

DESENVOLVIMENTO DE UM TRAÇADOR DE CURVAS I-V PARA ARRANJOS FOTOVOLTAICOS

Fernando Schuck de Oliveira – fernandoschuck@hotmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Energia Solar

Giuliano Arns Rampinelli – giuliano.rampinelli@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá

Arno Krenzing – arno.krenzing@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Energia Solar

Resumo. No presente trabalho é descrito e analisado o protótipo de um traçador de curvas I-V portátil que usa a carga capacitiva como método de polarização e transistores IGBT para o chaveamento desta carga com o arranjo fotovoltaico. O sistema de polarização e chaveamento foi dimensionado para levantar a curva característica de arranjos fotovoltaicos com corrente de curto circuito de até 100 A e tensão de circuito aberto no limite de 800 V. Para o controle do chaveamento e aquisição dos dados a placa Arduino Due foi utilizada trazendo facilidade na operação do equipamento. Para a medida da corrente foi utilizado um resistor shunt e para a tensão um divisor tensão resistivo. Na medida da temperatura o sensor LM35 foi aplicado e da irradiância uma célula de referência calibrada. Foi necessário construir circuitos de amplificação para associar às medidas de corrente e irradiância a fim de adequar o sinal na entrada analógica da placa Arduino. Os dados adquiridos pela placa Arduino são gravados em um cartão de memória para posterior análise. O protótipo construído foi aplicado na medida de curvas características de uma série de 3 módulos. Para analisar o desempenho do protótipo desenvolvido, o resultado de suas medidas foi comparado com o resultado das medidas de um traçador de curvas I-V comercial da marca Eko, modelo MP-11, considerado como instrumento de referência neste trabalho. As curvas medidas apresentaram boa concordância, apresentando, entre os dois instrumentos, diferenças inferiores a 1% nos parâmetros elétricos de interesse da série de módulos. Ao ser provocado sombreamento sobre os módulos que compõem a série de módulos, o protótipo mostrou-se capaz de medir as esperadas descontinuidades resultantes e a curva apresentada mostrou boa concordância com a medida com o instrumento comercial. Os resultados obtidos indicam que a metodologia usada na construção do protótipo é adequada.

Palavras-chave: Sistemas fotovoltaicos, Traçador de curvas I-V, Carga capacitiva.

1. INTRODUÇÃO

A instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) é uma das alternativas para complementar a geração de eletricidade advinda de outras fontes. O Brasil tem uma participação muito irrisória desta fonte no seu sistema elétrico. De acordo com (ANEEL, 2015) a contribuição é de aproximadamente 21 MW_p em capacidade instalada o que representa apenas 0,015 % na capacidade do país. Esta contribuição tem origem em pequenas instalações residenciais e comerciais de geração distribuída e também empreendimentos de maior porte com capacidade instalada igual ou superior a 1 MW_p. Em Tacaratu, no estado de Pernambuco, recentemente foram colocadas em operação duas plantas de 5 MW_p que integram um parque híbrido de geração eólica/solar e em Tubarão em Santa Catarina está em operação uma usina de 3 MW_p, sendo estas as maiores usinas fotovoltaicas em operação no país.

Recentemente ocorreram três leilões de reserva para oferta de energia exclusivamente fotovoltaica. Juntos preveem uma contratação de aproximadamente 2,8 GW_p em capacidade instalada. A expectativa é que em 2024 instalações fotovoltaicas alcancem 7 GW_p, participando com 3,3% no sistema nacional (EPE, 2015).

Frente ao exposto, é previsto o crescimento de instalações fotovoltaicas de grande porte no país. Estas usinas solares necessitam de ensaios de comissionamento a fim de determinar o seu desempenho e qualidade no início e ao longo do seu período de operação. Um dos ensaios é a medição da curva I-V de uma série ou de um arranjo de módulos, conforme previsto na norma NBR 16274/2014.

Para medir a curva I-V é necessário um equipamento capaz de atender as especificações elétricas do sistema de geração fotovoltaica. É interessante que o instrumento seja capaz de medir um arranjo em vez de apenas as séries que o compõe, trazendo a vantagem de ser uma medida mais rápida e permitir a medição de todas as séries sob as mesmas condições meteorológicas. O mercado nacional não dispõe de um equipamento portátil (requisito indispensável para medidas em campo) capaz de medir curvas I-V com correntes próximas a 100 A e tensões da ordem de 1000 V, parâmetros que facilmente podem ser alcançados em instalações de grande porte. No mercado internacional foram identificados apenas dois equipamentos que atendem estas especificações e com um custo em torno de 18 mil dólares.

2. CURVA CARACTERÍSTICA I-V DE ARRANJOS FOTOVOLTAICOS

Em um sistema fotovoltaico, os módulos fotovoltaicos são responsáveis pela conversão direta da radiação solar em energia elétrica. Como um módulo, muitas vezes, não fornece os parâmetros elétricos adequados para o funcionamento de sistemas em que a energia é injetada diretamente na rede, é necessário fazer associações com estes módulos. Em geral, associa-se em série os módulos para estabelecer o valor de tensão e depois associa-se em paralelo estas séries, formando o que se chama de arranjo, estabelecendo desta forma o valor adequado de potência.

Para a avaliação e análise de desempenho de um arranjo é necessário levantar a sua curva característica de corrente e tensão (curva I-V). A partir desta curva é possível extrair importantes parâmetros elétricos como, por exemplo, a máxima potência que o sistema é capaz de fornecer em uma dada condição de irradiância solar e temperatura. Embora seja possível determinar a curva I-V de um arranjo a partir das curvas individuais dos módulos que o compõe, esta técnica não prevê as perdas existentes por associação, obtendo-se desta forma uma potência maior que a potência que realmente o arranjo poderia entregar (Rampinelli, 2007). Assim sendo, é necessário que seja levantada a curva característica diretamente do arranjo, utilizando um equipamento que tenha seus parâmetros nominais de tensão e corrente compatíveis com este arranjo, além disso deve ser capaz de medir a irradiância solar e a temperatura para que o resultados obtidos possam ser transladados para a condição *standard* ($T_{cel} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G = 1000\text{ W/m}^2$ e $AM = 1,5$) ou para uma condição comum de irradiância e temperatura necessária para a comparação, por exemplo, com a potência no dia da instalação dos módulos.

Além de fornecer dados elétricos, a curva I-V permite identificar defeitos na instalação como, por exemplo, células ou módulos danificados, células ou módulos parcial ou completamente sombreados, etc. A Fig. 1 mostra duas curvas sintetizadas através do *software* Crearray¹ para uma série composta de 3 módulos de 245 W_p sendo que no caso (a) os três módulos estão sob a mesma irradiância e em (b) um dos módulos está sombreado em mais de 50% de sua área.

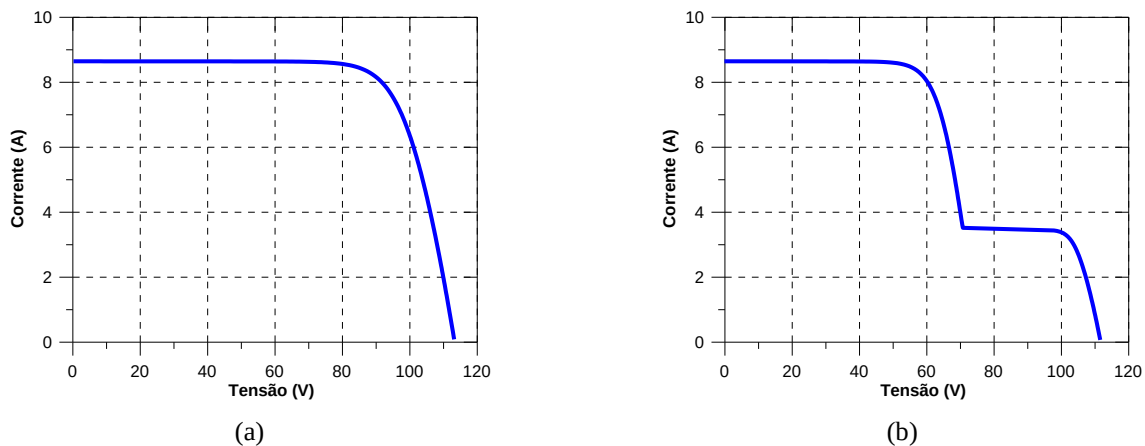


Figura 1 - Curvas sintetizadas de uma série composta de 3 módulos de 245 W através do *software* Crearray: (a) os módulos estão sob a mesma irradiância; (b) um dos módulos está sombreado em mais de 50% de sua área.

Como instalações fotovoltaicas são caracterizadas sob iluminação natural (*outdoor*) é interessante que o traçado da curva seja realizado com uma velocidade que não permita que a variação da radiação solar incidente influencie nos pontos medidos. Além disso, estes pontos devem ser em quantidade suficiente para que seja possível determinar com maior precisão o ponto de máxima potência e permitir visualizar os possíveis defeitos ao longo da curva.

A obtenção da curva I-V tem por princípio a polarização do módulo (ou arranjo) nos diversos pontos de operação (corrente e tensão), fazendo-se a aquisição desses pontos simultaneamente. Diversas metodologias são adotadas para executar a tarefa de polarizar o módulo, sendo as mais usuais o uso de carga capacitiva, carga resistiva, carga eletrônica, conversor c.c./c.c., fonte de quatro quadrantes e amplificador bipolar de potência (Durán, et al., 2008). Para a aquisição dos dados podem ser aplicados multímetros, osciloscópios, conversores AD (analógico-digital), placas de aquisição, etc.

3. DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO

O protótipo desenvolvido é destinado a medir curvas em campo e utiliza a carga capacitiva para controlar a corrente fornecida pelo arranjo desde o seu valor máximo até o ponto onde seu valor é nulo. A corrente de curto circuito I_{sc} é o ponto onde a corrente fornecida pelo arranjo tem valor máximo e a tensão o valor nulo. No ponto onde a tensão é máxima, encontra-se tensão de circuito aberto V_{oc} , sendo que neste ponto a corrente é nula. O capacitor no seu processo de carga tem a propriedade de comportar-se como um curto circuito no início do processo e aproximadamente um circuito aberto no final, o que possibilita sua aplicação como elemento de polarização em um traçador de curvas I-V.

¹ Este *software* foi desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Para implementar o circuito de polarização no traçador de curvas I-V é necessário um circuito que acople o arranjo à carga capacitiva e que também descarregue o capacitor após a aquisição dos pontos de corrente e tensão, permitindo que uma nova curva possa ser obtida. No trabalho de (Muñoz e Lorenzo, 2006) é descrito um equipamento traçador de curvas I-V que permite caracterizar arranjos com tensão de circuito aberto até 800 V e correntes de curto circuito até 80 A e usa transistores IGBT como elemento de chaveamento entre o arranjo e a carga capacitiva e também para descarregá-la, sendo o acionamento destes elementos realizado manualmente seguindo uma lógica implementada por interruptores. A Fig. 2 mostra dois circuitos descritos no trabalho de (Muñoz e Lorenzo, 2006): (a) circuito de chaveamento; (b) circuito que implementa a lógica de operação do traçador.

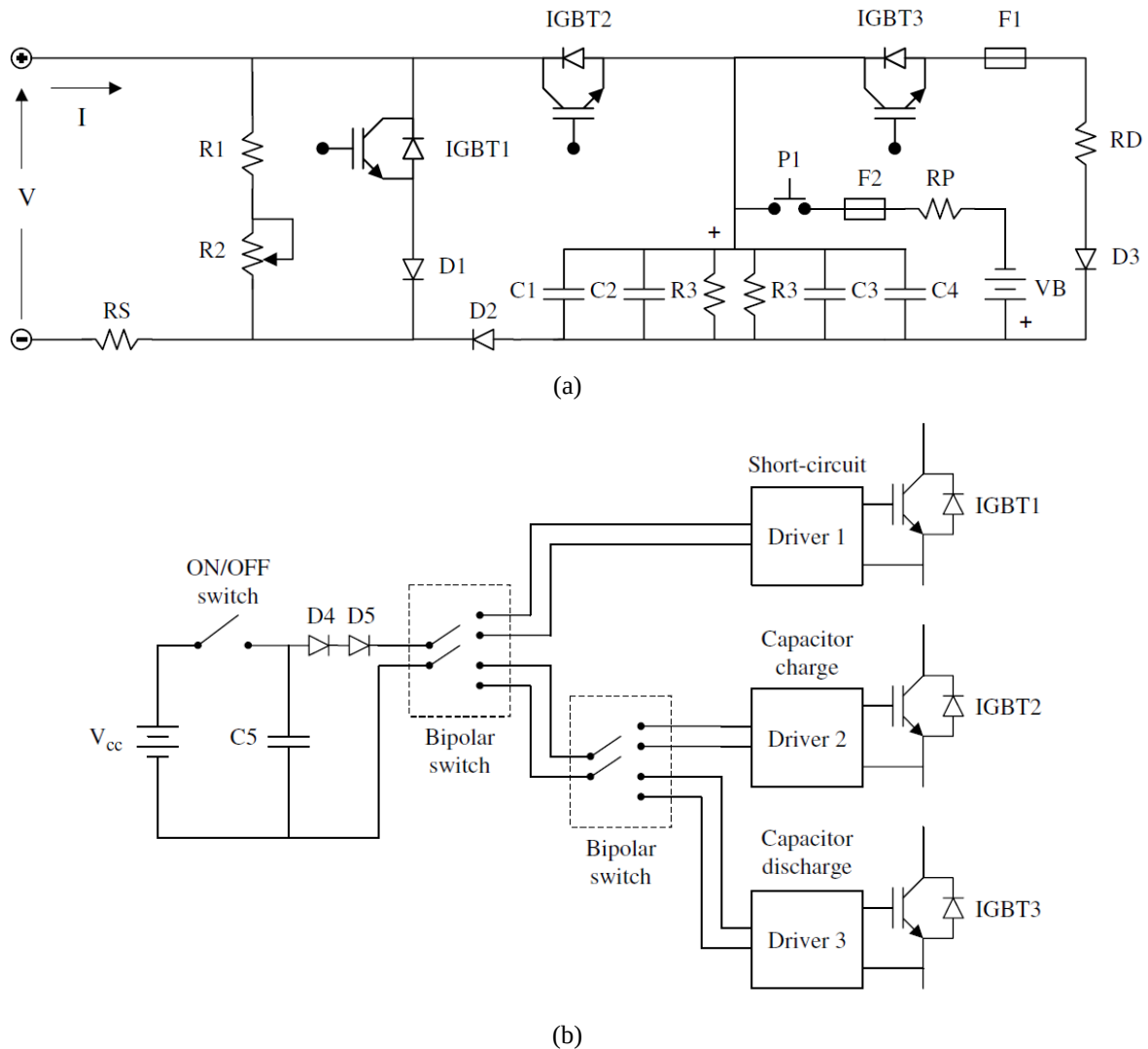


Figura 2 - Circuitos descritos no trabalho de (Muñoz e Lorenzo, 2006): (a) circuito de chaveamento; (b) circuito que implementa a lógica de operação do traçador. Fonte: (Muñoz e Lorenzo, 2006).

No presente trabalho o protótipo desenvolvido tem por base o circuito de chaveamento desenvolvido por (Muñoz e Lorenzo, 2006), entretanto a lógica de operação e a aquisição dos dados de corrente, tensão, irradiância e temperatura é realizada de forma automática, aumentando o nível de abstração do operador sobre o *hardware* do equipamento.

A lógica de operação, controle e a aquisição de dados é alcançada com a utilização da placa Arduino modelo Due. Esta placa é uma plataforma de prototipagem eletrônica de *hardware* livre, tendo como principal componente o microcontrolador SAM3X8E, fabricado pela Atmel (Arduino, 2015). A escolha da placa Arduino para controlar o protótipo reside na sua fácil aquisição, no seu ambiente de desenvolvimento próprio e gratuito, na facilidade de programação e na facilidade de integração de periféricos como, por exemplo, cartão de memória e *display* de LCD. A opção pelo modelo Due está amparada no fato de possuir maior memória de programação, pois é necessário gravar os dados adquiridos internamente para que a aquisição não sofra atrasos e também por possuir um número maior de pinos de entrada e saída em comparação com outros modelos.

O circuito de chaveamento é controlado pela placa Arduino através de um circuito auxiliar composto de relés e optoacopladores com a função de proteger tanto a placa Arduino como os IGBTs. A Fig. 3 mostra o diagrama esquemático do circuito auxiliar para o controle do circuito de chaveamento (Oliveira, 2015).

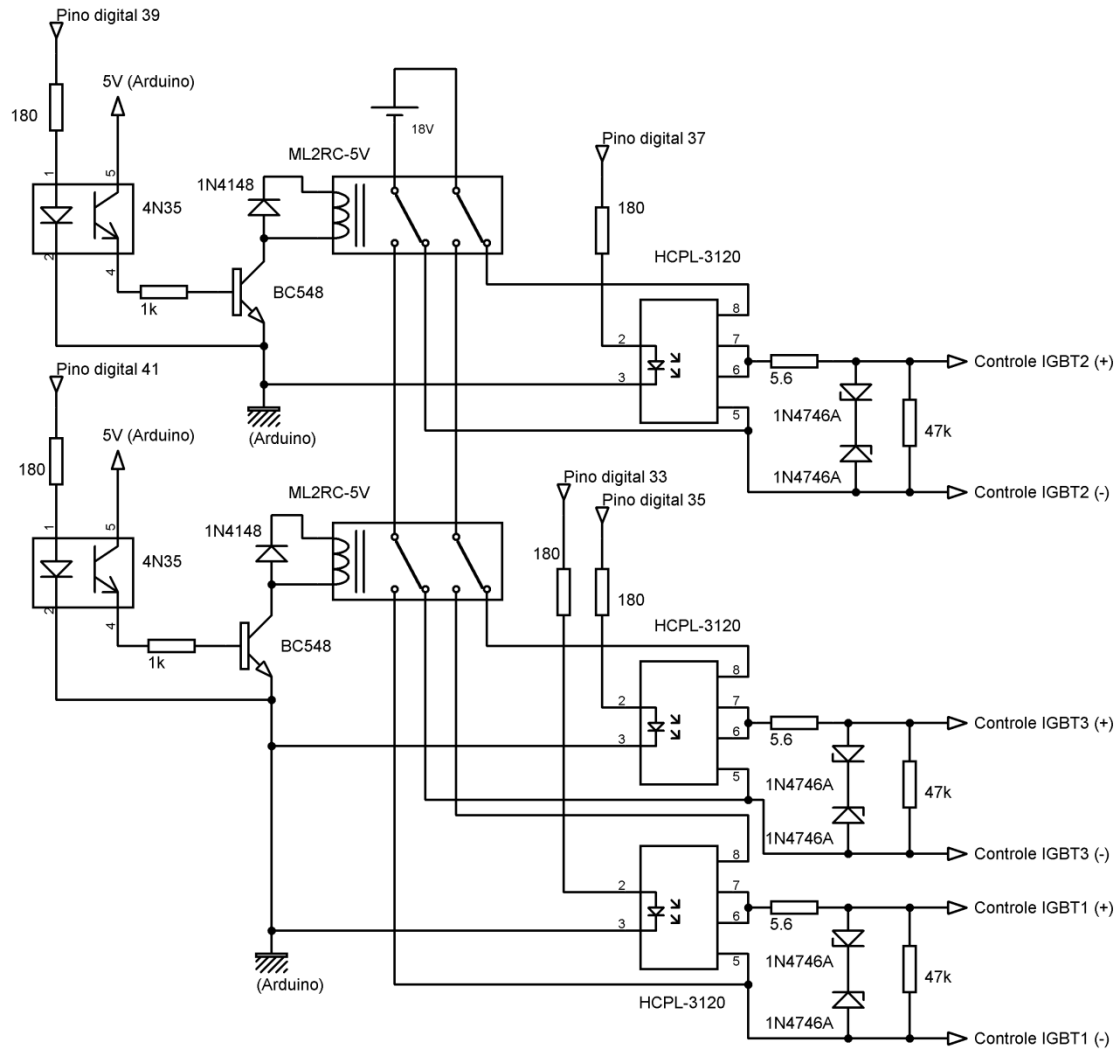


Figura 3 - Diagrama esquemático do circuito auxiliar para o controle do circuito de chaveamento.
Fonte: (Oliveira, 2015).

O circuito de chaveamento usado neste trabalho, embora baseado no proposto por (Muñoz e Lorenzo, 2006), é apresentado na Fig. 4, possibilitando visualizar os pontos de conexão com o circuito auxiliar da Fig. 3.

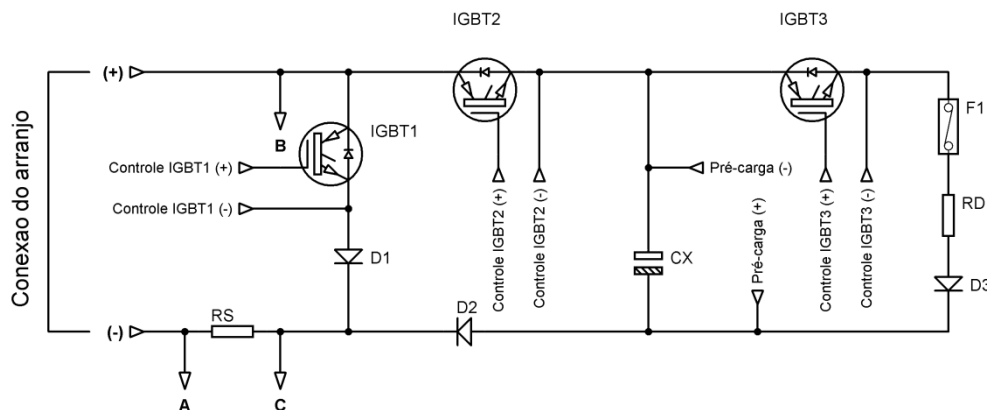


Figura 4 - Circuito de chaveamento. Fonte: (Oliveira, 2015).

O circuito de chaveamento foi dimensionado para atender arranjos com corrente de curto circuito de até 100 A e tensões de circuito aberto até 800 V. A carga capacitiva é composta de 4 capacitores eletrolíticos com capacitância de 4700 μF e tensão de isolamento de 450 V, associados de forma que a tensão seja de 900 V e a capacitância de 4700 μF . A capacitância deve ser definida de acordo com a Eq. (1) (Mahmoud, 2006).

$$C = \frac{t_{\text{aquisição}} I_{sc}}{2 V_{oc}} \quad (1)$$

onde C é a capacitância, $t_{\text{aquisição}}$ é o tempo de aquisição do sistema de medida, I_{sc} e V_{oc} são a corrente de curto circuito e a tensão de circuito aberto, respectivamente, do arranjo fotovoltaico.

Conforme indica a Eq. (1) o tempo de carga do capacitor é definido pelo seu valor de capacitância e pelas características elétricas do arranjo, dessa forma é necessário que o tempo de aquisição do sistema de medida seja compatível com este tempo de carga. A placa Arduino foi programada para, no máximo, obter 1000 pontos de medida em um tempo de 200 ms (5 kSa/s), entretanto é possível diminuir o número de pontos de medida e consequentemente diminuir o tempo de aquisição. A Fig. 5 mostra a relação dos valores de V_{oc} e I_{sc} permitidos em um arranjo de forma que seja possível sua caracterização com uma carga capacitiva de 4700 μF e de 2200 μF , sendo em (a) considerado um tempo de aquisição de 75 ms e em (b) 200 ms.

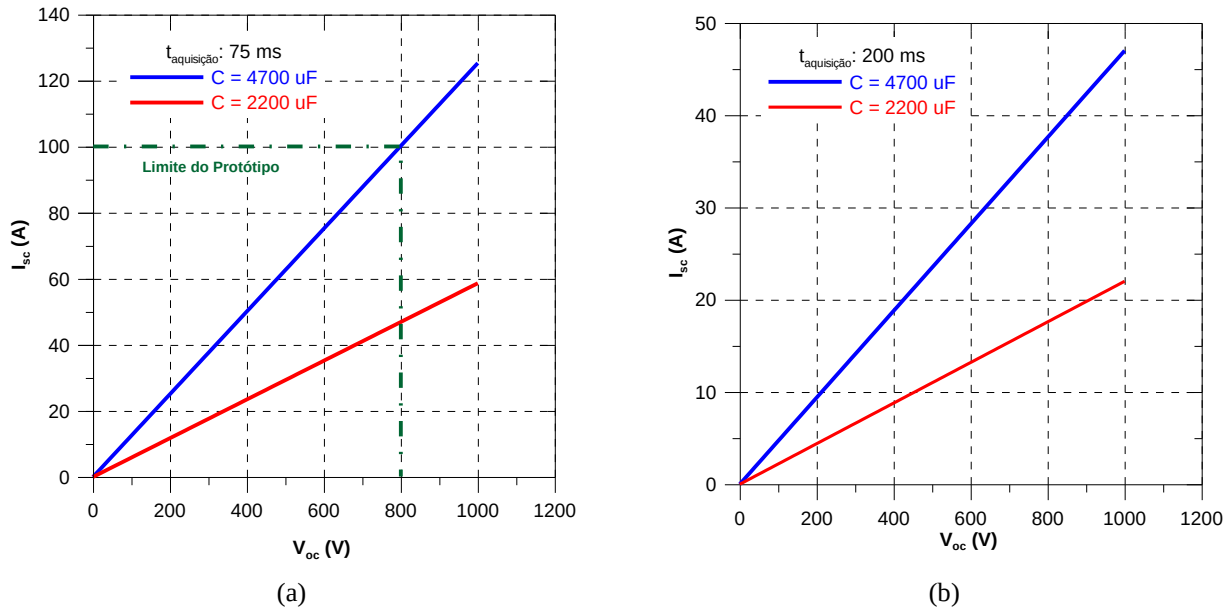


Figura 5 - Relação dos valores de V_{oc} e I_{sc} permitidos em um arranjo de forma que seja possível sua caracterização com uma carga capacitiva de 4700 μF e de 2200 μF , sendo em (a) considerado um tempo de aquisição de 75 ms e em (b) 200 ms.

Para reduzir o tempo de aquisição para 75 ms o número de pontos é reduzido para 375, mas ainda é uma densidade suficiente de pontos para uma caracterização de boa e aceitável qualidade.

Para medir a tensão do arranjo um divisor de tensão resistivo é utilizado nos pontos B e C do diagrama esquemático exibido na Fig. 4. Este divisor pode ser visto na Fig. 6 e tem a função de atenuar a tensão do arranjo para o limite do fundo de escala do conversor AD da placa Arduino que é de 3,3 V.

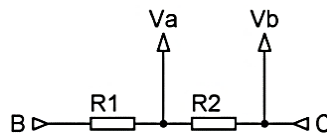


Figura 6 - Divisor de tensão resistivo para atenuar a tensão do arranjo até a entrada analógica da placa Arduino.
Fonte: (Oliveira, 2015).

Na medida da corrente um resistor shunt (representado por R_S no diagrama esquemático exibido na Fig. 4) foi utilizado tendo sua queda de tensão amplificada 55 vezes a fim de aproximar seu fundo de escala (60 mV) ao fundo de escala do conversor AD da placa Arduino. Esta amplificação é realizada pelo amplificador de instrumentação INA 122, cujo circuito é apresentado na Fig. 7.

A medida da irradiância utiliza uma célula de referência calibrada com constante de calibração igual a 0,0459 $\text{mV}/(\text{W}/\text{m}^2)$, sendo este sinal elétrico amplificado usando-se o mesmo circuito da Fig. 7, porém com um ganho de 44 vezes. A temperatura de célula é medida usando-se um sensor de temperatura integrado LM35 que fornece um sinal elétrico de 10 mV para cada grau celsius de variação de temperatura (10 $\text{mV}/^\circ\text{C}$). Os componentes que compõem o protótipo ficam acondicionados em uma maleta de alumínio que possui um painel que permite acessar e selecionar as

funções através de 2 botões e visualiza-las em um *display* de LCD. Os dados obtidos pela varredura de pontos são gravados na memória interna da placa Arduino e depois transferidos para um cartão de memória no formato de valores separados por vírgulas (CSV) para posterior processamento.

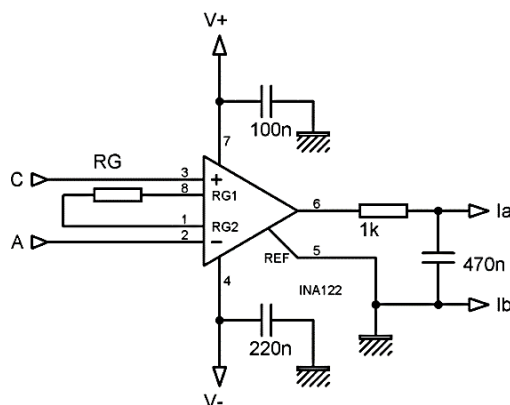


Figura 7 - Circuito de amplificação para medida da corrente do arranjo. Os pontos A e C são conectados aos pontos A e C do circuito da Fig. 4. Fonte: (Oliveira, 2015).

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O desempenho do protótipo desenvolvido foi analisado a partir da comparação do seu resultado com o de um dispositivo comercial. O sistema comercial utilizado como referência não é nenhum dos dois citados anteriormente, pois sua corrente é limitada a 30 A. Trata-se do modelo MP-11 IV Checker da empresa Eko Instruments, cujas principais características são apresentadas na Tab. 1.

Tabela 1 - Principais características do traçador de curvas I-V comercial.

Especificação	MP-11 IV Checker
Intervalo de Medida	Tensão: 10V – 1000V
	Corrente: 0,01A – 30A
	Potência: 10W – 18kW

Para a análise foram levantadas curvas de uma série de módulos que, nominalmente, na condição *standard* possui tensão de circuito aberto igual a 113,4 V e corrente de curto circuito de 8,63 A. As curvas foram levantadas em um dia de céu limpo e sem a presença significativa de nebulosidade.

A Fig. 8 mostra as curvas levantadas com o protótipo e com o equipamento comercial quando a irradiância era de 783 W/m² e a temperatura de célula de 42 °C, sendo em (a) as curvas I-V e em (b) as curvas P-V.

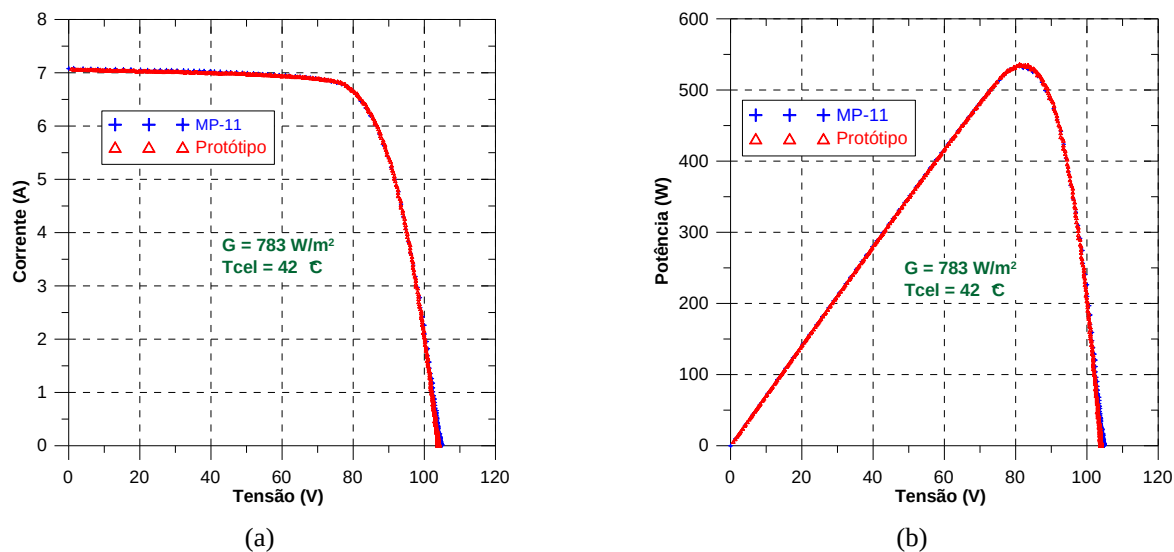


Figura 8 - Curvas levantadas com o protótipo e com o equipamento comercial quando a irradiância era de 783 W/m² e a temperatura de célula de 42 °C, sendo em (a) as curvas I-V e em (b) as curvas P-V.

Através de uma análise qualitativa percebe-se que há uma boa concordância entre a curva medida com o protótipo e com o equipamento comercial. Na Tab. 2 são apresentados os parâmetros elétricos de interesse extraídos a partir da curva levantada com o os dois equipamentos e também são apresentadas as diferenças encontradas tendo como referência o equipamento comercial.

Tabela 2 - Características elétricas da série de módulos obtidas a partir da curva levantada pelo protótipo e pelo equipamento comercial.

Parâmetro	Protótipo	MP-11	Diferença
I_{sc}	7,07 A	7,09 A	0,28%
V_{oc}	104,13 V	104,59 V	0,44%
I_m	6,61 A	6,60 A	0,15%
V_m	81,11 V	80,86 V	0,31%
P_m	536,36 W	533,42 W	0,55%
FF	0,72	0,72	---

A partir dos resultados apresentados pela Tab. 2, percebe-se que os parâmetros elétricos de interesse da série de módulos apresentaram diferenças inferiores a 1% entre a medida com o protótipo e o equipamento comercial.

Para verificar o comportamento do protótipo na medida de curvas características com defeito, foram provocados sombreamentos em algumas células da série de módulos. O resultado obtido é apresentado na Fig. 9.

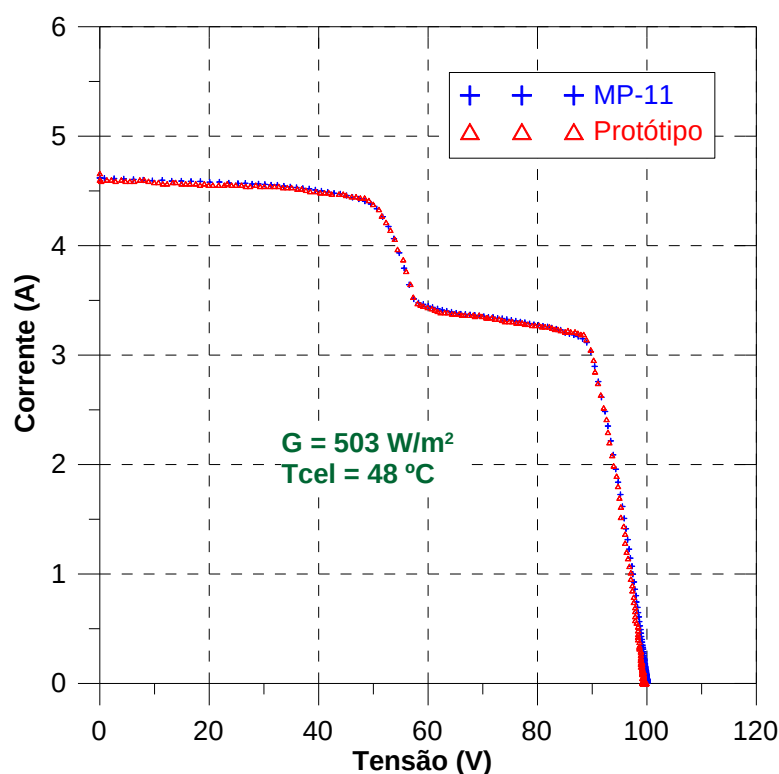


Figura 9 - Curvas levantadas com o protótipo e com o equipamento comercial sob a irradiação de 503 W/m^2 e temperatura de célula de 48°C quando provocados sombreamentos sobre a série de módulos.

Como se observa na Fig. 9 a curva medida com o protótipo apresenta boa concordância com a medida com o equipamento comercial. Outra etapa de comparação consistiu na determinação das Curvas I-V em diferentes irradiações. Para cada irradiação foram realizadas 10 medições com o protótipo desenvolvido e 10 medições com o equipamento comercial. As medições para cada irradiação foram realizadas de forma alternada com os dois equipamentos. Denomina-se de ensaio para uma irradiação as 10 medições realizadas com cada um dos equipamentos. As curvas I-V foram determinadas para quatro irradiações diferentes, sendo que para as irradiações de 670 W/m^2 , 780 W/m^2 e 445 W/m^2 o arranjo fotovoltaico estava em condições normais, isto é, sem sombreamento, enquanto que para a irradiação de 730 W/m^2 havia um sombreamento parcial de células dos módulos do arranjo fotovoltaico produzido de maneira artificial. Em cada ensaio composto por 10 medições em uma dada irradiação, do protótipo desenvolvido e do traçador MP-11, foi determinada a média e o desvio padrão dos parâmetros de tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto circuito (I_{sc}) e potência máxima (P_m). Estes resultados são apresentados na Tab. 3.

Tabela 3 - Média e desvio padrão dos parâmetros elétricos obtidos a partir da curva levantada pelo protótipo e pelo equipamento comercial em cada ensaio de irradiância.

Irradiância	Traçador I-V	$V_{oc}(V)$		$I_{sc}(A)$		$P_m(W)$	
		μ	σ	μ	σ	μ	σ
670 W/m ²	MP-11	101,05	0,18	6,15	0,07	446,42	5,24
	Protótipo	100,63	0,18	6,13	0,07	447,92	5,32
780 W/m ²	MP-11	104,91	0,32	7,09	0,01	536,09	1,92
	Protótipo	104,27	0,31	7,07	0,02	538,04	1,83
445 W/m ²	MP-11	103,89	0,18	4,09	0,12	320,05	10,23
	Protótipo	103,32	0,23	4,14	0,12	318,96	9,85
730 W/m ²	MP-11	100,65	0,36	6,67	0,01	308,99	2,66
	Protótipo	100,13	0,45	6,67	0,01	311,04	2,25

Os resultados obtidos a partir da comparação do desempenho entre o protótipo desenvolvido e o dispositivo comercial indicam que o protótipo desenvolvido e apresentado neste trabalho é adequado para a aplicação a que se destina: medir curvas I-V de arranjos fotovoltaicos em campo.

Na continuidade do desenvolvimento o protótipo deverá receber aperfeiçoamentos na isolamento elétrica utilizando novos conversores para as medições de tensão e corrente do arranjo, bem como introdução de *software* para o pós-processamento dos dados adquiridos.

5. CONCLUSÕES

A curva I-V de um arranjo fotovoltaico pode ser determinada a partir das curvas individuais dos módulos que o compõe, entretanto as perdas por associação não são consideradas por este método. Desta forma é necessário levantar a curva característica diretamente do arranjo através de um equipamento traçador de curvas capaz de atender os limites de tensão e corrente impostos pelo mesmo. A determinação correta da curva I-V de um arranjo permite determinar, por exemplo, a potência máxima que ele é capaz de fornecer sob determinada condição de irradiância e temperatura. Além disso, pelo traçado da curva é possível identificar possíveis defeitos na instalação.

No presente trabalho foi descrito e analisado o protótipo de um traçador de curvas I-V que usa a carga capacitiva como método de polarização e transistores IGBT para o chaveamento desta carga com o arranjo fotovoltaico. O sistema de polarização e chaveamento foi dimensionado para levantar a curva característica de arranjos fotovoltaicos com corrente de curto circuito até 100 A e tensão de circuito aberto no limite de 800 V. Para o controle e aquisição dos dados a placa Arduino Due foi utilizada trazendo facilidade na operação do equipamento. O protótipo construído foi aplicado na medida da curva característica de uma série de 3 módulos.

Para analisar o desempenho do protótipo desenvolvido, o resultado de suas medidas foi comparado com o resultado das medidas de um traçador de curvas I-V comercial da marca Eko, modelo MP-11, considerado como instrumento de referência neste trabalho. As curvas medidas apresentaram boa concordância, apresentando, entre os dois instrumentos, diferenças inferiores a 1% nos parâmetros elétricos de interesse da série de módulos. Ao ser provocado sombreamentos sobre os módulos que compõem a série de módulos, o protótipo se mostrou capaz de medir estes defeitos e a curva apresentada mostrou boa concordância com a medida com o instrumento comercial. Os resultados obtidos indicam que a metodologia usada na construção do protótipo se mostra adequada para medir curvas I-V de arranjos fotovoltaicos em campo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro. O LABSOL é um laboratório associado ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia, INCT-EREEA.

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014. ABNT NBR 16274: Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2015. Banco de Informações de Geração: capacidade de geração do Brasil. Brasília. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 23 outubro 2015.
- Arduino, 2015. Arduino Due. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDue>>. Acesso em: 02 março 2015.
- Durán, E.; Piliouline, M.; Sidrach-de-Cordona, M.; Galán, J.; Adújar, J.M., 2008. Different Methods to Obtain the I-V Curve of PV Modules: A Review. 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference. San Diego, California, USA.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética, 2015. Plano Decenal de Expansão de Energia 2024.

- Mahmoud, M.M., 2006. Transient Analysis of a PV Power Generator Charging a Capacitor for Measurement o I-V Characteristics. *Renewable Energy*, vol 31, pp. 2198-2206.
- Muñoz, J.; Lorenzo, E., 2006. Capacitive Load Based on IGBTs for on site Characterization of PV Arrays. *Solar Energy*, vol 80, 11, pp. 1489-1497.
- Oliveira, F.S., 2015. Desenvolvimento de Traçador de Curvas I-V Portátil para Arranjos Fotovoltaicos. Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- Rampinelli, G. A., 2007. Análise da Distribuição de Tensões Elétricas em Uma Associação de Módulos de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede. Dissertação de Mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS.

DEVELOPMENT OF AN I-V CURVE TRACER FOR PV ARRAYS

Abstract. *In this paper we described and analyzed the prototype of a portable IV curve tracer using the capacitive load as a method of biasing and IGBT transistors for switching this load to the PV array. The biasing and switching system has been designed to determine characteristic curve of photovoltaic arrays with short circuit currents up to 100 A and open circuit voltages up to 800 V. To control the switching and data acquisition the Arduino Due board was used bringing facilities on equipment operation. A resistor shunt was used to measure the current and a resistive voltage divider for voltage. For temperature measurement a LM35 sensor was employed and a calibrated reference cell was used to determine the solar irradiance. It was necessary to build amplifier circuits in order to adjust the signal of the current and irradiance measurements to the analog input of the Arduino board. The data acquired by the Arduino board is written to a memory card for later analysis. The developed prototype was applied to determine the characteristic curves of a 3 modules string. To analyze the performance of the prototype, its results were compared with the measurement results of a commercial IV curve tracer, Eko brand, MP-11 model, considered as a reference tool in this work. The measured curves showed good agreement, with differences between the two instruments below 1% in the electrical parameters of interest in the modules string. When producing partial shading over the modules of the string, the prototype proved to be able to measure the expected resulting discontinuities and the presented curve showed good agreement with that measured using the commercial instrument. The results indicate that the methodology used in constructing the prototype is suitable.*

Key words: *Photovoltaic systems, IV curve tracer, Capacitive load.*