

ESTADO DA ARTE DOS MÉTODOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DE MÓDULOS E ARRANJOS FOTOVOLTAICOS

Daniel Pereira de Carvalho – daniel.carvalho@icte.ufm.edu.br
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Departamento de Engenharia Elétrica
Carlos Augusto Bissochi Jr. – bissochi.jr@gmail.com
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica
Luís Guilherme Monteiro Oliveira – luis.monteiro@ceienergetica.com.br
Companhia Energética Integrada (CEI), Departamento de Engenharia
Marco Antônio Esteves Galdino – marcoag@cepel.br
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), Eletrobrás
Antonio Cesar Pinho Brasil Junior - brasiljr@unb.br
Universidade de Brasília (UnB), Departamento de Engenharia Mecânica
Gustavo Malagoli Buiatti – gustavo@alsolenergia.com.br
ALSOL Energias Renováveis S.A.

Resumo. A curva característica corrente x tensão (I-V) de módulos e arranjos fotovoltaicos deve ser continuamente monitorada por diversas razões. Uma destas razões é determinar o ponto de operação de potência máxima (maximum power point – MPP, em inglês) nas condições reais de operação e, por meio de extrapolação, verificar se a potência nominal instalada corresponde às especificações acordadas em contrato. Além disso, tal informação pode ser usada como ferramenta de manutenção e detecção de inconformidades ou falhas no sistema. Atualmente, o estado da arte apresenta vários métodos tradicionais de caracterização de curvas I-V com diferentes implementações. Este trabalho realiza um resumo, de forma objetiva, das características técnicas dos métodos e topologias de circuitos tradicionais comumente utilizados para realizar a caracterização de módulos e arranjos fotovoltaicos.

Palavras-chave: Módulos e Arranjos Fotovoltaicos, Métodos de caracterização, Curvas I-V.

1. INTRODUÇÃO

A curva característica I-V de um módulo ou arranjo FV (fotovoltaico) descreve a capacidade de conversão de energia em função da irradiância e da temperatura. Ela representa as combinações de corrente e tensão nas quais o módulo ou arranjo FV pode ser operado, considerando-se temperatura de célula e irradiância constantes. A Fig. 1 mostra a curva I-V típica, assim como a curva potência-tensão, ou P-V, calculada a partir da curva I-V. Os pontos notáveis, e de suma importância para qualquer aplicação fotovoltaica, também são evidenciadas na Fig. 1.

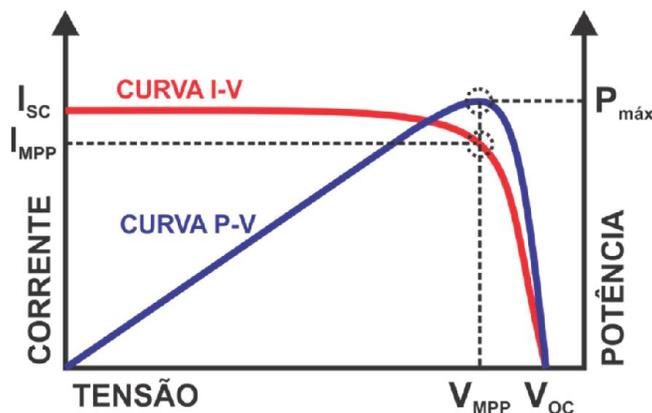


Figura 1 - Curvas I-V e P-V típicas de um módulo ou arranjo FV.

Como mostrado na Fig. 1 a faixa de operação da curva I-V varia a partir do ponto da corrente de curto circuito do módulo (I_{SC}) ou tensão [V] igual a zero até o ponto de tensão de circuito aberto (V_{OC}) ou corrente [A] igual a zero. No “joelho” (ponto de inflexão) da curva I-V (tensão máxima, V_{MPP} , e corrente máxima, I_{MPP}) encontra-se o ponto de potência máxima (MPP), onde o produto da tensão e da corrente é máximo. Em um sistema FV conectado à rede elétrica, uma das

funções do inversor é ajustar, constantemente, a carga procurando o ponto na curva I-V no qual o arranjo FV entrega a maior potência disponível para a condição atual de operação.

Em tensões bem inferiores a V_{MPP} , a corrente gerada pelo arranjo FV é relativamente constante e independente da tensão de saída (análogo a uma fonte de corrente). Próximo ao joelho da curva este comportamento se altera, onde um aumento na tensão faz com que a corrente diminua. Isto acontece, pois, o percentual de cargas elétricas que se recombinam no interior do material semiconductor aumenta ao invés de fluir para a carga. Em V_{OC} todas as cargas elétricas se recombinam internamente (Solmetric, 2011).

A curva característica I-V dos arranjos fotovoltaicos deve ser continuamente monitorada por diferentes razões. Por exemplo, como ferramenta de garantia de qualidade, pode-se determinar o ponto de potência máxima nas condições reais de operação e então extrapolar estes dados (desde que o sistema tenha um sensor de irradiância, ex: piranômetro, e sensor de temperatura, ex: pt-100, para as condições padrão de ensaio (Standard Test Conditions - STC, em inglês), com irradiância solar de 1000 W/m^2 , temperatura da célula de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e massa de ar (fator AM) de 1,5 (IEC 60904, 2006), para verificar se o desempenho real corresponde ao previsto em projeto e em contrato. Além disso a curva I-V pode ser usada como uma ferramenta de manutenção e diagnóstico fornecendo informações para detecção de inconformidades / falhas no sistema tais como: células danificadas, pontos quentes, presença de sujeiras, entre outras. Outra aplicação é a identificação de ponto de máxima potência global em condições de sombreamento (Zimmerman, 2012).

2. MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DE CURVAS I-V

O princípio básico para realizar a caracterização de um arranjo FV é controlar a corrente fornecida entre zero, ou seja, condição de circuito aberto (V_{OC}), e a corrente de curto circuito (I_{SC}) ou vice-versa. Diferentes métodos já foram propostos para realizar tal caracterização, e entre eles destacam-se: carga resistiva, carga capacitiva, carga eletrônica, utilização de amplificadores, fontes de alimentação de quatro quadrantes, conversores c.c. / c.c. e carga indutiva. Os principais fatores que devem ser considerados ao selecionar um método de caracterização são o custo, número de amostras, rapidez, precisão e capacidade de repetir o processo. A seguir estas técnicas para caracterização de arranjos FV são apresentadas e discutidas.

2.1 Carga resistiva

O método mais simples e acessível economicamente de se medir a curva I-V de um módulo ou arranjo FV é o método da carga resistiva. Este método consiste em chavear rapidamente um conjunto de resistores para cobrir toda a faixa de operação da curva I-V como mostra a Fig. 2. Cada valor de resistência representa um ponto da curva I-V e os valores dos resistores são escolhidos de forma a obter uma boa quantidade de pontos no joelho da curva. Este método é mais indicado em sistemas de baixa potência, uma vez que resistores de elevada potência podem ser difíceis de se encontrar e são mais caros.

Em Malik et al. (2003) o resistor de carga é manualmente incrementado e, a cada passo, a corrente e a tensão são medidas utilizando um multímetro digital manual. Apesar deste tipo de medição ser extremamente simples e barata, ele não é confiável, segundo Mahmoud (2006), pois o tempo necessário para realizar todas as medições pode ser longo e as condições de irradiância e temperatura podem não permanecer constantes. Além disso, não é possível medir corretamente a corrente I_{SC} e também não se pode realizar testes de polarização reversa no arranjo FV.

Já os métodos apresentados por Van Dyk et al. (2005) e Van Dyk et. al (2002) utilizam um conjunto de relés controlados por computador para ajustar a carga e os pontos da curva I-V são medidos através de um sistema de aquisição de dados. Esta abordagem resolve o problema do tempo necessário para medir os pontos da curva I-V. Ainda assim, Willoughby et. al (2014), afirma que os relés são sujeitos a repique, o que pode prejudicar o sistema de aquisição automática; contudo, este último problema pode ser contornado substituindo os relés por chaves eletrônicas (semicondutores ativos), como MOSFETs.

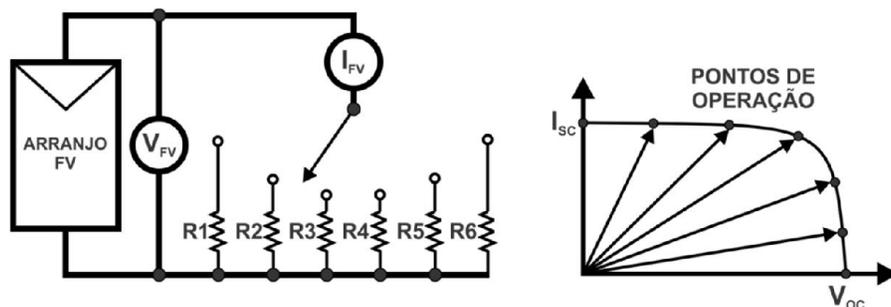


Figura 2 - Medição da curva I-V pelo método da carga resistiva.

Cabe salientar que o método da carga resistiva não é um método cíclico, ou seja, o mesmo inviabiliza a exibição direta, a qual permite que sejam realizados testes baratos e rápidos em campo com o arranjo FV desconectado de qualquer conversor eletrônico de potência. Este método tende a ser lento, o que dificulta que todos os pontos da curva sejam obtidos na mesma condição de temperatura de módulo e irradiância, diminuindo a flexibilidade e confiabilidade do sistema.

2.2 Carga capacitiva

A carga capacitiva é um dos métodos mais utilizados em equipamentos comerciais para caracterização da curva I-V de módulos e arranjos FV, métodos “*off-line*”, em campo (Neuenstein e Albers, 2004). Sua utilização é recomendada por diversos guias e padrões internacionais para medição de arranjos FV de 2 até 50 kWp, segundo Blaesser e Munro (1995) e a norma IEC 61829 (2015). A Fig. 3 mostra uma das diferentes topologias de circuito para caracterização da curva I-V, utilizando o método da carga capacitiva. No início da medição o capacitor é totalmente descarregado através do resistor (tensão nula em seus terminais), fechando-se a chave S_3 . Em seguida, a chave S_3 é aberta e a chave S_1 é fechada, ou seja, o arranjo FV começa a carregar o capacitor com a corrente de curto circuito I_{SC} . A partir deste momento a tensão no capacitor começa a aumentar e a corrente diminuir movendo o ponto de operação I-V de $I=I_{SC}$, $V=0$ até a tensão de circuito aberto $I=0$, $V=V_{OC}$, ou seja, quando a carga do capacitor termina. Alternativamente pode-se, antes de iniciar a operação de carga do capacitor pelo módulo ou arranjo FV, fechar a chave S_2 para carregar o capacitor com uma tensão negativa compensando quedas de tensão nas chaves e outros componentes do circuito. Este procedimento garante que a curva I-V contenha o ponto $I=I_{SC}$ e $V=0$. Para obter uma curva I-V confiável deve-se utilizar capacitores com baixa resistência série, assim como chaves eletrônicas de baixa resistência de condução.

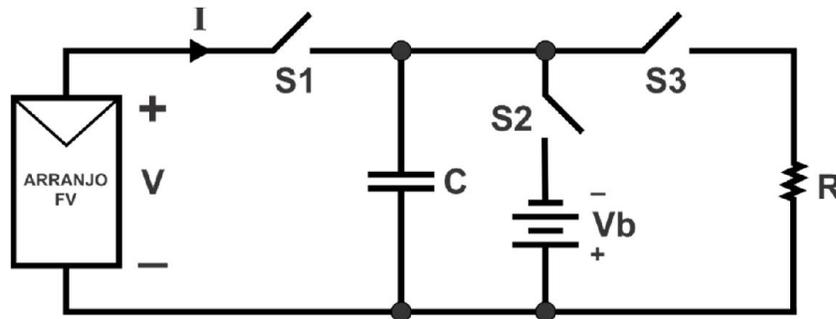


Figura 3 - Medição da curva I-V pelo método da carga capacitiva.

Em Muñoz (2006) é desenvolvida uma carga capacitiva portátil que implementa as chaves utilizando IGBTs e a carga como um arranjo série-paralelo de capacitores e resistores. Segundo Mahmoud (2006) o valor da capacitância que deve ser usada é diretamente proporcional à corrente I_{SC} e inversamente proporcional à V_{OC} : quanto menor o valor da capacitância maior deve ser a velocidade com que o sistema é amostrado para garantir a precisão e confiabilidade da curva obtida.

Este método exige maiores taxas de amostragem e memória. Entretanto, devido à diminuição do preço dos sistemas de aquisição, isto não é um grande problema nos dias de hoje. Além disso, este método pode ser adaptado em conversores c.c / c.c. clássicos de forma invasiva, com pequena alteração de hardware e software (Buiatti, 2012), ou mesmo de forma não-invasiva (sem alteração de hardware, apenas de software) em conversores c.c. / c.c. de potência a capacitores comutados e que podem fazer o uso de um “*snubber*” dissipativo (amortecedor de oscilações / controle das taxas de tensão e corrente), do tipo RCD, conectado à sua entrada (Buiatti, 2009).

2.3 Carga eletrônica

O método da carga eletrônica utiliza um transistor, geralmente um MOSFET, como carga (Fig. 4) e é também um método “*off-line*”. A resistência entre o dreno e a fonte é modulada por uma tensão entre a porta e a fonte e, por consequência, a corrente fornecida pelo arranjo FV é controlada. Para que toda a curva I-V possa ser obtida o MOSFET deve trabalhar nas três regiões de operação, corte, saturação e linear. Uma vez que o MOSFET atua como carga, o mesmo deve ser capaz de dissipar toda a potência gerada durante o teste. Diversos MOSFETS podem ser conectados em paralelo para permitir o teste de arranjos fotovoltaicos maiores com diversos módulos, onerando assim, o sistema de medição.

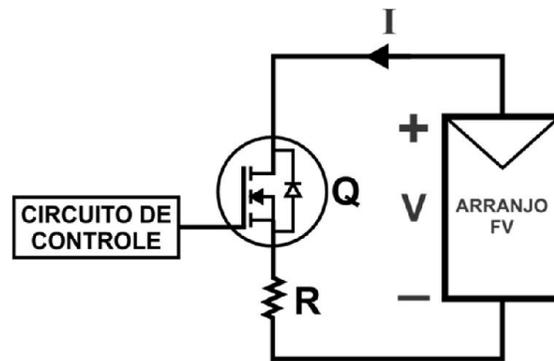


Figura 4 - Medição da curva I-V pelo método da carga eletrônica.

Em Sahbel (2013) é apresentado um circuito simples, baseado em carga eletrônica, para obter a curva I-V em condições reais de operação. A carga é controlada por um sistema de aquisição de dados e pelo software Labview[®]. Os sinais de tensão e corrente são medidos utilizando um divisor de tensão e um resistor do tipo “shunt”, respectivamente. Além disso, Sahbel (2013) realiza uma comparação dos resultados obtidos com o método da carga resistiva. Já Kuai (2006) utiliza um osciloscópio para apresentar a curva I-V. Os pontos I_{SC} e V_{OC} são obtidos utilizando circuitos de detecção de pico e a curva de P-V é obtida multiplicando os sinais de tensão e corrente; a potência máxima também pode ser obtida utilizando um detector de pico.

O método da carga eletrônica é cíclico e pode apresentar a curva I-V diretamente em um osciloscópio. Além disso permite que apenas um intervalo da curva seja reproduzido, mas a potência dissipada em pontos próximos ao ponto de máxima potência é elevada. Uma vez que toda a potência deve ser dissipada na chave é difícil expandir o sistema de testes para sistemas FV maiores, sobretudo para arranjos de módulos em série que possuam elevada tensão.

2.4 Amplificador linear de potência

Este esquema é baseado em um amplificador linear de potência classe B tradicional, conforme pode ser visto na Fig. 5. O mesmo utiliza dois transistores do tipo TBJ (junção bipolar) como carga, um para corrente direta e outro para a corrente reversa. Toda a potência deve ser dissipada nos transistores, o que limita este método para aplicações de baixa e média potência ou mesmo a módulos individuais, não sendo aplicável à medição de arranjos fotovoltaicos utilizados na prática e se limitando para aplicações “*off-line*”.

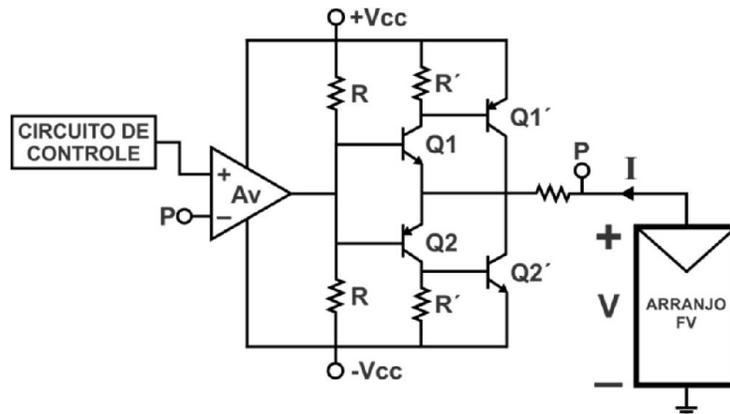


Figura 5 - Medição da curva I-V pelo método do amplificador bipolar de potência.

Em Guvench (2004) é apresentado um sistema controlado por computador para testar células fotovoltaicas que utiliza uma fonte de luz artificial para simular a radiação solar. A tensão de controle é fornecida por um gerador de função programável enquanto as medições de tensão e corrente são realizadas utilizando dois multímetros. Todos os instrumentos são conectados ao computador utilizando um barramento padronizado, interface GPIB (“*General Purpose Interface Bus*”, em inglês). O sistema inicia com uma pequena tensão e, gradualmente, aumenta este parâmetro até que se atinja seu valor máximo de teste ou a corrente máxima do sistema de forma que a cada iteração a corrente e a tensão sejam obtidas.

2.5 Fonte de quatro quadrantes

Uma fonte de alimentação de quatro quadrantes é utilizada como simulador de cargas para teste e avaliação de fontes de alimentação em c.c. ou outras fontes com saída em c.c. tais como: células a combustível, baterias e geradores FV. De modo simplificado, uma fonte de alimentação de quatro quadrantes pode ser entendida como uma fonte capaz de obter tensões positivas e negativas, e cuja a saída pode fornecer ou drenar corrente podendo ser controlada por um meio de um sinal de referência ou programada para percorrer uma faixa de valores. A Fig. 6 mostra a obtenção da curva I-V segundo os quadrantes de operação da fonte. Para um sistema FV o quadrante de operação principal é o primeiro quadrante. Entretanto, para a realização de testes, são utilizados o 1º, 2º e 4º quadrantes, a fim de também detectar inconformidades como o sombreamento parcial em uma ou mais células conectadas em série.

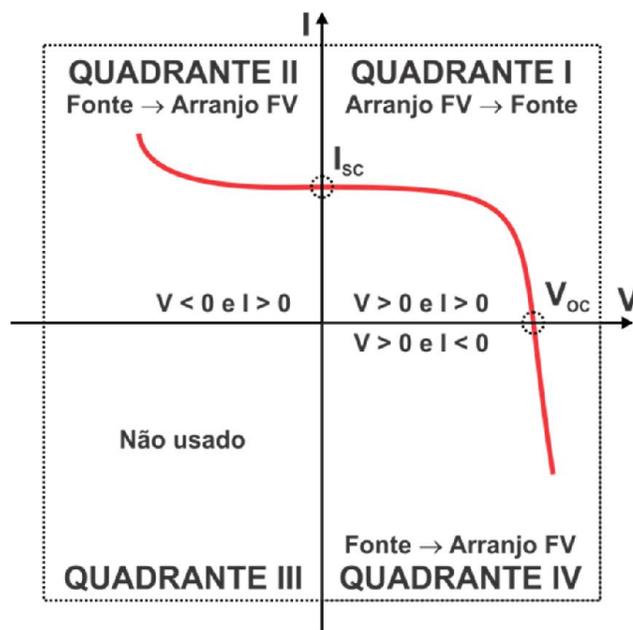


Figura 6 – Curva I-V segundo os quadrantes de operação da fonte.

Em Hecktheuer (2002) é descrita uma metodologia para obtenção das curvas I-V sob diferentes condições. A operação da fonte é controlada automaticamente por meio de um computador e as medidas de tensão e corrente são obtidas por meio de dois multímetros digitais conectados ao computador utilizando a interface GPIB. Os dados obtidos são lidos pelo computador e então os principais parâmetros elétricos são calculados. Em Fernandez-Reche (2006) o método da fonte de quatro quadrantes é utilizado para avaliar o desempenho de células para concentradores FV. As células FV são iluminadas através de um concentrador solar parabólico controlado por um conjunto de obturadores. Um gerador de função, sincronizado com os obturadores, controla a operação da fonte e os sinais de tensão e corrente são obtidos utilizando um analisador de alimentação. O trabalho desenvolvido por Bias (2002) segue o mesmo princípio, mas medições de temperatura e irradiância são utilizadas para descartar medições onde estas grandezas apresentam variações significativas.

O método de caracterização com fontes em quatro quadrantes é bastante preciso. Entretanto, fontes com potência superior a 1 kW são de difícil disponibilidade e com custos proibitivos o que limita a aplicação deste método a sistemas de pequena potência. Além disso, na prática, o método também se limita a aplicações “*off-line*”.

2.6 Carga Indutiva

O método de caracterização de curvas I-V utilizando um indutor conectado a um arranjo fotovoltaico e monitorando a tensão do indutor teve o pedido de patente concedido em 2015 por Buiatti (2015). Considerando que a grande maioria de conversores c.c./c.c. e c.c./c.a. possuem indutores, este método pode ser aplicado neste tipo de conversor com pequenas alterações de hardware, e sem a necessidade de qualquer outro indutor adicional, apenas utilizando uma carga resistiva que possa ser desconectada ou não, como evidenciado na Fig. 7a, ou mesmo a um conversor c.c./c.c. clássico, que pode ou não estar associado a um conversor c.c./c.a., como o conversor do tipo elevador (*Boost*, em inglês) mostrado na Fig. 7b. Ambas as configurações permitem iniciar o processo nas condições iniciais de corrente zero e tensão V_{oc} e, caso não exista um sensor de corrente, é possível estimar a corrente do arranjo através de integração trapezoidal das amostras de tensão na faixa de 0 a V_{oc} . Tal estimativa de corrente é menos afetada por ruídos e interferências de medição, ao contrário de processos de derivação numérica.

Em resumo, e em um primeiro momento, esse método consiste em suprir a corrente do arranjo FV através do indutor. Em um segundo momento, o indutor é desconectado do arranjo FV e o mesmo descarrega sua energia armazenada por dissipação ou por transferência de energia que é controlada por conversores c.c. / c.c. ou c.c. / c.a. Finalmente, em um terceiro momento, o indutor é conectado em paralelo com o arranjo FV enquanto sua tensão é monitorada e amostrada, entre 0 e I_{sc} .

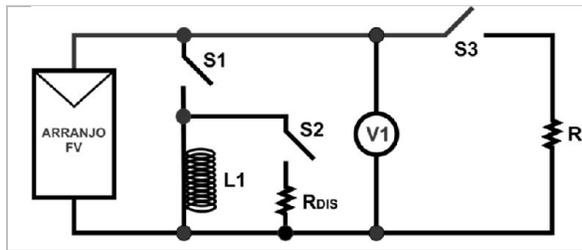


Figura 7a – Topologia para medição da curva I-V pelo método da carga indutiva utilizando resistor para descarga (Buiatti, 2015).

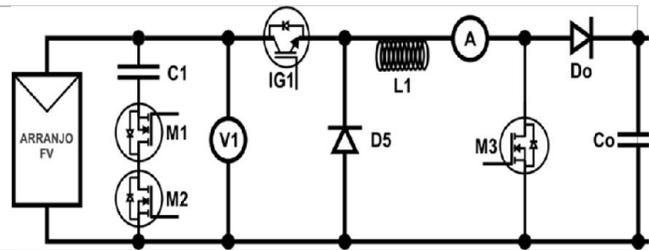


Figura 7b – Variação de conversor c.c. / c.c. para medição da curva I-V pelo método da carga indutiva utilizando conversor c.c. / c.a. para descarga (Buiatti, 2015).

Devido às características mencionadas, o método em questão é um método de baixo custo, mas dependendo dos valores de indutância, e também da resistência ou semicondutores ativos utilizados durante a descarga do indutor, a frequência de amostragem deve ser bem elevada e o custo pode ser prejudicado. Este método pode ser embarcado em inversores fotovoltaicos existentes no mercado (método “online” invasivo), ou mesmo desenvolvido para ser um equipamento de caracterização portátil (método “off-line”).

2.7 Conversor c.c. / c.c.

Inversores fotovoltaicos do tipo “ongrid” (conectados à rede elétrica) usualmente possuem um primeiro estágio de conversão c.c. / c.c. do tipo *Boost*. Desta forma, torna-se possível a conexão de arranjos fotovoltaicos que possuam uma faixa de tensão inferior à tensão do barramento c.c. entre os estágios de conversão c.c. / c.c. e c.c. / c.a. Este primeiro estágio possui todos os componentes ativos e passivos necessários para a caracterização de curvas I-V, sem qualquer componente adicional de hardware, tornando-se possível o processo de caracterização, simplesmente, através de alterações no software de controle do conversor c.c. / c.a., Fig. 7. Uma forma de realizar tal caracterização em conversores *Boost* operando em modo de corrente contínua, ou modo *Conduction Mode Boost Converter* - “CCM”, em inglês, é desabilitar o seguimento do ponto de potência máxima, *Maximum Power Point Tracker* - “MPPT”, em inglês, e utilizar referências de tensão para controlar a corrente do indutor (Buiatti, 2012).

Desta forma, torna-se possível descarregar o capacitor de entrada até a tensão zero limitando a corrente de pico a valores inferiores ao da saturação do indutor, valores estes que poderiam danificar semicondutores ou capacitores, por exemplo, devido à indesejada ressonância entre capacitor e indutor, reduzindo o tempo de vida ou mesmo causando um dano irreversível do equipamento. Posterior à descarga, é possível carregar o capacitor de entrada até a tensão V_{OC} , abrindo o IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor* – IGBT, em inglês) do *Boost* durante este período, e através do monitoramento da tensão é possível calcular a corrente através do capacitor usando métodos numéricos de derivação, podendo, desta forma, obter a curva I-V em tempo real.

Os tempos de descarga e carga devem ser curtos o suficiente para evitar fortes variações de tensão no barramento c.c., necessitando de frequências de amostragem adequadas para se manter alto nível de precisão das curvas obtidas. A Fig. 8 mostra o método de controle para caracterização de curva I-V em conversor c.c. / c.c. do tipo *Boost*.

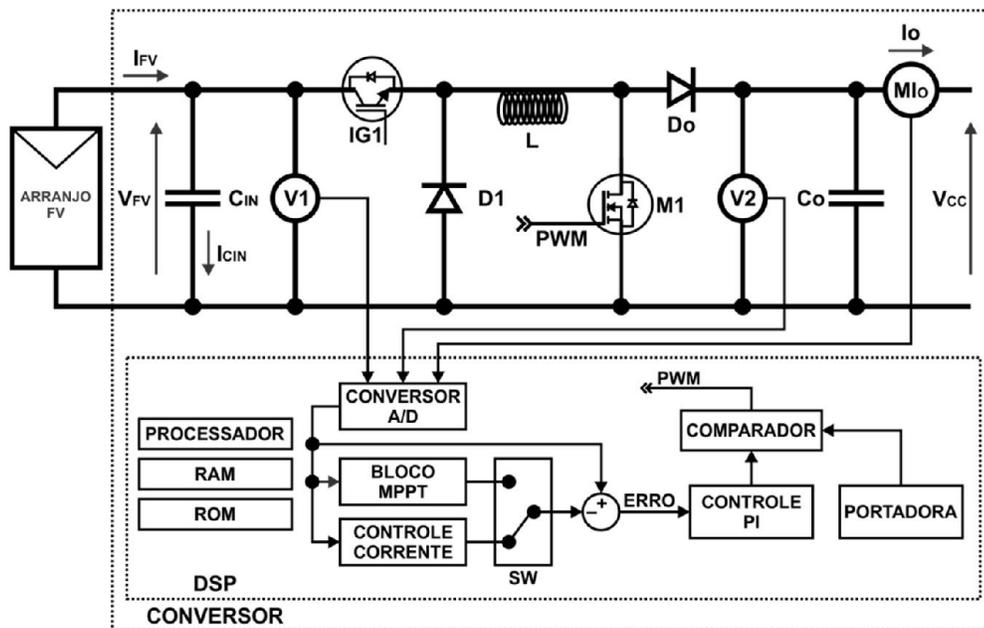


Figura 8 – Método de controle para caracterização de curva I-V em conversor c.c. / c.c. do tipo Boost (Buiatti, 2012).

Finalmente, pode-se afirmar que o método “*online*”, proposto no pedido de patente, é não invasivo e possui como principais características: confiabilidade (pois não danifica nem degrada nenhum componente), simplicidade de implementação e baixo custo (pois necessita apenas de alterações em software) e aplicabilidade em qualquer inversor fotovoltaico que possua um primeiro estágio c.c/c.c. do tipo *Boost* com capacitor de entrada. Além disso, este método pode ser aplicado em inversores fotovoltaicos conectados a geradores em ambientes com presença de sombras, para a aferição de desempenho do sistema de forma a avaliar a degradação de arranjos fotovoltaicos e finalmente, para identificação do ponto de máxima potência global caso existam mais de um máximo local (efeito causado por presença de sombras ou módulos defeituosos).

3. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou e discutiu diferentes métodos e topologias de circuitos elétricos / eletrônicos utilizados na caracterização de curvas I-V de arranjos fotovoltaicos (sete métodos com algumas variações para cada um deles). Entre as principais características de cada topologia foi discutido a confiabilidade, custo, aplicabilidade “*online*”, com o arranjo em operação, ou “*off-line*”, com o arranjo desconectado de conversores eletrônicos de potência conectados ou não à rede elétrica, além da necessidade ou não de componentes adicionais em conversores já existentes (métodos invasivos ou não). Após a revisão do estado da arte conclui-se que atualmente existe uma gama de métodos e topologias que podem ser aplicados no desenvolvimento de equipamentos portáteis, para realização de medições periódicas em campo, assim como existem métodos que podem e devem ser implantados na maioria dos inversores fotovoltaicos presentes no mercado atual, possibilitando a caracterização de curvas I-V em tempo real e com alto valor agregado em termos de funcionalidades adicionais às já comumente existentes.

Agradecimentos

Trabalho desenvolvido no âmbito da Chamada Estratégica 13, PE-0394-1113/2011 – Jaíba Solar (desenvolvimento de caixa de junção (*string*, em inglês) inteligente, do Programa de P&D Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel).

REFERÊNCIAS

- Bias, M. A., Torres, J. L., Prieto, E., Garcia, A., 2002, Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices", *Renewable Energy*, 25, pp. 371-380.
- Buiatti, G. 2009. Method and apparatus for obtaining information enabling the determination of the maximum power point of a power source. EPO 09 165145.5 (Depositada em 10 de Julho de 2009).
- Buiatti, G., 2012. Apparatus for obtaining information enabling the determination of the maximum power point of a power source. US20120139504 A1 (Requerimento em 7 de Junho de 2012).

- Buiatti I, G., 2012. Apparatus for controlling the current going through an inductor of an energy conversion device. EP2515423 A1 (Requerimento em 24 de Outubro de 2012).
- Buiatti, G., 2015. Method for obtaining information enabling the determination of a characteristic of a power source. US9086716 B2 (Concedido em 21 de Julho de 2015).
- Blaesser, G., Munro, D., 1995. Guidelines for the Assessment of Photovoltaic Plants. Document C. Initial and Periodic Tests on PV plants. Joint Research Centre Ispra. European Commission.
- Fernandez-Reche, J., Canadas, I., 2006. PSA Solar furnace, A facility for testing PV cells under concentrated solar radiation, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 90, pp. 2480-2488
- Forero N., J. Hernandez, Gordillo G., 2006. Development of a monitoring system for a PV solar plant, *Energy Conversion & Management*, 47, pp. 2329-2336.
- Guvench, M. G., Gurcan, C., Durgin, K., MacDonald, D., 2004. Solar simulator and I-V measurement system for large area solar cell testing, in Proceedings of the American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition, pp. 12747–12753.
- Hecktheuer, L.A., Krenzinger, A., Prieb, C.w.M., 2002. Methodology for photovoltaic modules characterization and shading effects analysis; *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, 24(1).
- IEC 60904, 2006. International Standard-60904-1. Photovoltaic Devices. Part 1: Measurements of Photovoltaic Current–Voltage Characteristics. International Electrotechnical Commission.
- IEC 61829, 2015. International Standard 61829. Photovoltaic (PV) array – On-site measurement of current-voltage characteristics.
- Kuai Y., Yuvarajan S., 2006. An electronic load for testing photovoltaic panels, *Journal of Power Sources*, 154, 2006, pp. 308-313.
- Mahmoud, M.M., 2006. Transient analysis of a PV power generator charging a capacitor for measurement of the I-V characteristics, *Renewable Energy*, 31, pp. 2198-2206.
- Malik, A.Q., Damit, S.J. Bin Haji, 2003. Outdoor testing of single crystal silicon solar cells, *Renewable Energy*, 28, pp. 1433-1445
- Mitsubishi Electric Corporation, JP. Buiatti, G. Method for obtaining information enabling the determination of a characteristic of a power source. FR. US 2012/0235665 A1. Sep. 20, 2012
- Muñoz J., Lorenzo E., 2006. Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays, *Solar Energy*, pp. 1489-1497.
- Neuenstein, H., Albers, K., 2004. On-site power checks. *Photon International (Maio)*, 70–74.
- Recart F., Mäkel H., et al., 2006. Simple data acquisition of the current-voltage and illumination-voltage curves of solar cells, *IEEE WCPEC*, pp. 1215-1218.
- Sahbel, A. Hassan, N. et al, 2013. Experimental Performance Characterization of Photovoltaic Modules Using DAQ. TerraGreen 13 International Conference 2013 - Advancements in Renewable Energy and Clean Environment.
- Solmetric Corporation, 2011. Guide to Interpreting I-V Curve Measurements of PV Arrays, Application Note PVA-600-1, Disponível em <http://resources.solmetric.com/get/Guide%20to%20Interpreting%20I-V%20Curves.pdf>, Acesso: Novembro, 2015.
- Van Dyk, E.E., Gxasheka, Meyer A.R., E.L., 2002. Monitoring current-voltage characteristics of photovoltaic modules", *IEEE PVSC*, pp. 1516-1519.
- Van Dyk, E.E., Gxasheka, Meyer A.R., E.L., 2005. Monitoring current-voltage characteristics and energy output of silicon photovoltaic modules, *Renewable Energy*, 30, pp. 399-411.
- Willoughby, A.A., Omotosho, T.V., Aizebeokhai, A.P., 2014. A simple resistive load I-V curve tracer for monitoring photovoltaic module characteristics. *Renewable Energy Congress (IREC), 2014 5th International*, vol., no., pp.1-6, 25-27.
- Zimmerman, U., Edoff, M., 2012. A maximum power point tracker for long-term logging of PV module performance. *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 2, no 1, pp. 47-55.

STATE OF THE ART OF METHODS FOR THE CHARACTERIZATION OF PHOTOVOLTAIC MODULES AND ARRAYS

Abstract. *The characteristic curve current x voltage (I-V) from PV modules must be continuously monitored for various reasons. One of these reasons is to determine the maximum power point operation (MPP) in actual operating conditions and, by extrapolation, verify that the installed power rating corresponds to the specifications agreed in the contract. Moreover, such information can be used as maintenance tools and unconfomities detection / faults in the system. Currently, the state of the art presents various traditional methods of characterization curves I-V with different implementations. This paper makes a short, objectively, the technical characteristics of the methods and topologies of traditional circuits commonly used to perform the characterization of photovoltaic modules and arrays.*

Key words: *Modules and Photovoltaic Arrays, characterization methods, I-V curves.*