



10º Encontro de Ensino Pesquisa e Extensão

Patrocínio, MG, Outubro de 2023

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE MÉTODOS DE TRAÇAGEM DE CURVAS I-V EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Juliano Augusto Rosa Santos; Cintia Carvalho Oliveira.
Instituto Federal do Triângulo Mineiro

Modalidade: Pesquisa

Formato: Artigo Completo

Resumo

No contexto da geração de energia fotovoltaica, a obtenção precisa das curvas corrente-tensão (I-V) de módulos fotovoltaicos é de fundamental importância para monitorar o desempenho e a eficiência desses sistemas. Este artigo científico aborda diversos métodos de medição I-V, destacando o uso de carga resistiva, carga capacitiva, carga eletrônica e conversores CC-CC. Cada método é analisado quanto à sua aplicabilidade, vantagens e desvantagens. Além disso, são apresentados exemplos de implementações práticas e estudos que demonstram a eficácia dessas técnicas. A compreensão abrangente desses métodos é essencial para pesquisadores e profissionais no campo da energia solar, contribuindo para o aprimoramento das técnicas de avaliação e otimização do desempenho dos sistemas fotovoltaicos, em consonância com o crescimento contínuo desse mercado global de energia renovável.

Palavras-chave: Traçador de Curva I-V; Sistemas fotovoltaicos (PV); Degradação.

1 INTRODUÇÃO

Os painéis fotovoltaicos (PV) são fontes de energia renovável que precisam ser monitorados para evitar perdas. Uma forma de fazer isso é medir as curvas corrente-tensão (I-V) e potência-tensão (P-V) dos painéis, que mostram como eles estão funcionando. Essas curvas são comparadas com os dados do fabricante, que são obtidos em condições ideais. Assim, é possível identificar e corrigir problemas nos painéis.

A energia fotovoltaica está crescendo no mundo, mas os painéis podem se degradar com o tempo e o ambiente, diminuindo sua potência e eficiência. Por isso, é importante fazer manutenções preventivas e preditivas para verificar o estado de cada painel. Nesse sentido, as curvas I-V são muito úteis para extrair parâmetros dos painéis e avaliar seu desempenho.

A eficiência de um painel é a relação entre a potência máxima que ele gera e a energia solar que ele recebe. Essa eficiência depende de vários fatores, como a luz e a temperatura. Além disso, cada painel tem características diferentes, mesmo sendo do mesmo tipo. Por isso, só a medição das curvas I-V pode mostrar como um painel está funcionando, o que é importante para o projeto, instalação e manutenção dos sistemas fotovoltaicos. Existem vários métodos para medir as curvas I-V, e uma análise deles seria muito útil para quem trabalha com energia fotovoltaica.

Esta pesquisa tem como objetivo revisar os tipos de traçadores de curvas I-V que existem na literatura, como cargas resistivas, cargas capacitivas, cargas eletrônicas e conversores CC-CC.

2 OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo revisar os diferentes traçadores de corrente-tensão (I-V) que existem na literatura como: cargas resistivas, cargas capacitivas, cargas eletrônicas e conversores CC-CC, que são usados para avaliar o desempenho de painéis fotovoltaicos.

Como objetivos específicos temos:

1. Identificar os diferentes tipos de traçadores de corrente-tensão (I-V) que são usados para avaliar o desempenho de painéis fotovoltaicos na literatura.
2. Analisar como os traçadores de corrente-tensão (I-V) podem medir com precisão os parâmetros elétricos dos dispositivos fotovoltaicos, como corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, potência máxima e fator de forma.

3 CARACTERÍSTICAS IV E CURVAS I-V DE GERADORES FOTOVOLTAICOS

As células fotovoltaicas de cristal são constituídas por uma junção p-n de silício, o que torna o modelo de diodo uma escolha natural para representar as propriedades de saída dessas células (MD SABUDIN; JAMIL; ROSLI, 2017). Diversos métodos de modelagem são utilizados para descrever as características de saída dos sistemas fotovoltaicos. A abordagem predominante se baseia no modelo de circuito equivalente de um único diodo (SDECM), ilustrado na Figura 1.

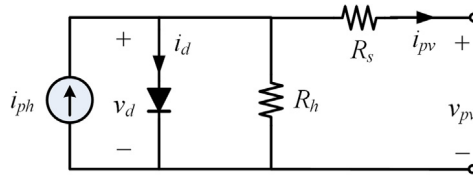


Figura 1: Diagrama equivalente do modelo de um único diodo (ZHU; XIAO, 2020).

Nessa representação, há uma fonte de corrente em paralelo com um diodo, e elementos não ideais representados por resistores em derivação e série. A corrente de saída da célula fotovoltaica é descrita pela Equação (1) (MAHMOUD; XIAO; ZEINELDIN, 2012).

$$i_{pv} = i_{ph} - i_s \left[e^{\frac{q(v_{pv} + R_s i_{pv})}{K T_c A_n}} - 1 \right] - \frac{v_{pv} + R_s i_{pv}}{R_h}, \quad (1)$$

onde i_{pv} e v_{pv} representam, respectivamente, a corrente de saída e a tensão da célula fotovoltaica; R_s e R_h são, respectivamente, a resistência em série e a resistência em derivação do modelo; i_{ph} é a corrente fotônica da célula fotovoltaica; i_s denota a corrente do diodo; q é a constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K); T_c é a temperatura da célula fotovoltaica em kelvins; e A_n é o fator de idealidade do diodo.

A curva I-V resultante da saída fotovoltaica pode ser dividida em três regiões, como indicado na Figura 2. Essas regiões são conhecidas como a região de fonte de corrente, a região de fonte de potência e a região de fonte de tensão, dependendo da inclinação da curva I-V (XIAO, 2017).

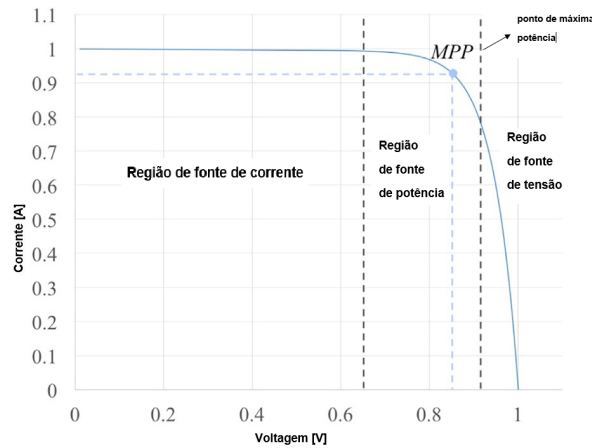


Figura 2: Definição das três zonas baseada na curva I-V (ZHU; XIAO, 2020).

4 DESVIOS NA CURVA I-V DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A Figura 3 exibe uma curva I-V típica, identificando variações cruciais para detecção de anomalias e avaliação da degradação prematura do sistema fotovoltaico.

Ao coletar a curva I-V, é crucial monitorar variáveis climáticas conforme a norma IEC 60904. A medição deve ocorrer com irradiância solar acima de 800 W/m² e flutuações na temperatura e irradiância limitadas a 0,5%. Medidas em intervalos menores que 20 ms são descartadas devido a flutuações iniciais.

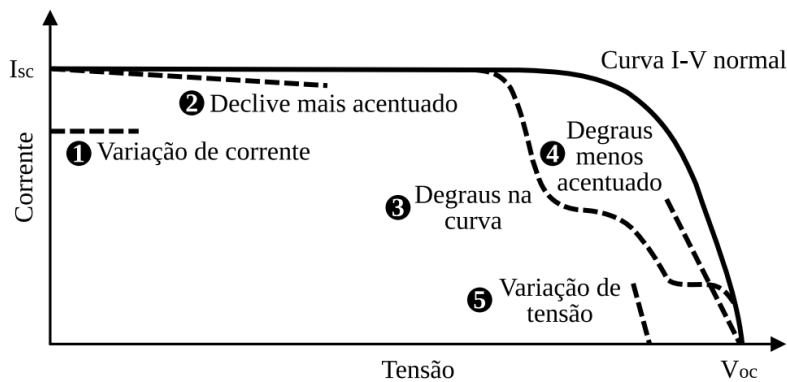


Figura 3: Principais variações na curva I-V de um sistema fotovoltaico (ZHU; XIAO, 2020).

A Figura 3 exibe uma curva I-V típica, identificando variações cruciais para detecção de anomalias e avaliação de degradação prematura em sistemas fotovoltaicos (ABNT, 2014).

A coleta da curva I-V requer monitoramento das condições climáticas conforme a norma IEC 60904, com irradiância solar acima de 800 W/m² e flutuações de temperatura e irradiância abaixo de 0,5%. Medidas com intervalos menores que 20 ms são descartadas

devido a flutuações iniciais (ABNT, 2014).

Variações na corrente resultam de diversos fatores, como degradação, sujeira, obstruções, problemas de calibração ou erros de medição (ABNT, 2014).

O desvio 2 pode ser causado por corrente de derivação, discrepância na corrente de curto-circuito ou sombreamento parcial (ABNT, 2014).

Desequilíbrios nas áreas do arranjo (desvio 3) podem originar-se em sombreamento, células danificadas ou falhas nos diodos de derivação (ABNT, 2014).

O desvio 4 está relacionado ao aumento da resistência em série devido a danos na fiação, conexões defeituosas, resistência dos módulos ou cabos longos (ABNT, 2014).

O desvio 5 ocorre devido a sombreamento, diodos de derivação em curto-circuito ou medição incorreta da temperatura, afetando a tensão gerada (ABNT, 2014).

5 MÉTODOS DE MEDIÇÃO I-V

Existem diversos métodos para medir a curva I-V de um módulo fotovoltaico. A escolha do método depende das circunstâncias específicas da medição, do equipamento disponível e dos objetivos da análise. Os métodos de medição I-V mais comuns incluem: método de carga resistiva, carga capacitiva, eletrônica e conversor CC-CC.

5.1 Método de Carga Resistiva

A Figura 4 apresenta o método de variação resistiva que ajusta a resistência de forma contínua, idealmente de zero até o infinito, enquanto registra os pontos de corrente-tensão (I-V) da curva resultante (Figura 5). Esse método é comumente empregado em aplicações de menor custo, especialmente em sistemas de baixa capacidade, de baixa potência, devido à escassez de resistores de alta potência no mercado (MORALES-ARAGONÉS et al., 2021).

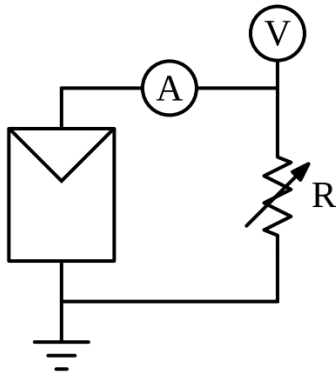


Figura 4: Traçador de curvas I-V com carga resistiva (TRETER; MICHELS, 2018).

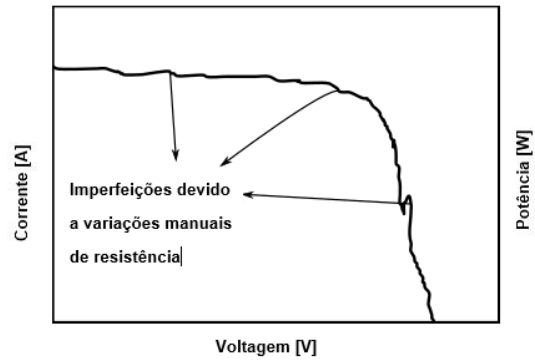


Figura 5: Curva I-V resultante do uso de um traçador de resistência variável (EL HAMMOUMI et al., 2018).

Essa metodologia é amplamente citada na literatura, com referências notáveis como (EL HAMMOUMI et al., 2018; MALIK; DAMIT, 2003; MAHMOUD, 2006; RIVAI; RAHIM, 2013). No entanto, ela apresenta limitações na obtenção de uma curva de qualidade (Figura 5), devido à tendência intrínseca das resistências em variar, influenciadas pelo fator de variação. Além disso, a capacidade limitada de alterar a resistência de maneira ágil resulta em um processo de medição por etapas. Nesses estágios, tanto a tensão quanto a corrente (precisamente, a tensão através de um resistor de derivação) são medidas utilizando um par de multímetros digitais. De acordo com (DURAN et al., 2008), a mudança manual do resistor de carga resulta em um processo lento, permitindo mudanças nas condições de radiação solar e térmicas durante a medição.

5.2 Método de Carga Capacitiva

Entre as técnicas disponíveis para essa finalidade, destaca-se o método da carga capacitiva, que foi proposto em 1982 e continua a ser amplamente utilizado na atualidade (TRETER; MICHELS, 2018). Este método consiste em conectar um capacitor em paralelo ao gerador fotovoltaico, permitindo a obtenção das curvas I-V ao longo do tempo. Nesse processo, o capacitor é carregado gradualmente, e o circuito passa do ponto de curto-circuito para o ponto de circuito aberto. A Figura 6 ilustra visualmente essa técnica.

Durante a fase inicial da aquisição, o capacitor age como um curto-circuito, o que resulta em uma corrente substancial (DURAN et al., 2008). Conforme o capacitor se carrega, a corrente diminui progressivamente, enquanto a tensão aumenta até atingir a condição de

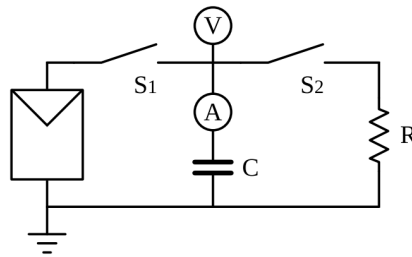


Figura 6: Traçador de curvas I-V com carga capacitiva (TRETER; MICHELS, 2018).

circuito aberto. É importante notar que, antes de iniciar uma nova medição, é necessário descarregar o capacitor.

Um aspecto crucial desse método é que ele difere da abordagem da carga resistiva, pois não permite uma reprodução parcial das curvas I-V. A escolha do tamanho do capacitor é crucial e está diretamente relacionada à corrente de curto-circuito (I_{sc}) do gerador fotovoltaico e inversamente proporcional à tensão/ de circuito aberto (V_{oc}) (WARNER; COX III, 1982). A relação entre esses parâmetros pode ser expressa pela seguinte equação:

$$C = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \cdot T_{scan} \quad (2)$$

onde C representa a capacitância, I_{sc} é a corrente de curto-circuito, V_{oc} é a tensão de circuito aberto e T_{scan} é o tempo, em segundos, necessário para que o capacitor seja carregado. É importante observar que sistemas de medição mais rápidos permitem o uso de capacitores de menor tamanho.

Além disso, as condições climáticas desempenham um papel significativo na produção de energia de geradores fotovoltaicos. Para lidar com variações nas condições climáticas, alguns pesquisadores propuseram sistemas que empregam dois capacitores com diferentes níveis de capacitância (IBIRRIAGA et al., 2010). Dependendo das condições climáticas, o sistema seleciona o capacitor apropriado para manter a consistência na aquisição das curvas I-V.

Em diferentes estudos, ficou evidenciado que a variação da capacitância do capacitor não afeta significativamente os resultados da aquisição da curva I-V, desde que as condições climáticas permaneçam constantes (ERKAYA; MOSES; MARSILLAC, 2016). Essa constatação é relevante, pois oferece flexibilidade na escolha dos componentes para a implementação prática do método.

Em resumo, o método da carga capacitiva representa uma abordagem robusta e amplamente utilizada para a aquisição de curvas I-V de geradores fotovoltaicos. Ele oferece uma percepção valiosa para o monitoramento da eficiência e do desempenho desses sistemas em diferentes condições ambientais, contribuindo para o avanço contínuo da tecnologia fotovoltaica e o aproveitamento sustentável da energia solar.

5.3 Carga Eletrônica

A técnica de carga eletrônica (Figura 7) utiliza um transistor (geralmente um MOSFET) como carga, no qual a resistência entre o dreno e a fonte é modulada através da tensão entre o gate e a fonte. Isso, por sua vez, controla o fluxo de corrente fornecido pelo módulo fotovoltaico. Quando esse método é empregado para traçar a curva I-V do módulo, o MOSFET deve operar em seus três modos de operação (corte, ativo e região ôhmica). Como resultado, a maior parte da potência entregue pelo módulo terá que ser dissipada por esse dispositivo, o que limita sua aplicação a média potência.

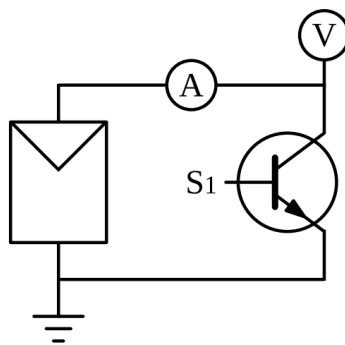


Figura 7: Traçador de curvas I-V com carga Eletrônica (TRETER; MICHELS, 2018).

Em (KUAI; YUVARAJAN, 2006), foi proposta uma carga eletrônica simples baseada em um MOSFET para obter a curva I-V de painéis por meio de uma rápida varredura da carga. Sua vantagem reside na rápida variação da resistência de carga equivalente do MOSFET. O MOSFET linear é controlado por um sinal de varredura de baixa frequência com amplitude suficiente para cobrir a faixa completa das características do painel. Vários MOSFETs podem operar em paralelo para lidar com uma corrente de saída mais alta de um conjunto com vários painéis fotovoltaicos. A tensão e a corrente de saída são medidas usando um divisor de tensão e um resistor sensor, respectivamente. Os resultados são alimentados para um osciloscópio para exibir a curva. I_{sc} e V_{oc} são obtidos usando dois detectores de pico, e os sinais de tensão e

corrente são multiplicados usando um multiplicador para obter a potência instantânea. Assim, um terceiro detector de pico pode ser usado para capturar o valor de máxima potência (MPP).

Os autores de (FORERO; HERNÁNDEZ; GORDILLO, 2006) introduzem um sistema para monitorar o desempenho de usinas solares fotovoltaicas, incluindo curvas I-V, que são obtidas em pouco tempo para evitar interferências de nuvens durante medições ao ar livre. A carga eletrônica é constituída por vários transistores em cascata. Reduzindo gradualmente a corrente base do transistor, o gerador fotovoltaico passa do ponto de curto-circuito para o status de tensão em circuito aberto. Uma placa de aquisição de dados com conversor A/D de alta velocidade é usada para medir a corrente e a tensão enquanto o ponto de operação muda. A inovação desse circuito é que a varredura da curva I-V é controlada por meio de uma rampa de corrente, em vez de uma rampa de tensão.

Em (SALMON et al., 2003), é apresentado um circuito para medir curvas I-V de células solares fotovoltaicas de múltiplas junções (aquelas que têm mais de uma junção para capturar mais fótons). Um transistor MOSFET de canal N e um amplificador operacional são combinados para criar o dreno de corrente controlado por tensão. Para cada configuração de corrente, um amplificador diferencial é usado para ler a tensão através da célula solar, varrendo-a por vários pontos ao longo de sua curva característica. Os dados coletados para cada curva incluem a temperatura da célula solar, o ângulo solar e o tempo.

5.4 Conversor CC-CC

O conversor CC-CC permite simular uma carga resistiva e, assim, pode ser usado para obter as curvas I-V de geradores fotovoltaicos. A resistência simulada pelo conversor é proporcional ao ciclo de trabalho aplicado ao conversor. A Figura 8 mostra como seria a obtenção da curva I-V de um módulo fotovoltaico usando o conversor CC-CC com a topologia SEPIC.

As topologias tradicionais de conversores CC-CC como Buck, Boost e Buck-Boost podem ser empregadas para obter as curvas I-V. No entanto, o conversor Buck não pode simular impedâncias inferiores à impedância de carga e, por isso, não alcança os pontos perto da corrente de curto-circuito. O conversor Boost não pode simular impedâncias superiores à impedância de carga e, por isso, não alcança os pontos perto da tensão de circuito aberto.

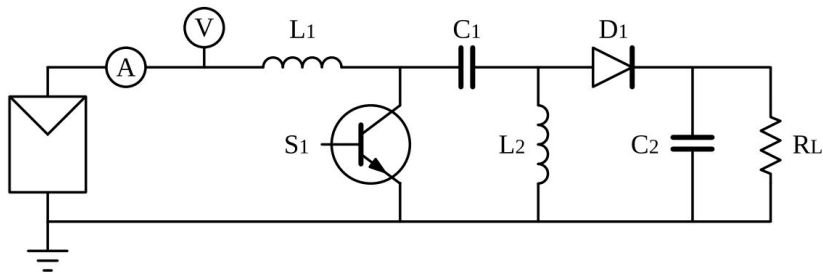


Figura 8: Obtenção de curvas I-V com conversor CC-CC como carga (TRETER; MICHELS, 2018).

Porém, o conversor Buck-Boost e suas topologias derivadas permitem varrer toda a curva I-V de um gerador fotovoltaico (TRETER; MICHELS, 2018).

As topologias Buck-Boost e Zeta têm como característica a corrente elétrica pulsante na entrada, causando problemas significativos na obtenção da curva I-V. Já nas topologias Cuk e SEPIC, a corrente elétrica de entrada é contínua. As topologias Cuk e SEPIC têm características muito parecidas: têm o mesmo número de componentes; submetem os transistores aos mesmos esforços; têm níveis de eficiência similares. Porém, o conversor SEPIC tem algumas vantagens como a não inversão da polaridade na tensão de saída e a facilidade na incorporação de isolamento galvânico (TRETER; MICHELS, 2018).

Em (BOSCAINO et al., 2014) foi usado um conversor Buck-Boost para realizar a obtenção da curva I-V. Enquanto que no trabalho (SILVA et al., 2017) os autores usaram um conversor SEPIC. Ambos os trabalhos usam a técnica de variar o ciclo de trabalho do conversor para mudar o valor da resistência simulada. O conversor Buck-Boost foi projetado para operar em 125 kHz, enquanto que o conversor SEPIC foi projetado para operar em 30 kHz.

6 Conclusão

Para concluir, os métodos de medição da curva I-V em sistemas fotovoltaicos variam em complexidade e eficácia. A escolha do método depende das circunstâncias específicas da medição, das metas da análise e das restrições de custo. O método de carga resistiva é simples e amplamente utilizado, mas pode ser lento e impreciso. O método de carga capacitiva oferece resultados robustos, mas requer cuidado na escolha do capacitor. O uso de carga eletrônica permite uma varredura rápida da curva I-V, mas pode ser limitado pela capacidade

de dissipação de calor. Os conversores CC-CC permitem simular uma carga resistiva e são eficazes para obter curvas I-V completas, mas também podem gerar corrente pulsante.

Cada método tem suas vantagens e desvantagens, e a escolha deve ser feita com base nas necessidades específicas da aplicação e nos recursos disponíveis. Independentemente do método escolhido, a medição precisa da curva I-V é fundamental para a avaliação e manutenção eficaz de sistemas fotovoltaicos, contribuindo para o aproveitamento máximo da energia solar e a sustentabilidade energética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 16274. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede-requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho.** [S.l.]: ABNT Rio de Janeiro, 2014.

BOSCAINO, V. et al. A standard-compliant prototype for PV module curve detection. In: IET. 3RD Renewable Power Generation Conference (RPG 2014). [S.l.: s.n.], 2014. P. 1–6.

DURAN, E. et al. Different methods to obtain the I–V curve of PV modules: A review. In: IEEE. 2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference. [S.l.: s.n.], 2008. P. 1–6.

EL HAMMOUMI, A. et al. Low-cost virtual instrumentation of PV panel characteristics using Excel and Arduino in comparison with traditional instrumentation. **Renewables: wind, water, and solar**, Springer, v. 5, n. 1, p. 1–16, 2018.

ERKAYA, Y.; MOSES, P.; MARSILLAC, S. On-site characterization of PV modules using a portable, MOSFET-based capacitive load. In: IEEE. 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). [S.l.: s.n.], 2016. P. 3119–3122.

FORERO, N.; HERNÁNDEZ, J.; GORDILLO, G. Development of a monitoring system for a PV solar plant. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 47, n. 15-16, p. 2329–2336, 2006.

IBIRRIAGA, J. J. M. et al. Low-cost, high flexibility I–V curve tracer for photovoltaic modules. In: IEEE. 2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. [S.l.: s.n.], 2010. P. 1210–1215.

KUAI, Y.; YUVARAJAN, S. An electronic load for testing photovoltaic panels. **Journal of Power Sources**, Elsevier, v. 154, n. 1, p. 308–313, 2006.

MAHMOUD, M. M. Transient analysis of a PV power generator charging a capacitor for measurement of the I–V characteristics. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 31, n. 13, p. 2198–2206, 2006.

MAHMOUD, Y. A.; XIAO, W.; ZEINELDIN, H. H. A parameterization approach for enhancing PV model accuracy. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 60, n. 12, p. 5708–5716, 2012.

MALIK, A.; DAMIT, S. J. B. H. Outdoor testing of single crystal silicon solar cells. **Renewable energy**, Elsevier, v. 28, n. 9, p. 1433–1445, 2003.

MD SABUDIN, S. N.; JAMIL, N. M.; ROSLI, N. A review of parameter estimation used in solar photovoltaic system for a single diode model. In: IOP PUBLISHING, 1. **JOURNAL of Physics: Conference Series**. [S.l.: s.n.], 2017. v. 890, p. 012037.

MORALES-ARAGONÉS, J. I. et al. A review of I–V tracers for photovoltaic modules: topologies and challenges. **Electronics**, MDPI, v. 10, n. 11, p. 1283, 2021.

RIVAI, A.; RAHIM, N. A. A low-cost photovoltaic (PV) array monitoring system. In: IEEE. 2013 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT). [S.l.: s.n.], 2013. P. 169–174.

SALMON, J. et al. Solar cell measurement system for NPS spacecraft architecture and technology demonstration satellite, NPSAT1, 2003.

SILVA, Í. F. et al. Portable and low cost photovoltaic curve tracer. In: IEEE. 2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP). [S.l.: s.n.], 2017. P. 1–6.

TRETER, M. E.; MICHELS, L. Métodos de aquisição experimental de curvas iv de arranjos fotovoltaicos: uma revisao. **Seminário de Eletrônica de Potência e Controle**, p. 1–6, 2018.

WARNER, T.; COX III, C. A high power current-voltage curve tracer employing a capacitive load. **Solar Cells**, Elsevier, v. 7, n. 1-2, p. 175–181, 1982.

XIAO, W. **Photovoltaic power system: modeling, design, and control**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2017.

ZHU, Y.; XIAO, W. A comprehensive review of topologies for photovoltaic I–V curve tracer. **Solar Energy**, Elsevier, v. 196, p. 346–357, 2020.