita rosa foi adicionado para analisar o impacto do albedo do substrato no ganho bifacial durante um dia de céu limpo. Foi necessário realizar a correção das curvas medidas para a mesma condição de temperatura e irradiância. Dessa forma foi utilizada uma planilha de correção desenvolvida no LABSOL conforme as diretrizes da IEC 60891(2009) para corrigir as curvas traçadas dos módulos monofacial e bifacial descoberto para a mesma condição de temperatura e irradiância do módulo bifacial coberto. Como as três curvas eram medidas em um intervalo de 1 a 2 minutos, as medições ocorriam em condições muito semelhantes de irradiância e temperatura, porém não suficientemente próximas, sendo necessária a correção de toda a curva I-V para uma condição comum em todos os casos.

O ganho bifacial energético (BG_E) é definido como o ganho percentual entre a energia gerada pelo módulo bifacial e o módulo monofacial (Deline *et al.*, 2019), conforme Eq. (1).

$$BG_E = \frac{E_{bifacial}}{E_{monofacial}} - 1 \quad (1)$$

onde $E_{bifacial}$ é a energia produzida pelo módulo bifacial e $E_{monofacial}$ é a energia produzida pelo módulo monofacial em kWh.

A eficiência de conversão dos módulos fotovoltaicos é um parâmetro importante na análise de qualidade de produção energética e é definida como a razão entre a potência do módulo pela área e irradiância (Ventura *et al.*, 2021), conforme Eq. (2).

$$\eta = \frac{P_m}{A \cdot G} \quad (2)$$

onde P_m é a potência máxima em W, A é a área do módulo em m^2 e G é a irradiância solar em W/m^2 .

O albedo (ρ), ou também chamado coeficiente de reflexão, é um parâmetro que tem relação direta com a produção do sistema fotovoltaico bifacial uma vez que a produção energética da face posterior do módulo bifacial depende da quantidade de radiação que a superfície do solo é capaz de refletir (Dantas De Carvalho, 2022). O albedo é obtido pela Eq. (3).

$$\rho = \frac{\sum R_n}{\sum G_n} \quad (3)$$

onde R_n é a radiação refletida por uma determinada superfície e G_n é a radiação incidente sobre a mesma superfície.

3. RESULTADOS

Os módulos monofacial e bifacial foram submetidos ao ensaio no simulador solar nas condições padrões de teste e os resultados obtidos evidenciaram que o módulo bifacial com seu lado posterior coberto pode ser utilizado como referência do módulo monofacial apresentando uma diferença de 0,09% na potência, não sendo necessária a normalização. Isto significa que a montagem terá um módulo monofacial como referência de desempenho da face frontal do módulo bifacial e sujeito às mesmas condições. A Fig. 8 mostra as curvas I-V e P-V dos módulos monofacial e bifacial coberto.

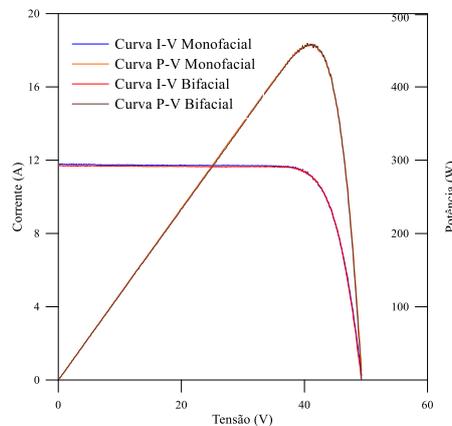


Figura 8 – Curva I-V e P-V dos módulos monofacial e bifacial coberto a $1000 W/m^2$ e $25^\circ C$.

O ganho bifacial foi calculado pelo incremento de potência comparativa entre o módulo monofacial e bifacial descoberto e o ganho bifacial instantâneo foi definido pelo incremento de potência comparativa com a medição do módulo bifacial coberto na face posterior e descoberto. As Curvas I-V foram traçadas em um dia de céu limpo e foram corrigidas para mesma irradiância e temperatura. Na Fig. 9 é possível analisar que os módulos monofacial e bifacial coberto

apresentam comportamento semelhante e que o deslocamento da curva do módulo bifacial descoberto é o ganho de potência devido à bifacialidade do módulo.

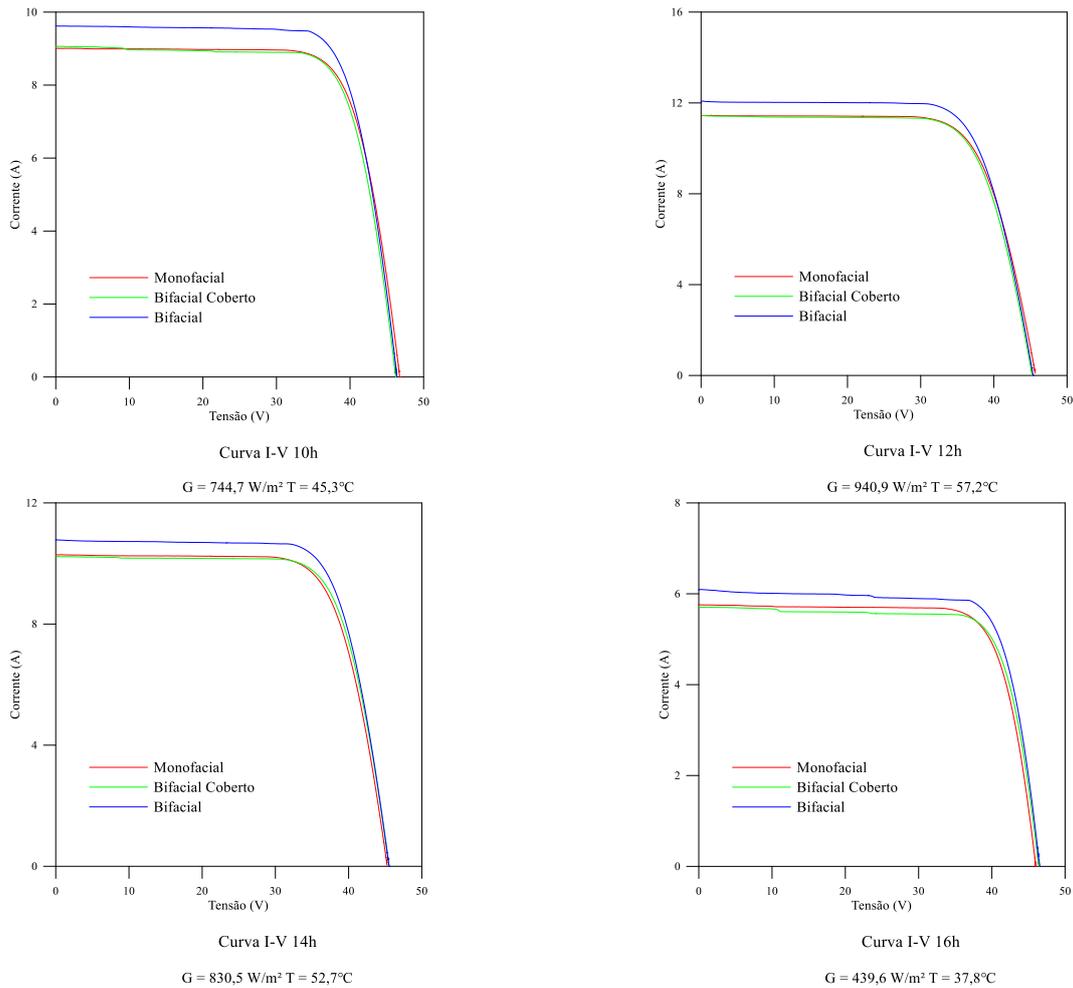


Figura 9 – Curvas I-V medidas às 10h, 12h, 14h e 16h.

Foram identificadas as potências máximas de cada curva nas medições realizadas e foi calculado o ganho bifacial. A média do ganho bifacial (ganho entre potência do módulo bifacial em relação ao módulo monofacial) foi de 5,84% e a média do ganho bifacial instantâneo (ganho entre potência do bifacial coberto e descoberto) para a brita rosa foi de 5,9%. Pode ser observado na Fig. 10 que houve uma tendência de aumento do ganho bifacial instantâneo durante o início e final do dia. Uma hipótese que pode explicar este comportamento é que no período da manhã e no início da tarde há uma parcela maior de radiação difusa, aumentando dessa forma a radiação refletida e, por sua vez, o ganho pela bifacialidade do módulo. Outra hipótese é que em ângulos de zênite maiores do Sol, a radiação direta atinge sem sombreamento o substrato colocado no solo.

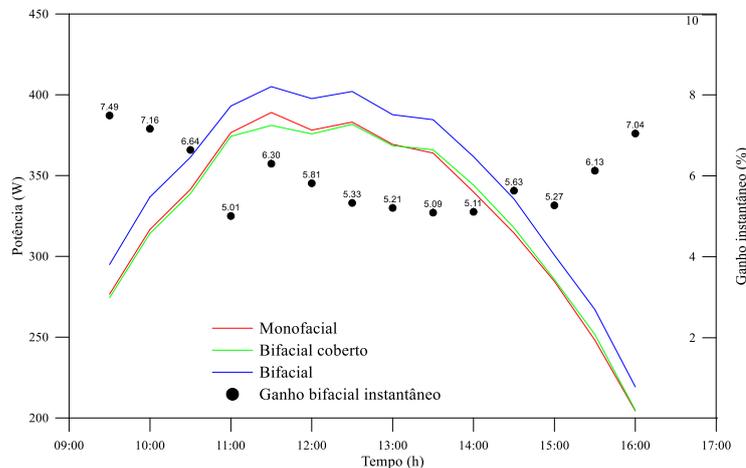


Figura 10 – Potência dos módulos determinados pela medida da curva I-V *outdoor* e corrigidas para a mesma condição junto com o ganho bifacial instantâneo de cada horário.

Foi avaliada a energia diária gerada pelos módulos e o ganho bifacial energético, conforme Fig. 11. O ganho bifacial energético diário médio dos dias observados foi de 5,89%. Quando analisada a energia total gerada durante o período o módulo monofacial gerou 27,60 kWh e o módulo bifacial 29,35 kWh resultando em um ganho de energia de 5,96% no período analisado.

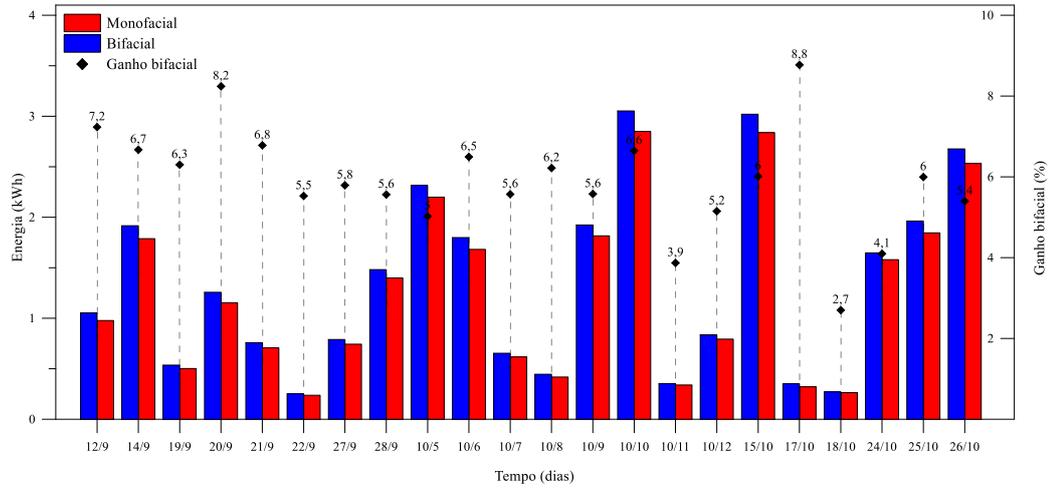


Figura 11 – Geração de energia dos módulos estudados e ganho bifacial percentual obtido em cada dia.

Também foi possível averiguar que o ganho bifacial acompanha o albedo do substrato quando medido pelas células de referência (Fig. 12). O albedo medido pelo piranômetro apresentou valores superiores ao da célula de referência uma vez que o piranômetro absorve os comprimentos de onda com uma curva de absorção espectral praticamente plana. Pode-se dizer que para fins de monitoramento de sistemas fotovoltaicos, idealmente o albedo deve ser medido pelas células de referências, ou então utilizado um modelo de correção para medição de albedo pelo piranômetro.

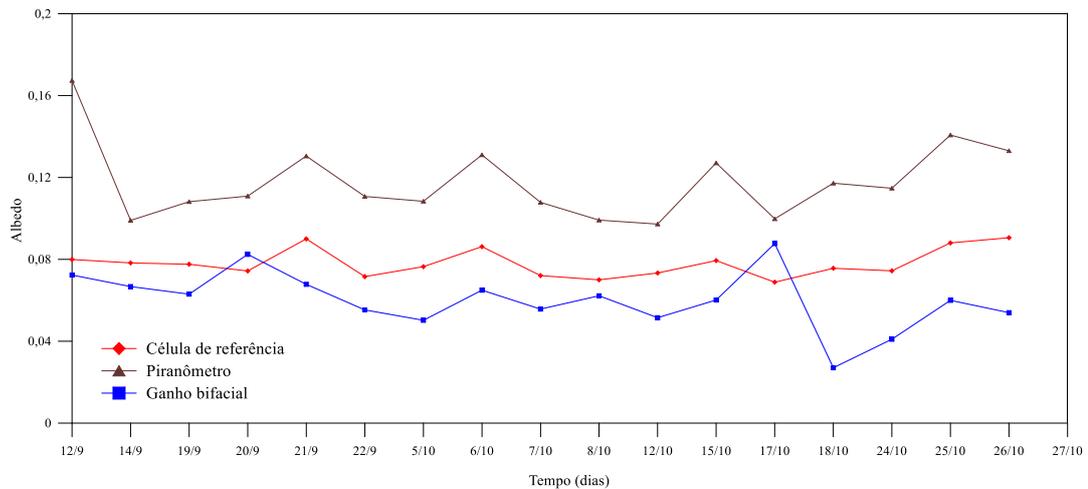


Figura 12 – Albedo médio diário medido pelas células de referência e piranômetros ao longo do período de exposição comparado ao ganho bifacial.

Estudos apresentados pelo IEA (2021) identificaram o albedo da brita em cerca de 28% e que o ganho bifacial neste substrato é em média de 11,6%. O albedo médio medido durante o período analisado para o substrato de brita rosa foi de 7,91% medido pelas células de referência e 12,50% medido pelos piranômetros. O albedo do experimento foi abaixo do definido em estudos, pois a medida do albedo foi realizada nas mesmas condições em que estão instalados os módulos, ocorrendo o sombreamento do material ao longo do dia e por consequência a redução da radiação incidente.

Com o intuito de estimar a eficiência da face posterior do módulo bifacial foi implementada uma equação adaptada para cálculo da eficiência energética. Na Eq. (4) é definida a eficiência energética diária ($\eta_{energia}$) como a razão entre a energia produzida pelo módulo e a irradiação incidente vezes a área do módulo.

$$\eta_{energia} = \frac{E_{módulo}}{A \times H_{incidente}} \quad (4)$$

onde $E_{módulo}$ é a energia total produzida no dia pelo módulo ou face do módulo em Wh, A é a área do módulo em m^2 e $H_{incidente}$ é a irradiação em Wh/m^2 .

Realizando a coleta dos dados, indicados na Tab. 2, durante 10 dias foi possível verificar que a eficiência máxima atingida pela face posterior do módulo bifacial foi de 14%, indicando que de toda a irradiância incidente na superfície posterior somente até 14% puderam ser convertidos em energia. Para o módulo bifacial como um todo obteve-se uma eficiência máxima de 23% e mono facial de 22%, registrado no dia 7 de outubro. Nesta data pode se observar que foi um dia nublado e de baixa produção energética, justificando dessa forma o registro de eficiência próxima da eficiência nominal.

Tabela 2 – Eficiência energética diária (EED).

	Bifacial	Bifacial face posterior	Monofacial
19/9	17%	10%	16%
21/9	17%	9%	16%
5/10	19%	9%	18%
6/10	21%	10%	20%
7/10	23%	12%	22%
8/10	23%	14%	22%
15/10	20%	9%	19%
24/10	19%	7%	19%
25/10	21%	9%	20%
26/10	19%	8%	18%
$\eta_{m\acute{a}x}$	23%	14%	22%
Catálogo (%)	20,4	-	20,5

Foi analisado a eficiência horária das medições obtidas no ensaio da curva I-V do dia 28 de agosto de 2023 e pode se observar que o incremento de eficiência horária do módulo bifacial em relação ao monofacial tem uma tendência de queda nos horários próximos ao meio-dia. O incremento médio horário da eficiência do módulo bifacial foi de 1,1%, conforme mostra a Fig. 13.

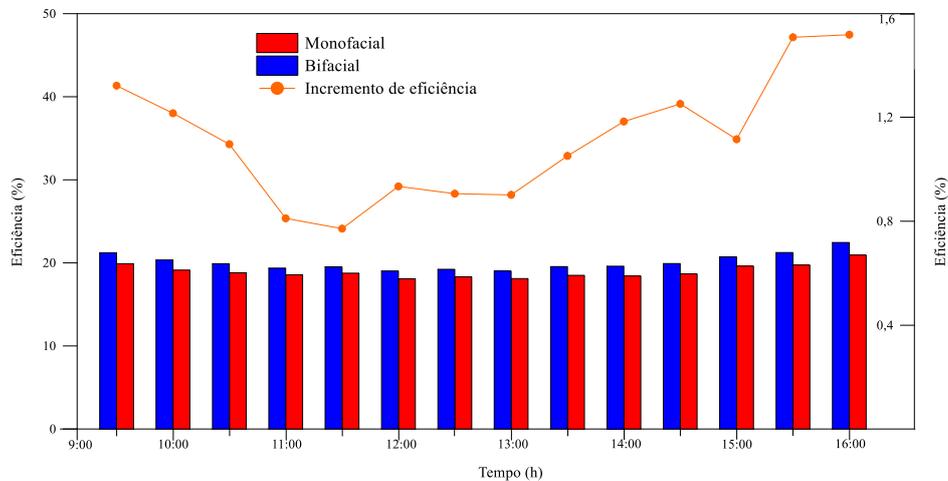


Figura 13 – Eficiência horária do módulo bifacial e monofacial em dia de céu limpo determinada por meio de medições da curva I-V.

4. CONCLUSÕES

A tecnologia na área solar fotovoltaica está em constante desenvolvimento e em busca de aumentar a produção de energia com mais rapidez e menor custo possível. Neste trabalho foi possível analisar através da curva de corrente e tensão que o ganho bifacial tende a ser maior durante os períodos em que a radiação difusa é predominante. Nestes espaços de tempo em que a irradiação não é alta, a bifacialidade do módulo tem um papel importante no acréscimo da produção energética, embora a contribuição para a energia total seja baixa, dada a baixa radiação incidente.

Em termos de produção de energia observou-se que o módulo bifacial produziu em média 6% mais energia do que o módulo monofacial nas condições de funcionamento do sistema. Além disso verificou-se que a determinação do albedo pode impactar diretamente nos resultados obtidos se comparados com o albedo medido pela célula de referência, pelo piranômetro ou até por valores obtidos em testes em condições padrão de ensaio. O albedo na condição da instalação medido pela célula de referência foi de 7,91% enquanto pelo piranômetro obteve-se o valor de 12,50%. Se considerarmos o albedo apresentado na literatura para a brita rosa o valor é de cerca de 28%, porém este valor é obtido para condições

padrão de medida de albedo de superfície, explicando a diferença entre os valores determinados na condição de instalação dos módulos estudados neste trabalho.

O ganho bifacial do módulo é mais expressivo em dias em que o sistema teve baixa produção de energia. Isso se deve ao fato de que nos dias chuvosos ou nublados o módulo bifacial tende a receber percentualmente mais radiação difusa permitindo ainda que pequeno um aumento na geração de energia.

Neste trabalho foi analisado particularmente o ganho bifacial e a eficiência da face bifacial do módulo, mostrando valores de ganho bifacial tanto por medidas da curva I-V ao longo de um dia como pelo monitoramento ao longo de uma sequência de dias. O desempenho dos módulos bifaciais está sujeito a diversas variáveis que precisam ser exploradas e analisadas, sendo que o trabalho realizado contribuiu para um aprofundamento do entendimento do desempenho dos módulos bifaciais. Destaca-se que módulos monofaciais podem ter uma componente bifacial normalmente não considerada e que teve que ser eliminada para a metodologia empregada no trabalho produzir resultados coerentes.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- Alam, M., Gul, M.S., Muneer, T., 2023. Performance analysis and comparison between bifacial and monofacial solar photovoltaic at various ground albedo conditions. *Renewable Energy Focus* 44, 295–316. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.01.005>
- Dantas De Carvalho, F., 2022. Avaliação prévia do impacto do albedo e outros parâmetros na geração de energia em uma UFV com módulos bifaciais.
- Deline, C., Ayala Peláez, S., Marion, B., Sekulic, B., Woodhouse, M., Stein, J., 2019. Bifacial PV System Performance: Separating Fact from Fiction.
- EPE, 2023. Relatório Síntese 2023, Empresa de Pesquisa Energética.
- Ganesan, K., Winston, D.P., Sugumar, S., Jegan, S., 2023. Performance analysis of n-type PERT bifacial solar PV module under diverse albedo conditions. *Solar Energy* 252, 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.020>
- García-Valverde, R., Chaouki-Almagro, S., Corazza, M., Espinosa, N., Hösel, M., Søndergaard, R.R., Jørgensen, M., Villarejo, J.A., Krebs, F.C., 2016. Portable and wireless IV-curve tracer for >5 kV organic photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 151, 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.02.012>
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M.D., Wagner, N., Gorini, R., 2019. The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews* 24, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>
- Hwang, S., Lee, H. seok, Kang, Y., 2023. Energy yield comparison between monofacial photovoltaic modules with monofacial and bifacial cells in a carport. *Energy Reports* 9, 3148–3153. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.02.011>
- IEA, 2021. Bifacial Photovoltaic Modules and Systems: Experience and Results from International Research and Pilot Applications 2021 Task 13 Performance, Operation and Reliability of Photovoltaic Systems PVPS.
- IEC 2019 TS 6090412, n.d.
- IEC 60891, 2009. Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics.
- IEC 61215-2005, n.d.
- Lopez-Garcia, J., Ozkalay, E., Kenny, R.P., Pinero-Prieto, L., Shaw, D., Pavanello, D., Sample, T., 2022. Implementation of the IEC TS 60904-1-2 Measurement Methods for Bifacial Silicon PV Devices. *IEEE J Photovolt* 12, 787–797. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2022.3161186>
- Lyvia, A., Lima De Araújo, P., Bezerra, A., 2020. Topologias em traçador de curva IV para módulos fotovoltaicos. Fortaleza.
- Manuel Longares, J., García-Jiménez, A., García-Polanco, N., 2023. Multiphysics simulation of bifacial photovoltaic modules and software comparison. *Solar Energy* 257, 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.04.005>
- Santos, A.J.L., Lucena, A.F.P., 2021. Climate change impact on the technical-economic potential for solar photovoltaic energy in the residential sector: a case study for Brazil. *Energy and Climate Change* 2. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100062>
- Schill, C., Brachmann, S., Koehl, M., 2015. Impact of soiling on IV-curves and efficiency of PV-modules. *Solar Energy* 112, 259–262. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.12.003>
- Tina, G.M., Bontempo Scavo, F., Merlo, L., Bizzarri, F., 2021. Comparative analysis of monofacial and bifacial photovoltaic modules for floating power plants. *Appl Energy* 281. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116084>
- Ventura, C., Tina, G.M., Gagliano, A., Aneli, S., 2021. Enhanced models for the evaluation of electrical efficiency of PV/T modules. *Solar Energy* 224, 531–544. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.018>

ANALYSIS OF THE I-V CURVE OF BIFACIAL PHOTOVOLTAIC MODULES TO DETERMINE BIFACIAL GAIN AND ENERGY EFFICIENCY

Abstract. Renewable energy sources have gained prominence in recent years, with photovoltaic solar energy being widely discussed as one of the most relevant clean energy sources for achieving decarbonization in developed countries. The search for new technologies to increase energy production has become essential to keep photovoltaic solar energy relevant in the international market. Bifacial photovoltaic modules play an important role in this topic, as they allow an increase in energy production, using the same components, raw materials and physical space for energy production. In this article, two photovoltaic modules from the same manufacturer and with the same nominal power were used, one monofacial and the other bifacial. Current and voltage curves were plotted to analyze the instantaneous bifacial gain on a clear day. Curve IV indicated a bifacial gain of 5.9% in relation to the monofacial module. It was possible to observe that during dawn and dusk the bifacial gain showed an increasing trend, reaching 7.5% for the analyzed model. The daily energy efficiency of the bifacial face of the photovoltaic module was 10% on average, reaching its maximum value of 14% for the analyzed data period. The same bifacial module presented an overall efficiency of 23% and the monofacial module of 22%. The albedo of the substrate played an important role in the analysis of efficiency values, since the albedo of the pink gravel for the reference cell was approximately 8% while for the pyranometer it was 12.5%. The analyzes indicated that the energy gain in using the bifacial module is advantageous, but it still presents a behavior to be explored depending on the conditions of different substrates and albedos.

Keywords: Curve IV, Bifacial Gain, Albedo.