

16º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2025

EFEITOS DO SOMBREAMENTO EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS: UMA ANÁLISE DA CURVA IV

GABRIEL H. D. IKEHARA¹, DANIEL H. L. SANTÂNA², MARCELO K. SHIBUYA³

¹ Graduando em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista PIBIC, IFSP, Campus Guarulhos, gabriel.hideki@aluno.ifsp.edu.br..

² Graduando em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista de Extensão, IFSP, Campus Guarulhos, d.hakam@aluno.ifsp.edu.br..

³ Doutor em Engenharia de Produção na área de energias renováveis, Docente e Pesquisador, IFSP, Campus Guarulhos, marcelo.shibuya@ifsp.edu.br..

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.04.01-0 Geração da Energia Elétrica

RESUMO: Com o aumento de usinas fotovoltaicas em áreas urbanas, o sombreamento pode ser uma das causas da degradação mais acentuada. Contudo, o principal problema causado pelo sombreamento é a perda de desempenho dos módulos fotovoltaicos. Embora os diodos *bypass* atenuem os efeitos de degradação e perda de potência, casos de acionamento incorretos podem agravar as perdas. Esse artigo avaliou a caracterização da curva IV em módulos *half-cell* com diferentes níveis de sombreamento aplicados em uma única célula. Os ensaios foram realizados em campo, utilizando um traçador de curva IV e de potência, e um medidor de irradiância. Os resultados indicam que o sombreamento, mesmo parcial, causou perdas de desempenho significativas. A expectativa da minimização de perdas pelo diodo *bypass*, em módulos *half-cell*, não foi eficaz nas condições aplicadas, assim, criando dois pontos de MPPT. Conclui-se que a compreensão dos efeitos do sombreamento é crucial para a melhoria de sistemas fotovoltaicos, ressaltando a importância de estratégias de mitigação eficazes.

PALAVRAS-CHAVE: sombreamento; energia solar; diodo bypass; desempenho.

EFFECTS OF SHADING ON PHOTOVOLTAIC MODULES: AN IV CURVE ANALYSIS

ABSTRACT: With the increase of photovoltaic plants in urban areas, the shading can be one of the causes of the more accentuated degradation. However, the principal problem caused by the shading is the reduction of loss of performance of the photovoltaic modules. Although bypass diodes attenuate the effects of degradation and loss of power, cases of incorrect activation can aggravate the losses. This article evaluated the characterization of the IV curve in half-cell modules with different levels of shading applied in a single cell. The tests were realized in the field, utilizing an IV and power curve tracer, and an irradiance meter. The results indicate that the shading, even partial, caused significant performance losses. The expectation of the minimization of losses by the bypass diode, in half-cell modules, was not effective in the applied conditions, thus creating two MPPT points. It is concluded that the comprehension of the effects of the shading is crucial for the improvement of photovoltaic systems, highlighting the importance of effective mitigation strategies.

KEYWORDS: Shading; solar energy; bypass diode; performance.

INTRODUÇÃO

Com o número crescente de usinas fotovoltaicas nas últimas décadas, seja em grandes ou pequenas escalas, grande parte delas estão ou irão apresentar algum tipo de defeito ou falha. A confiabilidade dos módulos fotovoltaicos é um fator essencial para a viabilidade de sistemas fotovoltaicos. Um dos principais desafios, apontado pela "*Review of Failures of Photovoltaic Modules*" da Agência Internacional de Energia (2017), é o sombreamento, que causa perdas significativas de potência que comprometem a vida útil do módulo.

Em áreas urbanas, o efeito de sombreamento ocorre devido a obstáculos próximos, como construções, árvores ou instalações mal planejadas. Nos módulos FV, há um componente eletrônico semicondutor chamado diodo *bypass* que minimiza os danos causados pelo sombreamento. No trabalho de Coutinho et al. (2016), em testes de sombreamento em um arranjo de células, os diodos *bypass* mostraram grande eficiência, obtendo uma mitigação de perda de desempenho.

Um processo ideal para analisar essas falhas de módulos fotovoltaicos é a caracterização da curva IV, que traça a relação entre a tensão e a corrente de um módulo. Conforme afirmado por Zhu (2018), a caracterização da curva IV é um processo com fidelidade, facilidade e flexibilidade.

Este artigo tem por objetivo, investigar o desempenho do módulo fotovoltaico do tipo *half-cell*, utilizando o ensaio de curva IV, com diferentes porcentagens de sombreamento (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) em uma única célula, observando a caracterização das curvas IV e de potência.

MATERIAL E MÉTODOS

O objetivo dos ensaios é analisar a perda de potência de um módulo do tipo *half-cell* sob diferentes níveis de sombreamento (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) aplicados a uma única célula (Figura 1). A compreensão do comportamento do módulo com o sombreamento de uma única célula é de grande importância para entender o desempenho de módulos que utilizam a tecnologia *half-cell*. Com os dados retirados do traçador de curva IV, é possível analisar o comportamento e quantificar a perda do desempenho do módulo, observando se a perda de potência é proporcional ao aumento de sombreamento na célula.

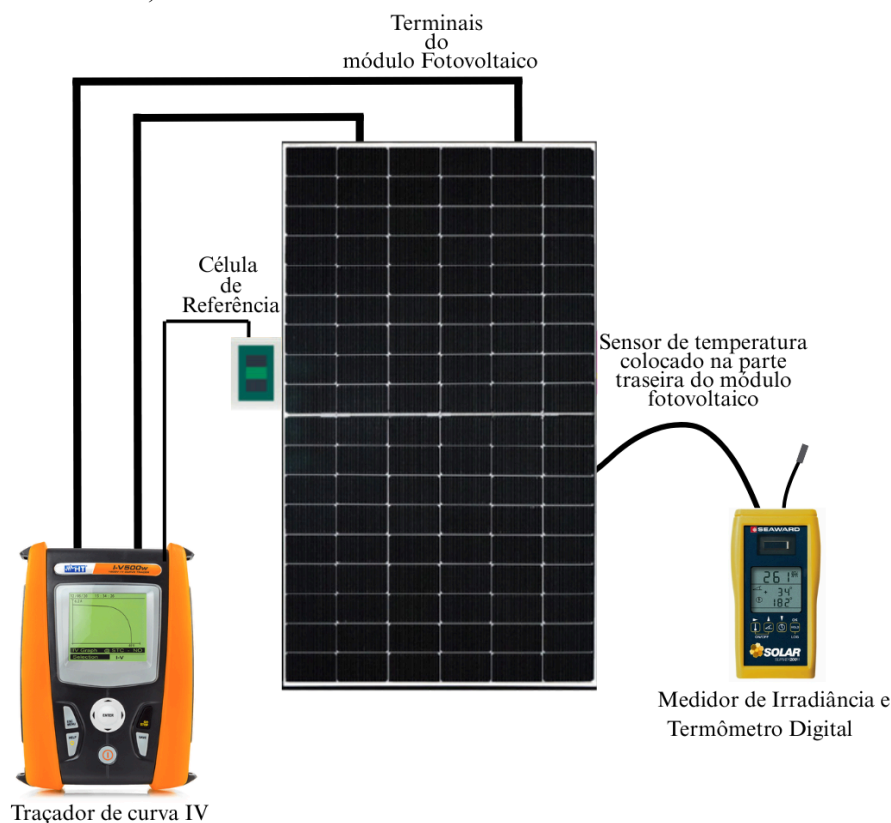
Para caracterizar o sombreamento, foi utilizado um módulo fotovoltaico de marca *RISEN* RSM144-7-450M. Como preparo prévio, as informações da ficha técnica do módulo foram inseridas no traçador de curva IV da *HT Instruments* de modelo HT I-V 500W. O módulo foi limpo com um pano úmido para remover a sujeira acumulada. A célula de referência foi posicionada no mesmo plano (inclinação e azimute) do módulo, e um medidor de irradiância com funcionalidade de termômetro de contato digital (modelo da *SEAWARD SURVEY 200R*) foi fixado na parte traseira do módulo. Após a estabilização térmica dos equipamentos, o inversor foi desligado e os terminais do módulo selecionado foram desconectados da *string*. A célula de referência, juntamente aos terminais do módulo, foram conectados ao traçador de curva IV, como mostra o esquema na Figura 2. Todas as etapas seguiram os procedimentos da norma NBR-16274, capítulo 7 ("Processo de ensaio - Categoria 2").

Foram realizados quatro ensaios sob as mesmas condições de irradiância solar. Cada ensaio foi feito em um nível diferente de sombreamento, cobrindo 25%, 50%, 75% e 100% de uma única célula do módulo fotovoltaico. O sombreamento foi aplicado usando papel Canson, coberto com fita isolante para criar uma barreira negra e opaca não reflexiva. Um ensaio adicional, sem sombreamento, foi conduzido para fins comparativos e como parâmetro de referência. Todas as curvas IV e curvas de potência foram extraídas do software gratuito *TopView*, da *HT Instruments*, que oferece uma análise clara dos dados do traçador de curvas.

FIGURA 1. Representação do sombreamento no módulo fotovoltaico (Ensaio 5 - 100% de sombreamento).



FIGURA 2. Esquema da interconexão entre o módulo fotovoltaico, o traçador de curva I-V (*HT Instruments HT I-V 500W*), a célula de referência e o medidor de irradiância com termômetro digital (*SEAWARD SURVEY 200R*).



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos cinco ensaios realizados, o módulo submetido ao sombreamento de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da célula obteve uma curva IV apresentando uma queda ao final da curva, semelhante a um “degrau” (cada vez mais aparente com o aumento do sombreamento da célula), como ilustrado na Figura 3, com os sombreamentos de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Nos gráficos, estão presentes as curvas IV (Figura 3), e as curvas de potência (Figura 4) corrigidas em condições padrão de ensaio (STC - *Standard Test Conditions*). Vale ressaltar que os valores de tensão em circuito aberto (V_{oc}) e a corrente em curto-circuito (I_{sc}) foram menores que os valores nominais, como mostrado no gráfico da Figura 3, causados por degradações ao longo de 3 anos de operação e pela diferença de temperatura.

A Tabela 1 mostra os resultados dos ensaios obtidos com cada traçagem de curva IV e a perda de potência do módulo em comparação com o módulo sem sombreamento. A perda de potência é crescente conforme o avanço da sombra artificial sobre a célula, conforme mostrado na Figura 4. Essa

caracterização da curva IV e a perda de potência deve-se ao não acionamento do diodo bypass, também conhecido como diodo de proteção em casos de sombreamento, segundo Pedroza e Rampinelli (2018). Com o não acionamento do diodo *bypass*, a perda de potência evidenciada nas curvas de potência (Figura 4) e na Tabela 1, é diretamente proporcional com a queda da corrente no final da curva IV. Mesmo com sombreamento total, o diodo não é acionado, obtendo assim dois pontos de máxima potência (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*), mais evidente a partir do terceiro ensaio com 50% de sombreamento da célula, o que pode ocasionar mal funcionamento do inversor ao rastrear o ponto MPPT, segundo Coutinho et al. (2016). Além disso, pode ocasionar pontos quentes (*hotspots*) na célula sombreada, o que acarreta na degradação futura do módulo.

FIGURA 3. Curvas IV dos sombreamentos de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% em uma única célula.

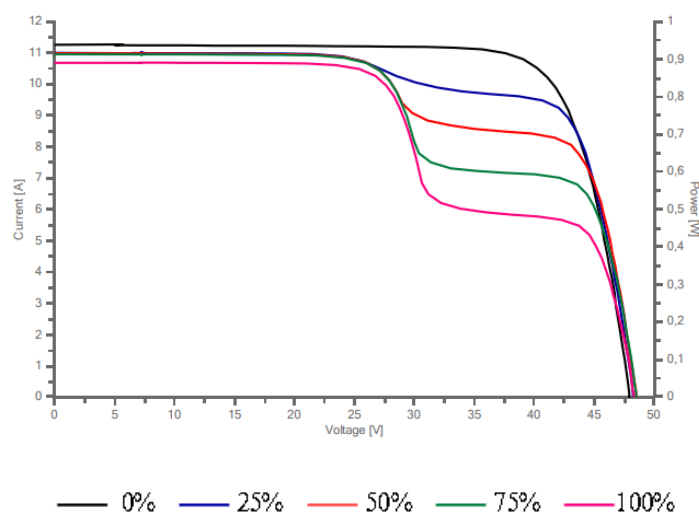


FIGURA 4. Curva de potência dos sombreamentos de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% em uma única célula.

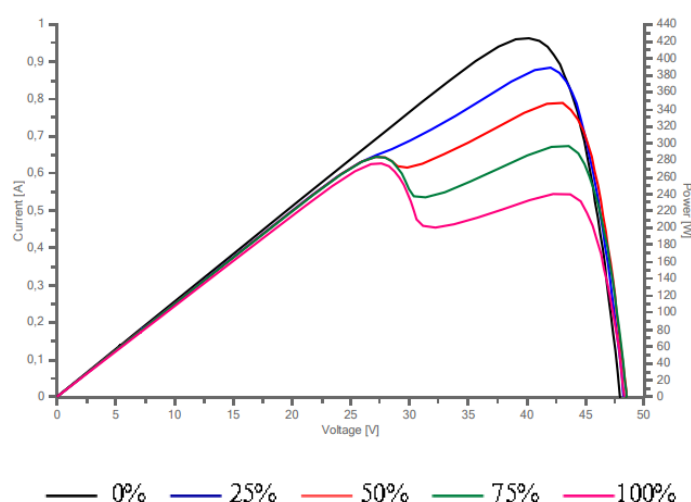


TABELA 1. Resultados obtidos nos ensaios de máxima potência.

Ensaio	Sombreamento de uma célula (%)	Potência do módulo sem sombreamento em STC (W)	Potência do módulo sombreado em STC (W)	Perda de potência do módulo (%)
--------	--------------------------------	--	---	---------------------------------

Ensaio 1	0	423,07	423,07	0
Ensaio 2	25	423,07	388,51	8,16
Ensaio 3	50	423,07	346,83	18,02
Ensaio 4	75	423,07	295,89	30,06
Ensaio 5	100	423,07	275,25	34,94

CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo principal analisar a perda de potência em um módulo fotovoltaico tipo *half-cell* sob diferentes níveis de sombreamento (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) aplicados a uma única célula. É importante notar que o sombreamento foi aplicado de forma artificial e em condições simuladas de campo, ou seja, um cenário semelhante encontrado em campo, o que difere de ambientes controlados como os de um laboratório.

Os ensaios mostraram que o sombreamento, mesmo em níveis diferentes em uma única célula, resulta na perda de potência no módulo fotovoltaico, o que resulta também em perda de eficiência. Ademais, o módulo pode apresentar uma degradação mais acentuada com a criação de *hotspots* na célula sombreada. A análise também revelou que podem ser criados dois pontos de MPPT, causando dificuldades para o inversor ao mapear o ponto de máxima potência, o que pode comprometer a eficiência do sistema fotovoltaico. É importante notar que, apesar da tecnologia *half-cell* e da expectativa de uma atuação mais eficiente do diodo *bypass* em sombreamento total de célula, a perda de desempenho ainda foi significativa.

Os resultados ressaltam a necessidade de estratégias para combater o sombreamento em sistemas fotovoltaicos, como o planejamento cuidadoso da instalação para minimizar a incidência de sombras e a seleção adequada de diodos *bypass*. Compreender os efeitos do sombreamento é de grande importância para otimizar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos ao longo de sua vida útil.

Portanto, o objetivo do estudo foi alcançado com êxito, fornecendo uma perspectiva valiosa sobre o comportamento de um módulo do tipo *half-cell*. Para pesquisas futuras, sugere-se a avaliação de impactos de sombreamento progressivo em múltiplas células em módulos do tipo *half-cell*, assim como análise de soluções para otimizar a minimização dessas perdas.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

M.K.S. contribuiu com a supervisão do projeto, análise formal dos dados e conceituação do trabalho. G.H.D.I e D.H.L.S procedeu com a metodologia e experimentos. G.H.D.I procedeu na parte escrita do trabalho.

AGRADECIMENTOS

Expresso minha gratidão ao Instituto Federal de São Paulo, campus Guarulhos, pela disponibilização do espaço físico e infraestrutura necessária para o desenvolvimento deste projeto. Agradecimentos especiais são estendidos ao orientador pela cessão de equipamentos essenciais, que foram fundamentais para a realização das atividades. Agradeço também a instituição pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsa, que possibilitou a execução desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16274**: Sistemas fotovoltaicos conectados à rede - Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

COUTINHO , C. R.; NARDOTO , A. F.; PROVETI, J. R. C.; COURA , D. J. C. Efeito do sombreamento em módulos fotovoltaicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (CBENS), 7., 2016, Belo Horizonte. **Anais** [...]. Belo Horizonte: CBENS, 2016. p. 1-8. DOI: 10.59627/cbens.2016.1895. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1895>. Acesso em: 15 jun. 2025.

IEA PVPS TASK 13. **Review of Failures of Photovoltaic Modules**. [S. l.]: IEA Photovoltaic Power Systems Programme, 2017. (IEA-PVPS T13-08:2017). Disponível em: <https://www.iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04/IEA-PVPS-Task-13-Report-Review-of-failures-of-photovoltaic-modules.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2025.

PEROZA, J.; RAMPINELLI, G. A. Análise de desempenho e atuação de diodos de bypass em um módulo fotovoltaico comercial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (CBENS), 7., 2018, Gramado. **Anais** [...]. Gramado: ABRAPES, 2018. p. 1-8. DOI: 10.59627/cbens.2018.331. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/331>. Acesso em: 21 jun. 2025.

ZHU, Y. An adaptive I-V curve detecting method for photovoltaic modules. In: IEEE INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS AND APPLICATION CONFERENCE AND EXPOSITION (PEAC), 2., 2018, Shenzhen. **Proceedings** [...]. Shenzhen: IEEE, 2018. p. 1-6. DOI: 10.1109/PEAC.2018.8590262. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8590262>. Acesso em: 14 jun. 2025.