

MÉTODOS DE AQUISIÇÃO EXPERIMENTAL DE CURVAS I-V DE ARRANJOS FOTOVOLTAICOS: UMA REVISÃO

Marcos Eduardo Treter
Instituto Federal Catarinense - IFC
São Bento do Sul, SC - Brasil
Email: marcos.treter@ifc.edu.br

Leandro Michels
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria, RS - Brasil
Email: michels@gepoc.ufsm.br

Resumo—Este trabalho apresenta uma revisão dos principais métodos utilizados para aquisição experimental de curvas corrente-tensão (I-V) de sistemas fotovoltaicos. As curvas I-V fornecem informações detalhadas sobre os parâmetros elétricos de um arranjo fotovoltaico, tendo como principal aplicação a avaliação e o monitoramento do desempenho de sistemas fotovoltaicos. Os principais métodos empregados para realizar a aquisição de uma curva I-V são o método da carga eletrônica e o método da carga capacitiva. As diferentes formas de implementar esses métodos apresentam variações na operação, exatidão, facilidade de implementação, custos, entre outros. Nesse trabalho são discutidas as vantagens e desvantagens de cada uma dessas técnicas.

Palavras-chave – Sistemas fotovoltaicos; Monitoramento; Análise de falhas.

I. INTRODUÇÃO

A capacidade global de gerar energia elétrica através do sol no final de 2006 era de apenas 6,6 GW. Ao final de 2016 essa capacidade atingiu 306,5 GW [1]. Portanto, em apenas uma década a geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos contou com um aumento superior a 4.500 %. Espera-se que a capacidade fotovoltaica ultrapasse 400 GW em 2018, 500 GW em 2019, 600 GW em 2020 e 700 GW em 2021 [1].

A maior produtora de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos é a China que ao final de 2016 totalizou 77,9 GW conectados à rede elétrica [2]. Alguns países em desenvolvimento, como o Brasil, ainda não realizaram investimentos significativos na área fotovoltaica, justificando o atraso pelos preços elevados que são praticados pelos integradores de sistemas fotovoltaicos [3], [4].

Para garantir que o retorno dos investimentos seja rápido é imprescindível que os arranjos fotovoltaicos não operem abaixo da potência projetada. Os dispositivos fotovoltaicos apesar de serem conhecidos pela robustez estão suscetíveis a falhas. Durante a fabricação dos módulos fotovoltaicos podem ocorrer problemas que venham a contribuir para a diminuição da capacidade de gerar energia, entre esses problemas podemos citar a quebra e o fissuramento de células fotovoltaicas [5]. Além disso, devido os módulos fotovoltaicos normalmente

serem instalados em áreas abertas estão suscetíveis ao estresse climático que pode acelerar a degradação desses dispositivos [6].

As falhas em um sistema fotovoltaico não estão restritas aos módulos, outros componentes também podem vir a falhar. Por exemplo, o inversor fotovoltaico ao apresentar uma falha normalmente interrompe a produção de energia de todo o arranjo fotovoltaico. Situação semelhante ocorre na falha de um fusível que desconecta toda a cadeia de módulos fotovoltaicos [7].

Uma das formas de garantir o funcionamento adequado dos arranjos fotovoltaicos se dá através do monitoramento da produção de energia. Os inversores fotovoltaicos normalmente são equipados com dispositivos que apresentam aos usuários as informações gerais sobre o funcionamento do sistema fotovoltaico. As métricas tradicionalmente apresentadas são: potência gerada, corrente e tensão no ponto de máxima potência. Através dessas métricas os usuários podem diagnosticar falhas maiores, mas quando poucos módulos fotovoltaicos apresentam baixo desempenho as falhas normalmente são negligenciadas.

O motivo das falhas menores não serem percebidas pelos usuários está no comportamento volátil que os geradores fotovoltaicos possuem. A quantidade de energia gerada em cada período do dia está diretamente relacionada com as condições meteorológicas, sendo influenciada pela presença de nuvens e pela concentração dos gases atmosféricos, além dos movimentos de rotação da Terra.

O aumento da radiação solar incidente sobre os módulos fotovoltaicos gera um acréscimo na tensão de circuito aberto e na corrente elétrica gerada pelo módulo, caso a temperatura seja mantida constante [8]. Enquanto que o aumento da temperatura de operação do módulo fotovoltaico reduz significativamente a tensão gerada pelo módulo, além de elevar minimamente, quase de forma desprezível a corrente gerada [8]. A influência da irradiação solar na curva I-V de um módulo fotovoltaico é apresentada pela na Figura 1.

Uma forma de identificar as falhas em um arranjo fotovoltaico é através da análise da curva corrente-tensão (I-V) fornecida pelos módulos fotovoltaicos. As métricas fornecidas

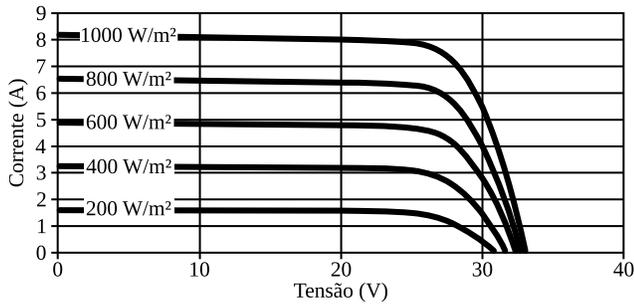


Figura 1. Influência da irradiação na curva I-V de um módulo fotovoltaico. Fonte: Adaptado de [9].

pela análise da curva I-V oferecem vantagens significativas para detecção de falhas se comparadas com outros métodos de monitoramento. A medida da curva I-V pode ser considerada um certificado de qualidade e desempenho dos geradores fotovoltaicos, permitindo conhecer com precisão os parâmetros elétricos de um módulo fotovoltaico [10].

Uma das principais referências da literatura sobre traçadores de curvas I-V está na revisão bibliográfica publicada em 2008 pelos autores Duran *et al.* [11]. Devido a relevância do tema e da data de publicação da revisão bibliográfica [11], este trabalho apresentará a atualização das técnicas utilizadas na aquisição de curvas I-V.

II. CURVAS I-V DE ARRANJOS FOTOVOLTAICOS

A Figura 2 ilustra uma curva I-V típica e os principais tipos de desvios que podem ocorrer nessa curva. A análise da causa desses desvios permite diagnosticar e identificar as falhas que estão ocorrendo no arranjo fotovoltaico. Além disso, o histórico de curvas I-V permite avaliar a degradação precoce do sistema fotovoltaico.

Durante a aquisição da curva I-V deve ser realizado o monitoramento das variáveis climáticas. Conforme a norma IEC 60904, a medição da curva I-V só pode ser realizada nos períodos em que o nível de irradiação solar é superior a 800 W/m^2 . Além disso, a flutuação dos níveis de temperatura e irradiação não podem ser superiores a 0,5 % durante a aquisição da curva I-V.

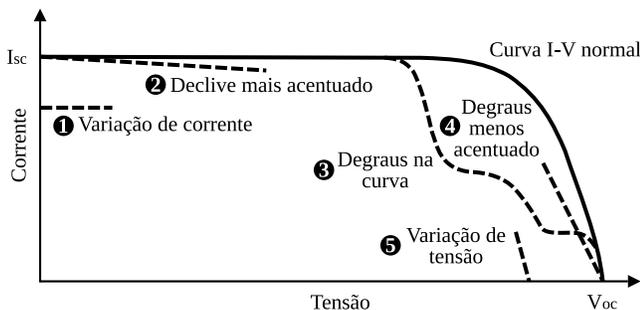


Figura 2. Tipos de desvios em uma curva I-V. Fonte: Adaptado da norma NBR 16274 [12].

A temperatura dos módulos fotovoltaicos localizados no campo é um parâmetro com baixa velocidade de flutuação. Ao contrário dos níveis de irradiação que podem sofrer flutuações rápidas e abruptas. Para evitar grandes flutuações a medição da curva I-V deve ser realizada no menor tempo possível.

A aquisição da curva I-V deve ocorrer, preferencialmente, em um intervalo de tempo superior a 20 ms e inferior a 100 ms, conforme os autores Spertino *et al.* [13]. Os limites do intervalo são valores eurísticos não normatizados, entretanto o limite máximo é justificado pela necessidade de evitar que o clima - principalmente a irradiação - influencie nas medidas realizadas. Já as medidas que ocorrem em um intervalo de tempo inferior a 20 ms são desprezíveis devido as oscilações que ocorrem ao iniciar a aquisição da curva I-V. Essas oscilações são consequências dos parâmetros parasitas presentes em um arranjo fotovoltaico, como a capacitância provocada pelas conexões série e paralela entre os módulos fotovoltaicos.

Para a aquisição da curva I-V são utilizados dispositivos sensores que permitam a leitura dos níveis de corrente e tensão do gerador fotovoltaico, atualmente a norma IEC 60904 não regulamenta a precisão desses dispositivos. Entretanto, a mesma norma em versões anteriores regulamentava que os dispositivos sensores deveriam ter precisão de $\pm 0,5 \%$. Evidentemente, quanto maior a precisão dos dispositivos sensores melhor será a qualidade da curva I-V e consequentemente a avaliação dos geradores fotovoltaicos.

Uma série de fatores pode causar a variação da corrente, representada na Figura 2 pelo desvio 1. Entre estes fatores estão a degradação, sujeira ou obstrução do arranjo fotovoltaico. Assim como problemas de calibração ou de medição do sensor de irradiação que deve estar montado no mesmo plano do arranjo fotovoltaico [12].

O desvio 2 pode ocorrer devido à existência de significativo caminho de corrente *shunt* nas células fotovoltaicas ou devido ao descasamento da corrente de curto-circuito dos módulos da mesma série. A corrente *shunt* é qualquer corrente que atravessa a célula fotovoltaica, geralmente devido a defeitos localizados nessa célula ou em suas conexões. O descasamento da corrente de curto-circuito ocorre devido a problemas de variações paramétricas dos módulos ou de fabricação. Uma outra possibilidade para o desvio 2 são os sombreamentos parciais de módulos fotovoltaicos [12].

Degraus na curva, representados pelo desvio 3, são indícios de descasamento entre diferentes áreas do arranjo fotovoltaico. As causas desse desvio podem estar relacionadas com o sombreamento parcial do arranjo fotovoltaico, células fotovoltaicas danificadas ou defeitos no diodo de *by-pass* [12].

O desvio 4 é influenciado pelo aumento da resistência série do circuito. As possíveis causas são danos na fiação do arranjo fotovoltaico, falhas nas conexões dos módulos ou aumento da resistência série do módulo. Ensaiar arranjos fotovoltaicos com cabos longos pode influenciar na aquisição da curva I-V, devido a resistência destes cabos. O aumento da resistência série dos módulos pode ocorrer devido a degradação, corrosão ou problemas de fabricação das células [12].

O desvio 5 pode ter como causas o sombreamento significativo e uniforme de todo o arranjo fotovoltaico, o diodo de *bypass* curto-circuitado ou a medição incorreta da temperatura de operação do arranjo fotovoltaico. Conforme foi visto, a temperatura de operação afeta diretamente a tensão fornecida pelo módulo fotovoltaico [12].

III. MÉTODOS DE OBTENÇÃO EXPERIMENTAL DAS CURVAS I-V

O estudo das técnicas para rastreamento da curva I-V de geradores fotovoltaicos é mais antigo que a expansão dos sistemas fotovoltaicos distribuídos. Pesquisas acadêmicas com mais de 35 anos já registravam o interesse nessa área. O primeiro trabalho encontrado na área de traçadores de curvas I-V de geradores fotovoltaicos data de 1982 [14].

Warner e Cox [14] desenvolveram um traçador de curvas I-V com carga capacitiva. O sistema permitia traçar curvas de arranjos fotovoltaicos com potência de até 10 kW. Uma das curiosidades deste trabalho são as dificuldades que os autores encontraram naquela época devido à falta de dispositivos computacionais com velocidade suficiente para realizar a leitura dos valores de corrente e tensão.

As pesquisas acadêmicas na área de traçadores de curva I-V continuaram sendo realizadas após a publicação do primeiro trabalho. Em 1996, Barbisio [15] propôs uma melhoria no método de aquisição de curvas I-V proposto em 1982. O método original necessitava que o capacitor fosse carregado negativamente para garantir que os pontos da curva I-V próximos a corrente de curto-circuito fossem rastreados. A nova proposta substituiu a fonte utilizada para realizar a carga negativa pela presença de um indutor acoplado ao capacitor.

A revisão bibliográfica proposta por Duran *et al.* [11] apresentou seis métodos para aquisição da curva I-V, sendo eles: carga resistiva; carga capacitiva; carga eletrônica; conversor CC/CC; amplificador bipolar de potência; fonte de alimentação de quatro quadrantes. Todos os métodos permitem realizar o rastreamento da curva I-V de geradores fotovoltaicos, entretanto cada método possui características próprias quanto a forma de operação, precisão, facilidade de implantação, custos, etc. Esta revisão é considerada pela literatura um bom ponto de partida para iniciar os estudos sobre as técnicas de aquisição de curvas I-V.

A. Técnica da resistência variável

Utilizar uma carga resistiva é a maneira mais simples de obter a curva I-V de um gerador fotovoltaico. De forma ideal, a aquisição da curva I-V consiste em conectar um resistor em paralelo ao gerador fotovoltaico e incrementar o valor da resistência de zero até infinito. A técnica é ilustrada pela Figura 3. A cada novo incremento no valor da resistência os valores de tensão e corrente fornecidos pelo gerador são medidos.

Gupta, Chauhan e Saxena [16] utilizaram uma carga resistiva para realizar a aquisição da curva I-V de dois módulos fotovoltaicos. Um multímetro foi utilizado para realizar a aquisição dos valores de corrente e tensão. A curva adquirida era

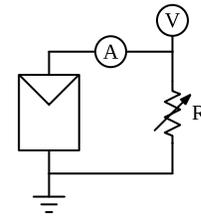


Figura 3. Traçador de curvas I-V com carga resistiva. Fonte: Produção do autor.

apresentada em uma aplicação desenvolvida em *LabView*. A vantagem da utilização da carga resistiva está na simplicidade do circuito pois poucos elementos são necessários.

Uma técnica para combinação dos resistores utilizados como carga foi proposta por Rivai e Rahim [17]. A vantagem da combinação é a possibilidade de utilizar um menor número de resistores para rastrear um conjunto com maior número de pontos da curva I-V. Os autores validaram a solução ao realizar a aquisição da curva I-V de quatro módulos fotovoltaicos de 75 W conectados em série.

Na prática esse método pode ser aplicado apenas a geradores fotovoltaicos de baixa potência, pois resistores para potências elevadas são caros e inviabilizam a técnica de aquisição. Além disso, nesse método os pontos próximos da corrente de curto-circuito não podem ser rastreados.

B. Técnica da carga capacitiva

A aquisição de curvas I-V através de uma carga capacitiva proposta em 1982 mantém-se como uma das técnicas mais utilizadas. O método consiste em conectar um capacitor em paralelo ao gerador fotovoltaico. Enquanto o capacitor é carregado o circuito move-se do ponto de curto-circuito para o ponto de circuito aberto. Essa técnica é ilustrada pela Figura 4. No início da aquisição o capacitor comporta-se como um curto-circuito e a medida que a carga do capacitor aumenta, a corrente cai e a tensão aumenta até atingir a condição de circuito aberto. Antes de iniciar uma nova medição é necessário realizar a descarga do capacitor.

O método da carga capacitiva ao contrário do método da carga resistiva não permite uma reprodução parcial da curva I-V. O tamanho do capacitor é diretamente proporcional a corrente de curto-circuito do gerador fotovoltaico e inversamente proporcional a tensão de circuito aberto. De acordo com

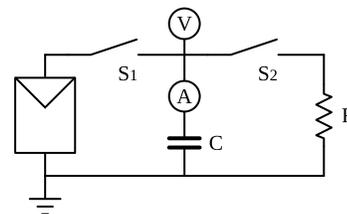


Figura 4. Traçador de curvas I-V com carga capacitiva. Fonte: Produção do autor.

Warner e Cox [14] é possível estimar o tamanho do capacitor utilizando a seguinte equação:

$$C = \frac{I_{sc}}{V_{oc}} \cdot T_{scan} \quad (1)$$

onde C é o valor da 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 para o capacitor ser carregado. Observa-se que quanto mais rápido for o sistema de medição das variáveis de corrente e tensão, menor pode ser o tamanho do capacitor.

Conforme foi apresentado, as condições climáticas influenciam diretamente na produção de energia dos geradores fotovoltaicos. Para que a aquisição das curvas I-V sob forte e baixa irradiação ocorram em intervalos de tempo semelhantes, os autores Ibirriaga *et al.* [5] propuseram um sistema com dois capacitadores que possuem diferentes níveis de capacitâncias. Dependendo das condições climáticas o sistema utiliza o capacitor de grande ou de pequena capacitância.

O trabalho dos autores Spertino *et al.* [13], investigou que o método clássico de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), perturbar e observar, possui algumas falhas quando o arranjo fotovoltaico está parcialmente sombreado. Dessa forma, os autores propuseram um novo método de MPPT que analisa a curva I-V do arranjo fotovoltaico adquirida através de uma carga capacitiva.

Uma carga capacitiva é utilizada por Erkaya, Moses e Marsillac [18] para aquisição da curva I-V de módulos fotovoltaicos. Os resultados desse trabalho apontam que a utilização de capacitores com capacitâncias diferentes não altera o resultado da aquisição da curva I-V, desde que as condições climáticas sejam mantidas constantes.

Os autores Willoughby e Muritala [19] investigaram o efeito da poeira acumulada sobre os módulos fotovoltaicos na região da Nigéria. De acordo com os resultados obtidos o módulo coberto de poeira reduziu mais de 20% da potência gerada em relação a outro módulo idêntico mas que foi mantido limpo.

C. Técnica da carga eletrônica

Uma carga eletrônica pode ser utilizada no rastreamento das curvas I-V, costumeiramente emprega-se um transistor do tipo MOSFET como carga. O transistor é conectado em paralelo com o gerador fotovoltaico e opera em seus três modos de operação: zona de corte, ativa e de saturação. A Figura 5 ilustra essa técnica de aquisição de curvas I-V. O método da carga eletrônica apresenta como vantagens o seu tamanho reduzido e a possibilidade de controlar a velocidade da aquisição da curva I-V. A desvantagem dessa técnica de aquisição está na necessidade de dissipar níveis elevados de potência, pois a maior parte da potência fornecida pelo módulo fotovoltaico é dissipada pelo transistor, portanto a aplicação fica restrita a geradores de baixa potência. Uma solução para esse problema pode ser a utilização de vários transistores conectados em paralelo para que a potência dissipada seja dividida entre os dispositivos.

O trabalho [20] utiliza um transistor do tipo MOSFET como carga para realizar o rastreamento da curva I-V de

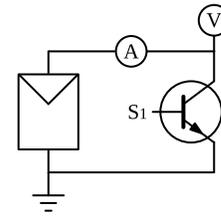


Figura 5. Traçador de curvas I-V com carga eletrônica. Fonte: Produção do autor.

geradores fotovoltaicos. O sistema proposto possui baixo custo e é utilizado em aplicações educacionais. Em [21] foi desenvolvido um sistema de aquisição de curvas I-V utilizando um MOSFET como carga eletrônica. Já em [22] foi utilizado um transistor do tipo IGBT como carga. Os três trabalhos citados apresentaram os resultados de rastreamento da curva I-V de apenas um ou no máximo dois módulos fotovoltaicos conectados em série devido à restrição imposta pela necessidade de dissipar elevada potência.

D. Técnica do conversor CC/CC

O uso de conversor CC/CC permite emular uma resistência elétrica e dessa forma pode ser utilizado para realizar o rastreamento de curvas I-V de geradores fotovoltaicos. O valor da resistência emulada pelo conversor é proporcional a razão cíclica aplicada ao conversor. A Figura 6 ilustra como se daria o rastreamento da curva I-V de um módulo fotovoltaico ao utilizar o conversor CC/CC com a topologia SEPIC.

As topologias clássicas de conversores CC/CC como *Buck*, *Boost* e *Buck-Boost* podem ser utilizadas para realizar o rastreamento de curvas I-V. Entretanto o conversor *Buck* não pode emular impedâncias menores que a impedância de carga e, portanto, não atinge os pontos próximos a corrente de curto-circuito. O conversor *Boost* não pode emular impedâncias maiores que a impedância de carga e, portanto, não atinge os pontos próximos a tensão de circuito aberto. Contudo, o conversor *Buck-Boost* e suas topologias derivadas permitem varrer toda a curva I-V de um gerador fotovoltaico [11].

As topologias *Buck-Boost* e *Zeta* possuem como característica a corrente elétrica pulsada na entrada, causando significativos problemas na aquisição da curva I-V. Enquanto que nas topologias *Cuk* e *SEPIC*, a corrente elétrica de entrada é contínua. As topologias *Cuk* e *SEPIC* apresentam características muito semelhantes: possuem o mesmo número de

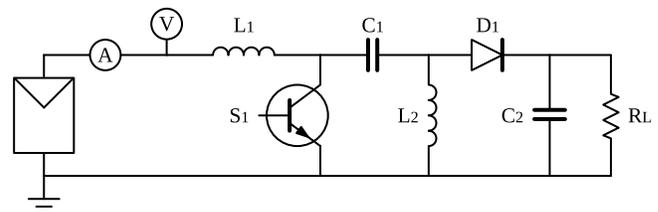


Figura 6. Traçador de curvas I-V com conversor CC/CC como carga. Fonte: Produção do autor.

componentes; submetem os transistores aos mesmos esforços; possuem níveis de eficiência similares. No entanto, o conversor SEPIC possui algumas vantagens como a não inversão da polaridade na tensão de saída e a facilidade na incorporação de isolamento galvânico [23].

Em [24] foi utilizado um conversor *Buck-Boost* para realizar a aquisição da curva I-V. Enquanto que no trabalho [25] os autores utilizaram um conversor SEPIC. Ambos os trabalhos utilizam a técnica de variar a razão cíclica do conversor para alterar o valor da resistência emulada. O conversor *Buck-Boost* foi projetado para operar em 125 kHz enquanto que o conversor SEPIC foi projetado para operar em 30 kHz.

No trabalho [26] é empregado um conversor *Boost* no rastreamento da curva I-V. Os autores utilizaram uma fonte de tensão independente na saída do conversor para manter o nível de tensão mais alto que a tensão de circuito aberto dos módulos, permitindo que o conversor *Boost* pudesse rastrear os pontos próximos da tensão de circuito aberto. Em [27] foi desenvolvido um conversor SEPIC operando em malha fechada para realizar a aquisição da curva I-V. A estratégia de controle do tipo proporcional-integral (PI) é empregada para controlar a tensão fornecida pelo gerador fotovoltaico.

E. Técnica do Amplificador Bipolar de Potência

Um circuito com um amplificador bipolar de potência e dois transistores como carga operando nos seus três modos de operação (zona de corte, ativa e de saturação) permitem a aquisição de curvas I-V. Entretanto, novamente a potência do gerador fotovoltaico será dissipada nos transistores, limitando a aplicação em geradores de baixa potência [11].

F. Técnica da Fonte de Quatro Quadrantes

Uma fonte de alimentação de quatro quadrantes permite fornecer e dissipar energia, dessa forma comportando-se como uma carga ajustável. Para um gerador fotovoltaico, o objetivo é obter a curva I-V no primeiro quadrante, entretanto os pontos situados no segundo e no quarto quadrantes podem ser importantes na aquisição da curva I-V [11].

IV. EQUIPAMENTOS COMERCIAIS PARA OBTENÇÃO DA CURVA I-V

Empresas do mercado fotovoltaico e da área de instrumentação identificaram a importância dos traçadores de curvas I-V e lançaram equipamentos comerciais para essa finalidade. Normalmente esses equipamentos são utilizados por integradores de sistemas fotovoltaicos para manutenção, ou até mesmo por usuários para acompanhar o monitoramento do seu arranjo fotovoltaico. Os traçadores de curva I-V comerciais normalmente estão disponíveis apenas no exterior e custam alguns milhares de dólares.

A empresa HT Instruments desenvolveu o I-V500w, um equipamento que permite rastrear curvas I-V de um ou mais módulos fotovoltaicos com até 1500 V / 10 A. O I-V500w realiza a comparação dos dados medidos com os valores nominais, permitindo avaliar se o gerador fotovoltaico atende

aos parâmetros de eficiência declarados pelo fabricante. O I-V500w possui um banco de dados com mais de 30.000 módulos fotovoltaicos. A curva I-V é gerada com aproximadamente 128 pontos. O equipamento ainda permite medir a irradiância solar e a temperatura de operação dos módulos através de sensores *wireless* [28].

A empresa Solmetric desenvolveu o equipamento PVA-1500S, um traçador de curvas I-V para geradores fotovoltaicos de até 1500 V / 30 A [29]. A empresa Tritec criou o equipamento TRI-KA que permite rastrear curvas I-V de geradores fotovoltaicos com até 1000 V / 15 A [30]. Os três equipamentos comerciais apresentados I-V500w, PVA-1500S e TRI-KA possuem especificações semelhantes e são utilizados com o mesmo propósito.

A empresa EKO possui em seu portfólio mais de 10 modelos de traçadores de curvas I-V. Entre esses produtos está o MP-11, um traçador de curvas I-V portátil, capaz de medir arranjos fotovoltaicos de até 1000 V / 30 A [31]. O MP-11 é um equipamento semelhante aos demais já apresentados. A EKO também possui um conjunto de traçadores de curvas I-V para bancadas. Estes equipamentos para bancadas possuem a faixa de medição inferior aos equipamentos portáteis, como por exemplo o modelo MP-160 que permite rastrear curvas de geradores fotovoltaicos com até 300 V / 10 A. As principais vantagens dos equipamentos de bancada estão na resolução e na precisão das medidas [32].

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Existem diferentes técnicas que podem ser aplicadas na aquisição de curvas I-V em sistemas fotovoltaicos. Entretanto, não existe um método ótimo que possa ser aplicado em todos os casos. A potência do gerador fotovoltaico e a aplicação da curva I-V são características que auxiliam na escolha da técnica de aquisição.

Determinadas aplicações necessitam a reprodução parcial da curva I-V, ou então o monitoramento contínuo de determinado ponto da curva. A técnica que utiliza a carga capacitiva é a única que não permite a reprodução parcial da curva I-V. A carga eletrônica apesar de permitir a reprodução parcial, necessita dissipar níveis elevados de potência, portanto normalmente não é aplicada no monitoramento contínuo de pontos da curva I-V.

A precisão da curva I-V não está diretamente relacionada com a técnica de rastreamento. A qualidade do sistema de aquisição de dados, principalmente dos transdutores de corrente e tensão, que determinarão a qualidade da curva I-V. Evidentemente que o mau emprego de uma técnica de aquisição acarretará em baixa precisão da curva I-V. Por exemplo, ao utilizar a técnica da carga capacitiva e não realizar a carga negativa, ou então ao utilizado um conversor CC/CC e optar por uma topologia que não permite o rastreamento completo da curva I-V.

Quanto a facilidade de implementação, a carga resistiva é a técnica que apresenta o menor número de dispositivos, sendo o método mais simples de ser implementado. A carga eletrônica também necessita de poucos componentes, mas necessita de

um circuito eletrônico para controlar o acionamento do transistor. A carga capacitiva apresenta maior complexidade que as primeiras, devido a necessidade da fonte externa para carregar o capacitor negativamente, além de um resistor para descarga. Por fim, o uso de conversores CC/CC pode ser considerada a técnica mais complexa devido ao número de dispositivos eletrônicos que os conversores possuem.

Grande parte dos custos de um rastreador de curvas I-V está no sistema de aquisição de dados. Além disso, a potência do gerador fotovoltaico e a aplicação do traçador de curvas influenciam diretamente nos custos do traçador. Tanto a carga resistiva como a carga eletrônica são simples de serem implementadas, mas o emprego dessas técnicas em arranjos com potência elevada é inviabilizado devido aos custos para dissipação da potência. A carga capacitiva normalmente é mais barata de ser implementada se comparada a utilização de um conversor CC/CC.

Desde a revisão bibliográfica proposta no trabalho [11] não surgiram novas técnicas para aquisição das curvas I-V. Entretanto, as técnicas claramente apresentaram evoluções e pode-se verificar a convergência para utilização das técnicas de carga capacitiva e carga eletrônica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao INCTGD, CAPES, CNPq e FAPERGS pelo apoio financeiro recebido para o desenvolvimento desse trabalho. L. Michels é bolsista do CNPq – Brasil. O presente trabalho foi realizado com apoio do INCT e suas agências financiadoras (CNPq processo 465640/2014-1, CAPES processo No. 23038.000776/2017-54 e FAPERGS 17/2551-0000517-1) e CAPES-PROEX.

REFERÊNCIAS

- [1] S. P. Europe, "Global market outlook for solar power 2017-2021". Solar Power Europe: Bruxelles, Belgium, 2016. p. 60.
- [2] J. L. Sawin, F. Sverrisson, K. Seyboth, R. Adib, H. E. Murdock et al. "Renewables 2017 global status report". 2017.
- [3] EPE, "Plano decenal de expansão de energia 2026". Rio de Janeiro, 2017.
- [4] EPE, "Estudo da demanda de energia 2050". Rio de Janeiro, 2016.
- [5] J. J. M. Ibirriaga, X. M. de M. Pena, A. Opritescu, D. Sera, R. Teodorescu, "Low-cost, high flexibility i-v curve tracer for photovoltaic modules". In: IEEE. Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2010 12th International Conference on. [S.l.], 2010. p. 1210-1215.
- [6] V. Leite, J. Batista, F. Chenlo, J. L. Afonso, "Low-cost iv tracer for photovoltaic modules and strings". In: IEEE. Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2014 International Symposium on. [S.l.], 2014. p. 971-976.
- [7] L. Cristaldi, M. Faifer, M. Lazzaroni, A. Khalil, M. Catelani, L. Ciani et al. "Failure modes analysis and diagnostic architecture for photovoltaic plants". In: Proceedings of the 13 th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics Advanced measurement tools in technical diagnostics for systems' reliability and safety. [S.l.: s.n.] 2014. p. 206-211.
- [8] R. d. Souza "Os Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica". [S.l.]: BlueSol Energia Solar, 2016.
- [9] Kyocera. "Datasheet módulo fotovoltaico KC200GT". 2018. Acessado em 20 de maio de 2018. Disponível em: <<https://www.kyocerasolar.com/dealers/product-center/archives/spec-sheets/KC200GT.pdf>>.
- [10] J. E. Quiroz, J. S. Stein, C. K. Carmignani, K. Gillispie, "In-situ module-level i-v tracers for novel pv monitoring". In: IEEE. Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015 IEEE 42nd. [S.l.], 2015. p. 1-6.
- [11] E. Duran, M. Piliouguine, M. Sidrach-de Cardona, J. Galán, J. Andujar, "Different methods to obtain the i-v curve of pv modules: A review". In: IEEE. Photovoltaic Specialists Conference, 2008. PVSC'08. 33rd IEEE. [S.l.], 2008. p. 1-6.
- [12] NBR16274. "Sistemas fotovoltaicos conectados à rede - Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho". [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2014.
- [13] Spertino, Filippo, et al. "Capacitor charging method for I-V curve tracer and MPPT in photovoltaic systems". Solar Energy 119 (2015): 461-473.
- [14] T. Warner, C. Cox, "A high power current-voltage curve tracer employing a capacitive load". Solar Cells, 1982. Elsevier, v. 7, n. 1-2, p. 175-181, 1982.
- [15] E. Barbisio, "Improved three-quadrants voltage-to-current curve tracer by a Ic load". In: IEEE. Photovoltaic Specialists Conference, 1996., Conference Record of the Twenty Fifth IEEE. [S.l.], 1996. p. 1283-1286.
- [16] A. K. Gupta, N. S. Chauhan, R. Saxena, "Real time iv and pv curve tracer using labview". In: IEEE. Innovation and Challenges in Cyber Security (ICICCS-INBUSH), 2016 International Conference on. [S.l.], 2016. p. 265-269.
- [17] A. Rivai, N. A. Rahim, "Binary-based tracer of photovoltaic array characteristics". IET Renewable Power Generation, 2014. IET, v. 8, n. 6, p. 621-628, 2014.
- [18] Y. Erkaya, P. Moses, S. Marsillac, "On-site characterization of pv modules using a portable, mosfet-based capacitive load". In: IEEE. Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2016 IEEE 43rd. [S.l.], 2016. p. 3119-3122.
- [19] Willoughby, Alexander A., e Muritala O. Osinowo. "Development of an electronic load IV curve tracer to investigate the impact of Harmattan aerosol loading on PV module performance in southwest Nigeria". Solar Energy 166 (2018): 171-180.
- [20] R. L. dos Santos, J. S. Ferreira, G. E. M. JR, K. C. A. Souza, de; JR, E. M. S. "Low cost educational tool to trace the curves pv modules". IEEE Latin America Transactions, 2017. IEEE, v. 15, n. 8, p. 1392-1399, 2017.
- [21] M. Taciuc, "An experimental system for measuring the pv panel characteristics curves under real operation conditions". In: IEEE. Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), 2016 International Symposium on. [S.l.], 2016. p. 1-6.
- [22] N. Saini, A. Mudgal, K. Kumar, J. Srivastava, V. Dutta, "Design of microcontroller based i-v plotter using igt electronic load". In: IEEE. Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), IEEE International Conference on. [S.l.], 2016. p. 1-5.
- [23] E. Duran, J. Galán, M. Sidrach-de Cardona, J. Andujar, "A new application of the buck-boost-derived converters to obtain the iv curve of photovoltaic modules". In: IEEE. Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007. IEEE. [S.l.], 2007. p. 413-417.
- [24] V. Boscaino, G. Cipriani, V. D. Dio, R. Miceli, A. Pulizzotto, R. Rizzo, "A standard-compliant prototype for pv module curve detection". 2014. IET, 2014.
- [25] Í. F. Silva, P. S. Vicente, F. L. Tofoli, E. M. Vicente, "Portable and low cost photovoltaic curve tracer". In: IEEE. Power Electronics Conference (COBEP), 2017 Brazilian. [S.l.], 2017. p. 1-6.
- [26] N. N. Lima, L. C. de Freitas, G. M. Buiatti, J. B. Vieira, L. C. Freitas, E. A. Coelho, "Low complexity system for real-time determination of current-voltage characteristic of pv modules and strings". In: IEEE. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE. [S.l.], 2013. p. 2817-2823.
- [27] C. Riley, L. Tolbert, "An online autonomous i-v tracer for pv monitoring applications". In: IEEE. Power & Energy Society General Meeting, 2015 IEEE. [S.l.], 2015. p. 1-5.
- [28] HT Instruments. "I-V500w datasheet". 2018. Acessado em 13 de maio de 2018. Disponível em: <<https://www.ht-instruments.com/pt-br/produtos/i-v500w/download/datasheet/>>.
- [29] Solmetric. "PV Analyzer PVA-1500S datasheet". 2018. Acessado em 13 de maio de 2018. Disponível em: <<http://www.solmetric.com/pva1500.html>>.
- [30] Tritec. "TRI-KA datasheet". 2018. Acessado em 13 de maio de 2018. Disponível em: <http://www.tritec-energy.com/>.
- [31] EKO. "MP-11 I-V Checher datasheet". 2018. Acessado em 13 de maio de 2018. Disponível em: <<https://eko-eu.com/products/solar-energy/iv-measurements/mp-11-i-v-checker/pdf>>.
- [32] EKO. "MP-160 I-V Tracer datasheet". 2018. Acessado em 13 de maio de 2018. Disponível em: <<https://eko-eu.com/products/solar-energy/iv-measurements/mp-160-i-v-tracer/pdf>>.