

TRAÇADOR DE CURVAS IXV DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO PARA AVALIAÇÕES DE DESEMPENHO EM CONDIÇÕES REAIS DE OPERAÇÃO

PEDRO RODRIGUES SILVA*, HERNANI PACE DE SOUZA SANTOS†, LUAN RIBEIRO BRAGA†, LUIZ FELIPE GUIMARÃES SILVA†

* *Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET – MG – Campus IX
Avenida Monsenhor Luiz de Gonzaga, 103 – Centro – Nepomuceno – MG – CEP: 37.250-000
Nepomuceno, Minas Gerais, Brasil*

† *Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET – MG – Campus II
Avenida Amazonas, 7675 – Nova Gameleira – Belo Horizonte – MG – CEP: 30.510-000
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil*

Emails: pedrors@cefetmg.br, hernanipace@hotmail.com, luanrbraga@gmail.com,
luizfelipegsilva@gmail.com

Abstract— The photovoltaic systems characterization is an emerging issue that has attracted the attention of many researchers recently, since photovoltaic generation is expanding worldwide. The characterization of photovoltaic systems under real operating conditions is still a challenge. The high costs of the characterization systems and the difficulty of measuring the several variables involved in the process make it difficult to characterize them on site. In general, photovoltaic modules are characterized by manufacturers by laboratory tests under Standard Test Conditions. These Standard Test Conditions are determined for a temperature of 25 °C, irradiance of 1000 W/m² and air mass of 1,5 G established by IEC-60904-3:2016. However, these conditions are hardly to found under real working conditions of photovoltaic modules because they are subject to various types of interference, for example: shading, reflection and temperature variations. Hence, the development of low-cost methodologies and systems that allow the characterization and analysis of modules in real operating conditions becomes of great relevance. In this work a measurement and characterization system were developed using of low-cost sensors. The developed prototype is designed to perform tests under real operating conditions in order to obtain more accurate models for the representation of the modules.

Keywords— Photovoltaic module, Characteristic curves, IV curve tracer.

Resumo— A caracterização de sistemas fotovoltaicos é um tema emergente que tem atraído a atenção de muitos pesquisadores, uma vez que a geração fotovoltaica está em expansão em todo mundo. A caracterização dos sistemas fotovoltaicos em condições reais de operação nas usinas de geração fotovoltaica ainda é um desafio. Os altos custos dos sistemas de caracterização e a dificuldade de medição do grande número de variáveis envolvidas no processo são fatores que dificultam a caracterização *in loco*. Em geral, os painéis fotovoltaicos são caracterizados pelos fabricantes a partir de ensaios realizados em laboratório nas condições padrões de testes. Essas condições padrões são definidas para uma temperatura de 25 °C, irradiância de 1000 W/m² e massa de ar 1,5 G estabelecidas pela norma IEC-60904-3:2016. Contudo, essas condições dificilmente são encontradas em condições reais de funcionamento dos painéis fotovoltaicos, pois os mesmos estão sujeitos a diversos tipos de interferências, por exemplo: sombreamentos, reflexão e variações de temperatura. Nesse sentido, o desenvolvimento de metodologias e sistemas de baixo custo que possibilitem a caracterização e análise dos painéis fotovoltaicos em ambientes externos se torna de grande relevância. Neste trabalho desenvolveu-se um sistema de medição e caracterização de painéis fotovoltaicos com o uso de sensores de baixo custo. Busca-se com o protótipo desenvolvido a realização de ensaios em condições reais de operação a fim de obter modelos mais precisos para a representação dos painéis.

Palavras-chave— Módulo fotovoltaico, Curvas características, Traçador de curvas IV.

1 Introdução

A busca por novas formas de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis têm apresentado uma demanda crescente. Principalmente, devido aos impactos ambientais causados pela utilização de combustíveis fósseis. Dessa forma, espera-se uma redução da utilização dos combustíveis fósseis para a geração de energia elétrica.

O emprego de fontes renováveis de energia, sobretudo os sistemas fotovoltaicos, têm se mostrado uma alternativa atrativa, principalmente em países localizados em regiões tropicais como o Brasil, nos quais o recurso solar está presente durante todo o ano de forma abundante. Além disso, pode-se destacar os benefícios oriundos da geração dis-

tribuída de energia (Bloemink and Green, 2013). Pode-se citar ainda, a possibilidade de realização dos serviços auxiliares pelos geradores distribuídos (Majzoobi and Khodaei, 2017).

No Brasil, somente a partir da regulamentação dos sistemas de microgeração e minigeração distribuída pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a partir da resolução 482/2012, os sistemas fotovoltaicos apresentaram uma penetração maior na matriz energética brasileira. Antes de 2012, no Brasil, os sistemas fotovoltaicos eram utilizados apenas em aplicações específicas, como exemplo a eletrificação rural. Sendo que, a maioria desses sistemas operavam de forma isolada, ou seja, não conectados à rede de distribuição. Posteriormente, a resolução 482 foi atualizada pela reso-

lução 687/2015 que adequou as normas de forma a potencializar a geração de energia fotovoltaica no Brasil. Desde então, pode-se perceber um crescimento vertiginoso na produção de energia elétrica a partir de módulos fotovoltaicos, como pode ser visto na Figura 1 (ABSOLAR, 2017).

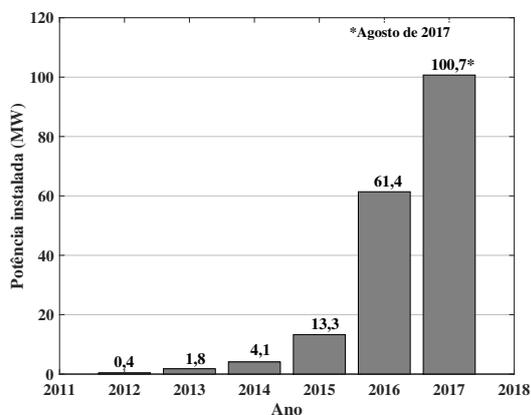


Figura 1: Crescimento da energia fotovoltaica no Brasil.

A determinação do local de instalação dos painéis fotovoltaicos deve ser feita de forma a maximizar a geração de energia elétrica. Segundo Santos and Rütther (2012) os painéis fotovoltaicos devem ser orientados para o norte em instalações localizadas no hemisfério sul. A inclinação dos módulos deve ser próxima à latitude do local de instalação dos mesmos. Contudo, ângulos de inclinação reduzidos podem aumentar as perdas provocadas pela deposição de resíduos sob os mesmos (Tanesab et al., 2017).

Durante a operação, os módulos fotovoltaicos estão sujeitos às intempéries do tempo. Porém, os módulos fotovoltaicos são caracterizados pelos fabricantes a partir de ensaios realizados em laboratório nas condições padrões de testes (STC, do inglês *Standard Test Conditions*). Essas condições padrões são definidas para uma temperatura de 25 °C, irradiância de 1000 W/m² e massa de ar (AM) 1,5 G estabelecidas pela norma IEC-60904-3:2016 (IEC, 2016). Devido à operação exposta ao sol, essas condições dificilmente são encontradas em operação (Philipps et al., 2010). Assim, a avaliação de desempenho dos módulos fotovoltaicos em condições reais de operação é de suma importância para a elaboração de modelos mais precisos para a determinação da quantidade de energia gerada, avaliação de desempenho dos painéis, identificação de sombreamentos e análise de defeitos.

A obtenção da curva característica corrente versus tensão (IxV) dos módulos fotovoltaicos deve ser feita de modo tal que seja possível a obtenção dos principais parâmetros dos módulos fotovoltaicos, tais como: tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto-circuito (I_{cc}), potência

máxima (P_{max}), tensão no ponto de máxima potência (V_{mpp}) e a corrente no ponto de máxima potência (I_{mpp}). A obtenção das curvas IV pode ser feita a partir do método capacitivo, através da utilização de conversores cc-cc ou utilizando-se uma carga eletrônica (Duran et al., 2008).

Nesse artigo, foi escolhido o método capacitivo que consiste em utilizar um módulo fotovoltaico para carregar um capacitor. Durante a carga, são realizadas as medidas de tensão e corrente do módulo sob teste. A Figura 2 mostra o circuito simplificado utilizado para a obtenção das curvas IV de um módulo fotovoltaico através do método capacitivo.

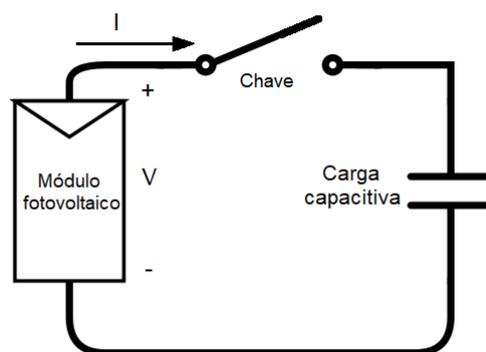


Figura 2: Circuito utilizado pelo método capacitivo para a obtenção da curva IV.

Pode-se ainda utilizar uma fonte externa para a realização de uma pré carga no capacitor com tensão negativa. Dessa forma, é possível a obtenção da corrente de curto-circuito do módulo sob teste sem a extrapolação da curva IV obtida. Pois, dessa forma ocorre a passagem pelo ponto (0, I_{cc}) da curva IV. Ressalta-se ainda a modularidade do método capacitivo, uma vez feito o primeiro protótipo, podem ser adicionados capacitores extras a fim de obter a curva característica de outros módulos ou conjunto de módulos fotovoltaicos (Muñoz and Lorenzo, 2006).

2 Desenvolvimento do traçador de curvas IxV

O sistema desenvolvido para a obtenção das curvas IxV foi feito utilizando o myRIO, que é uma plataforma educacional da *National Instruments* com entradas/saídas reconfiguráveis (National, 2013). A programação foi feita utilizando o *software Labview*. Após o início do processo, os ensaios são realizados sem a intervenção de um operador.

2.1 Hardware

O circuito mostrado na Figura 2 foi modificado de forma a permitir à execução dos ensaios com um

intervalo de tempo pré estabelecido. Além disso, foi utilizada uma bateria alcalina de 9 V para realizar a pré carga no capacitor com uma tensão negativa e possibilitar a obtenção da corrente de curto-circuito. O circuito utilizado para a obtenção das curvas IV é mostrado na Figura 3. A operação do circuito pode ser dividida em três etapas:

- i) O capacitor é descarregado através do acionamento do acionamento do relé 2;
- ii) Carregamento do capacitor com tensão negativa através do acionamento do relé 1;
- iii) Carregamento do capacitor pelo módulo fotovoltaico acionado por meio do transistor de efeito de campo Q_1 . Durante a carga, é feita a aquisição dos dados de tensão e corrente do módulo sob teste.

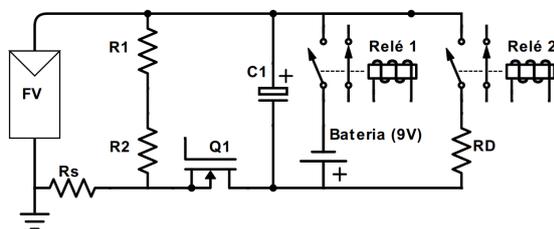


Figura 3: Circuito utilizado para acionamento dos ciclos de carga e descarga do capacitor.

Para o acionamento dos ciclos de carga e descarga do capacitor e, conseqüentemente, a obtenção das curvas $I \times V$ foram utilizados um transistor do tipo de efeito de campo (MosFET) e relés. O acionamento dos relés e do transistor foi feito utilizando-se as saídas digitais do myRIO. Devido à baixa resistência quando em condução, o transistor foi utilizado no ciclo de carga do capacitor, uma vez que valores elevados de resistência série podem modificar a curva $I \times V$ do módulo sob teste. A Tabela 1 mostra a descrição dos componentes utilizados no circuito de acionamento. Em conjunto com o *hardware* desenvolvido foi utilizado o *software Labview* para o acionamento dos circuitos de comando. A Figura 4 mostra o *hardware* desenvolvido.

Tabela 1: Parâmetros do circuito elétrico.

Componente	Descrição
R_1, R_2	Resistores de precisão (1%) $R_1 = 40k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$
R_s	Resistor <i>shunt</i> ($30m\Omega \pm 1\%$)
R_D	Resistor ($22\Omega/20W$)
Q_1	Mosfet <i>IRFZ44N</i>
$Relés_{1,2}$	Relés DC 5V/10A
C_1	Capacitor ($4700\mu F/80V$)
Bateria	Bateria alcalina (9V)

Além das variáveis elétricas medidas durante a realização dos ensaios, foram medidos os valores

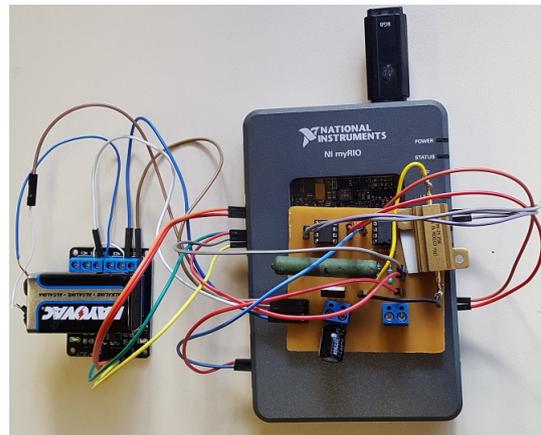


Figura 4: *Hardware* desenvolvido.

da temperatura ambiente, temperatura do módulo e irradiância. A medição de temperatura foi feita utilizando-se sensores LM35 e a irradiância foi medida, no mesmo plano do módulo fotovoltaico sob teste, a partir de uma estação meteorológica fabricada pela *Davis Instruments* modelo *Vantage PRO 2*. A hora do myRIO foi sincronizada com a estação meteorológica para possibilitar a aquisição de dados no intervalo de tempo, no qual, os testes são executados. Após realizada essa sincronização, a aquisição dos dados de irradiância, temperatura, corrente e tensão é feita de forma sincronizada e armazenados em um arquivo.

2.1.1 Medição das variáveis elétricas

As medições das variáveis elétricas (corrente e tensão), foram feitas utilizando-se resistores de precisão. Além de apresentar baixo custo quando comparado a outros métodos de medição, a utilização dos resistores possibilita a realização de ensaios em vários tipos de painéis, uma vez que os mesmos podem ser facilmente substituídos para a adequação dos níveis de tensão mensurados ao dispositivo de aquisição de dados.

A amostragem de tensão do módulo fotovoltaico sob teste foi feita a partir dos resistores R_1 e R_2 mostrados na Figura 3. Os valores ôhmicos foram determinados de forma a adequar o sinal medido aos valores mensuráveis (0 a 5 V) pelas entradas analógicas do myRIO.

Para o sinal de corrente, a amostragem foi feita a partir do resistor R_s mostrado na Figura 3. Foi utilizado um resistor *shunt* a fim de minimizar o impacto provocado na resistência série do módulo sob teste.

Devido à indisponibilidade de um multímetro de calibração. O procedimento de calibração foi realizado a partir de um multímetro fabricado pela *Fluke* modelo 179 que possui precisão de 0,09% para a medição de tensão e 1% para a medição de corrente. Para gerar as tensões e correntes medidas, foi utilizada uma fonte de corrente contínua

ajustável fabricada pela *ICEL* modelo *PS – 6000*. Após a realização da calibração, os ganhos obtidos foram adicionados ao *software* para a obtenção das medições.

2.2 Software

A programação do tempo de execução dos ensaios e do tempo de amostragem das variáveis medidas foram definidas no *Labview*. O tempo de execução entre a realização dos testes pode ser definido pelo usuário. Nesse trabalho, foram utilizados intervalos de tempo de 60 s entre os experimentos realizados. A Figura 5 mostra o fluxograma de operação do *software* desenvolvido.

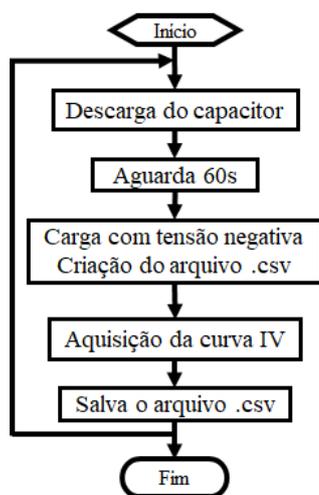


Figura 5: Fluxograma de operação do *software*.

O tempo de amostragem utilizado foi de $300 \mu S$, dessa forma, pode-se garantir a aquisição de uma quantidade elevada de pontos na região do joelho, que é a região na qual está o ponto de máxima potência. Os ensaios foram definidos para fazer a aquisição de 500 pontos por curva adquirida. Assim, os ensaios ficam limitados a um tempo máximo de 150 ms. Desse modo, pode-se minimizar os efeitos das variações de temperatura e irradiância que podem ocorrer durante a realização dos ensaios (Hishikawa et al., 2016).

A comunicação entre o computador e o *myRIO* foi feita utilizando-se uma rede *Wi-Fi*. Devido às falhas de comunicação que podem ocorrer na transmissão dos dados para o computador, o *software* foi desenvolvido de forma a manter a execução dos ensaios caso ocorra uma falha. Durante a falha, não é possível a visualização dos dados em tempo real, mas os dados são armazenados em um arquivo *.csv*, podendo ser visualizados posteriormente.

Durante a execução dos ensaios, o operador tem acesso à curva IV obtida. Também são exibidos na tela a curva PV e os principais parâmetros da curva IV: corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, corrente no ponto de máxima po-

tência, tensão no ponto de máxima potência e a potência máxima.

O traçador desenvolvido foi utilizado para a obtenção das curvas IV de um módulo fotovoltaico modelo KC-80-01 fabricado pela *Kyocera*. A Tabela 2 mostra os principais parâmetros elétricos do módulo ensaiado para as condições STC.

Tabela 2: Parâmetros elétrico do módulo fotovoltaico utilizado.

Parâmetro elétrico	Valor
P_{max}	80W
V_{mpp}	16,9V
I_{mpp}	4,73A
V_{oc}	21,5V
I_{cc}	4,97A

3 Resultados

O traçador foi utilizado para a obtenção da curvas IV do módulo avaliado em vários dias e horários compreendidos entre os meses de junho à dezembro de 2017. Os dados obtidos foram comparados com o modelo de dois diodos proposto por Ishaque et al. (2011).

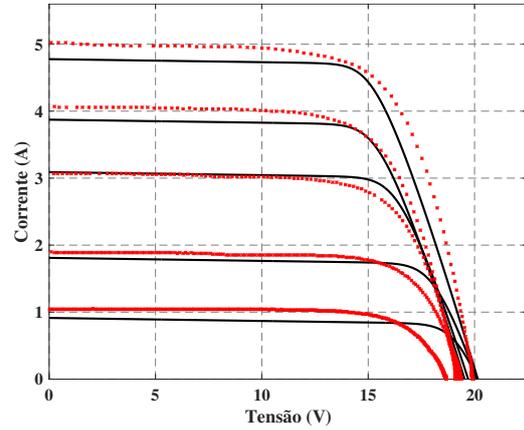
A Figura 6 mostra as curvas obtidas experimentalmente (vermelho pontilhado) e as curvas obtidas utilizando o modelo de dois diodos. Pode-se observar que o modelo de dois diodos representa o comportamento da curva IV de forma satisfatória para a região de operação como fonte de corrente, ou seja, antes do joelho da curva. No ponto de máxima potência e nas regiões próximas à tensão de circuito aberto, pode-se notar alterações significativas dos valores obtidos experimentalmente e pelo modelo de dois diodos conforme mostrado na Tabela 3.

A utilização de um resistor shunt para a medição da corrente do módulo avaliado deve ser feita de forma criteriosa, uma vez que variações do resistor podem alterar as curvas obtidas, como mostrado na Figura 7 que mostra as curvas obtidas utilizando-se dois resistores shunts com diferentes valores de resistência. Pode-se observar que a resistência incremental introduzida pela utilização do resistor shunt não altera os valores obtidos para a corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto.

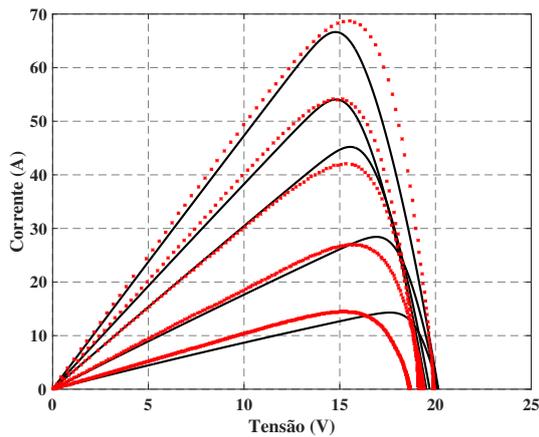
No entanto, a modificação da resistência série do módulo sob teste modifica o joelho da curva IV e, conseqüentemente, o ponto de máxima potência é deslocado de forma a reduzir a potência máxima do módulo sob teste com o aumento da resistência série. Dessa forma, o resistor shunt utilizado deve ser escolhido de forma a minimizar o efeito provocado pelo incremento da resistência série do módulo fotovoltaico sob teste.

Tabela 3: Comparação dos valores obtidos experimentalmente com a simulação utilizando o modelo de dois diodos.

G (W/m^2)	T ($^{\circ}C$)	I_{cc} (A)		V_{oc} (V)		I_{mpp} (A)		V_{mpp} (V)		P_{max} (W)	
		Exp	2D	Exp	2D	Exp	2D	Exp	2D	Exp	2D
200	33,79	1,05	0,91	18,67	20,21	0,95	0,81	15,25	17,63	14,50	14,30
377	33,62	1,90	1,81	19,37	20,21	1,71	1,68	15,76	16,88	26,97	28,43
649	40,52	3,07	3,09	19,26	19,78	2,75	2,90	15,30	15,59	42,08	45,21
774	43,93	4,07	3,87	19,15	19,57	3,69	3,64	14,65	14,84	54,09	54,05
922	36,73	5,03	4,78	19,92	20,21	4,43	4,53	15,52	14,73	68,75	66,64



(a)



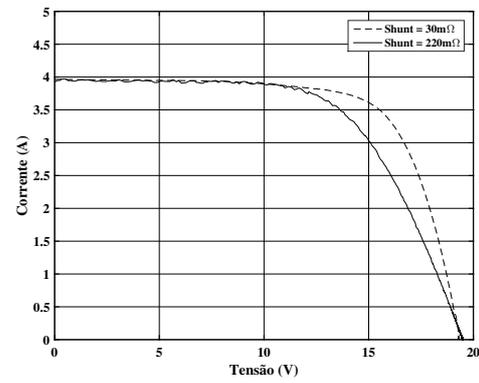
(b)

Figura 6: Comparação das curvas obtidas utilizando o traçador desenvolvido (vermelho pontilhado) com o modelo de dois diodos: (a) curvas IV e (b) curvas PV.

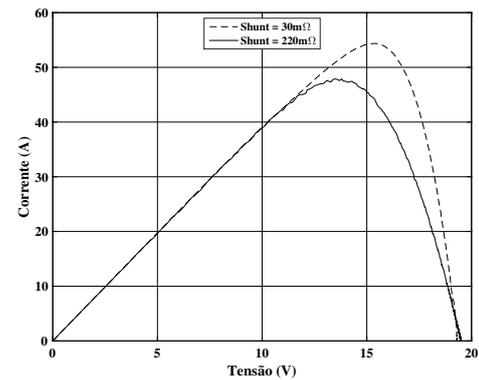
4 Conclusões

O traçador de curvas IV desenvolvido foi utilizado para a obtenção das curvas IV de um módulo fotovoltaico de 80 W. As curvas obtidas estão de acordo com o *datasheet* do módulo utilizado.

A comparação dos resultados obtidos foi feita com o modelo de dois diodos, uma vez que não havia um traçador de curvas IV disponível. No entanto, os dados experimentais mostraram que o modelo utilizado representa o módulo testado com uma precisão elevada apenas para correntes



(a)



(b)

Figura 7: Influência da variação do resistor shunt utilizado para a medição de corrente: (a) curvas IV e (b) curvas PV.

de curto-circuito em torno de 4 A, o que demonstra a importância dos ensaios realizados em condições reais de operação.

A escolha do resistor shunt para medição de corrente deve ser feita de forma criteriosa, uma vez que o mesmo pode alterar o comportamento das curvas IV na região de maior interesse, ou seja, próximo ao ponto de máxima potência. O traçador desenvolvido pode ser utilizado para a obtenção de dados a fim de desenvolver modelos mais precisos para a representação dos painéis fotovoltaicos em condições reais de operação.

Devido à modularidade dos traçadores de curvas IV capacitivos, o protótipo desenvolvido pode ser facilmente adaptado para a realização de ensaios em módulos com potência mais elevada ou

a realização de ensaios em conjunto de módulos. Pode-se considerar ainda a possibilidade de realizar a aquisição de dados utilizando um Arduino ou um Raspberry Pi que apresentam um custo menor em relação ao dispositivo utilizado.

Referências

- ABSOLAR (2017). Energia solar fotovoltaica: panorama, oportunidades e desafios, <http://www.absolar.org.br/>. Acessado em: 08/03/2018.
- Bloemink, J. M. and Green, T. C. (2013). Benefits of distribution-level power electronics for supporting distributed generation growth, *IEEE Transactions on Power Delivery* **28**(2): 911–919.
- Duran, E., Piliouquine, M., de Cardona, M. S., Galan, J. and Andujar, J. M. (2008). Different methods to obtain the I-V curve of PV modules: A review, *2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1–6.
- Hishikawa, Y., Doi, T., Higa, M., Yamagoe, K. and Ohshima, H. (2016). Precise outdoor pv module performance characterization under unstable irradiance, *IEEE Journal of Photovoltaics* **6**(5): 1221–1227.
- IEC, I. E. C. (2016). Photovoltaic devices - part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (pv) solar devices with reference spectral irradiance data.
- Ishaque, K., Salam, Z. and Taheri, H. (2011). Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **95**(2): 586 – 594.
- Majzoobi, A. and Khodaei, A. (2017). Application of microgrids in providing ancillary services to the utility grid, *Energy* **123**: 555 – 563.
- Muñoz, J. and Lorenzo, E. (2006). Capacitive load based on IGBTs for on site characterization of PV arrays, *Solar Energy* **80**(11): 1489 – 1497. European Solar Conference (EuroSun 2004).
- National, I. (2013). User guide and specifications ni myrio-1900, <http://www.ni.com/pdf/manuals/376047c.pdf>. Acessado em: 08/03/2018.
- Philipps, S., Peharz, G., Hoheisel, R., Hornung, T., Al-Abbadi, N., Dimroth, F. and Bett, A. (2010). Energy harvesting efficiency of iii-v triple-junction concentrator solar cells under realistic spectral conditions, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **94**(5): 869 – 877.
- Santos, I. P. and Rütther, R. (2012). The potential of building-integrated (bipv) and building-applied photovoltaics (bapv) in single-family, urban residences at low latitudes in brazil, *Energy and Buildings* **50**: 290 – 297.
- Tanesab, J., Parlevliet, D., Whale, J. and Urmee, T. (2017). Seasonal effect of dust on the degradation of pv modules performance deployed in different climate areas, *Renewable Energy* **111**: 105 – 115.