

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM TRAÇADOR DE CURVAS I-V PORTÁTIL PARA ARRANJOS FOTOVOLTAICOS

F. S. Oliveira¹, G. A. Rampinelli², F. P. Gasparin³, C. W. M. Prieb¹, A. Krenzinger¹.

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

²Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

³Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS)

e-mail: fernandoschuck@hotmail.com, giuliano.rampinelli@ufsc.br,
gasparin.fabiano@gmail.com, cprieb@ufrgs.br, arno.krenzinger@ufrgs.br

Recibido 01/09/15, aceptado 02/10/15

RESUMO: O presente trabalho apresenta o desenvolvimento e análise de desempenho de um traçador de curvas I-V portátil para aplicação em arranjos fotovoltaicos a serem medidos em campo. Este sistema utiliza a carga capacitiva como método de polarização do gerador fotovoltaico sendo o chaveamento realizado eletronicamente por transistores bipolares de porta isolada (IGBT). Uma placa Arduino Due foi utilizada para controle do acionamento dos IGBTs e medida de corrente e tensão, demonstrando-se adequada para a proposta, sendo que o programa de controle desta placa foi escrito em uma variação da linguagem de programação C++. Foram construídos circuitos auxiliares de amplificação de sinal para realizar as medidas de corrente e de irradiância, utilizando respectivamente como sensores um resistor shunt e uma célula de referência calibrada. Para medida da temperatura foi aplicado o sensor de temperatura LM35 que apresentou resultados satisfatórios. Os dados adquiridos pela placa Arduino são gravados em um cartão de memória para posterior análise. O protótipo construído foi utilizado na medida de curvas I-V de um gerador fotovoltaico composto de uma série de 3 módulos fotovoltaicos instalados no terraço do prédio que abriga o simulador solar do Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LABSOL/UFRGS). Os resultados das medidas realizadas pelo protótipo foram comparados com as medidas de um sistema traçador de curvas disponível comercialmente modelo MP-11 IV Checker. Os resultados obtidos pelo protótipo confirmaram que a sua adequação para aplicação em medidas em campo de curvas I-V de arranjos fotovoltaicos.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos, Traçador de Curvas I-V, Carga Capacitiva.

INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica tem atributos que a tornam única. O fato de ser possível incrementar a produção tão rapidamente e a tecnologia se desenvolver a partir de infraestrutura existente faz com que a taxa de inovação no segmento seja muito maior que nos demais setores de energia. Na realidade, esta taxa situa-se mais próxima de setores como TI, com suas mudanças constantes. Além de uma extensa variedade de pesquisa em novas tecnologias, há constantes inovações na indústria que vêm reduzindo significativamente o custo por unidade de energia produzida das tecnologias disponíveis comercialmente seja pelo desenvolvimento de novos produtos e processos de produção e pelo incremento da disposição, comercialização, financiamento e instalação da tecnologia (ABINEE, 2012).

As primeiras centrais fotovoltaicas com potências da ordem de 1 MW_p foram instaladas recentemente ou estão em fase de implantação no Brasil. A chamada nº 13/2011 da Agência Nacional de Energia Elétrica denominada Projeto Estratégico: Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira aprovou diversos projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação de centrais fotovoltaicas entre 0,5 MW e 3 MW a serem concluídos nos próximos 2 anos totalizando 24,4 MW. Também se destacam neste cenário promissor para o aproveitamento da energia solar fotovoltaica iniciativas como a resolução normativa 482/2012 da ANEEL, na qual estabelece as condições gerais para o acesso de micro geração (potências menores ou iguais a 100 kW) e mini geração (potências maiores que 100 kW e menores ou iguais a 1 MW) aos sistemas de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2012). Diversas distribuidoras de energia elétrica recentemente disponibilizaram manuais de procedimentos estabelecendo a regulamentação e requisitos necessários para a conexão de micro ou mini geradores de energia ao sistema elétrico.

Outro marco importante que deve ser destacado é o programa brasileiro de etiquetagem de módulos fotovoltaicos e inversores do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). A Portaria nº 004 de 4 de janeiro de 2011 aprovou a revisão dos requisitos de avaliação da conformidade para sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica (INMETRO, 2011). O atual processo de regulamentação elimina uma das maiores barreiras ao desenvolvimento da energia solar fotovoltaica no Brasil. Krenzinger e Zilles (2012) estimam que no ano de 2020 os sistemas fotovoltaicos contribuam com cerca de 1 % a 2 % da geração de energia elétrica e que a potência acumulada será da ordem de 10 GW.

CARACTERIZAÇÃO DE MÓDULOS E ARRANJOS FOTOVOLTAICOS

A potência produzida pelo sistema fotovoltaico e entregue à rede elétrica depende de muitos fatores, sendo dois dos mais importantes a radiação solar incidente no plano dos módulos fotovoltaicos e a temperatura de operação das células que constituem os módulos. Outros fatores adicionais estão associados às perdas na fiação e devido às diferenças entre as células

individuais que constituem um módulo, ou módulos individuais que constituem um gerador fotovoltaico. A curva característica (I-V) descreve o comportamento elétrico do gerador fotovoltaico que se encontra sob influência destes fatores. Em qualquer fase de um projeto para aplicação de energia solar fotovoltaica, desde o dimensionamento técnico até estudos de viabilidade econômica é imprescindível o conhecimento do comportamento elétrico dos módulos e arranjos fotovoltaicos. Segundo a norma americana ASTM E1036 (1996), a medida do desempenho de um módulo ou arranjo fotovoltaico consiste em determinar pelo menos as seguintes características elétricas: corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), potência máxima (P_m), tensão de máxima potência (V_{mp}) e corrente de máxima potência (I_{mp}). Estas características são determinadas mediante análise direta da curva característica I-V. Estes são os dados que obrigatoriamente os fabricantes especificam nos módulos comerciais (GASPARIN, 2009). A norma brasileira NBR-12136 (ABNT, 1991a), a norma internacional IEC 891 (1987) e a norma americana E 1036-08 (ASTM, 2008) estabelecem a mesma condição padrão para a determinação da curva I-V (BÜHLER, 2011). A medida da curva I-V proporciona informação relevante para o projeto, instalação, gerenciamento, manutenção e operação de um sistema fotovoltaico.

A confiabilidade dos sistemas fotovoltaicos está baseada na capacidade da correta previsão do seu comportamento durante a sua vida útil, sendo que uma parte fundamental dos trabalhos de avaliação dos respectivos sistemas é a caracterização dos módulos e arranjos e a determinação dos parâmetros que influenciam no seu comportamento. A determinação da curva I-V permite conhecer informações sobre a qualidade e eficiência do dispositivo elétrico.

DESCRIÇÃO DO TRAÇADOR DE CURVAS I-V DESENVOLVIDO

O traçador de curvas I-V desenvolvido é o protótipo de um equipamento destinado a caracterizar arranjos fotovoltaicos em campo que usa uma carga capacitiva como método de polarização. O sistema desenvolvido integra três subsistemas: sistema lógico programável, sistema de potência e sistema de medição.

Sistema Lógico Programável

O controle do sistema de potência e aquisição de dados é realizado pelo sistema lógico programável. Este sistema está baseado na placa Arduino Due – uma plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre, cujo principal componente é o microcontrolador SAM3X8E do fabricante Atmel (Arduino, 2015). Os comandos executados pela placa Arduino são programados através de uma linguagem baseada em C++ no Ambiente Integrado de Desenvolvimento (IDE – *Integrated Development Environment*) específico para a mesma. A rotina foi escrita de forma a executar o chaveamento da carga capacitiva e a aquisição de dados necessários para caracterização de um gerador fotovoltaico: pares I-V, temperatura e irradiância, sendo os mesmos gravados num cartão de memória e utilizados para posterior análise e processamento. A opção pelo uso da placa Arduino, reside principalmente na sua fácil utilização, programação e integração de periféricos como, por exemplo, cartão de memória e *display* de LCD, utilizados no protótipo.

Sistema de Potência

O sistema de potência utiliza capacitores chaveados eletronicamente para polarizar o gerador fotovoltaico nos diversos pontos da curva característica, promovendo uma varredura de tensão a partir do ponto de curto circuito até o ponto de circuito aberto. Para o chaveamento dos capacitores foram utilizados transistores do tipo IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor* – Transistor Bipolar de Porta Isolada). O circuito de chaveamento usado neste trabalho, apresentado na Figura 1, é baseado no que foi desenvolvido por Muñoz e Lorenzo, 2006.

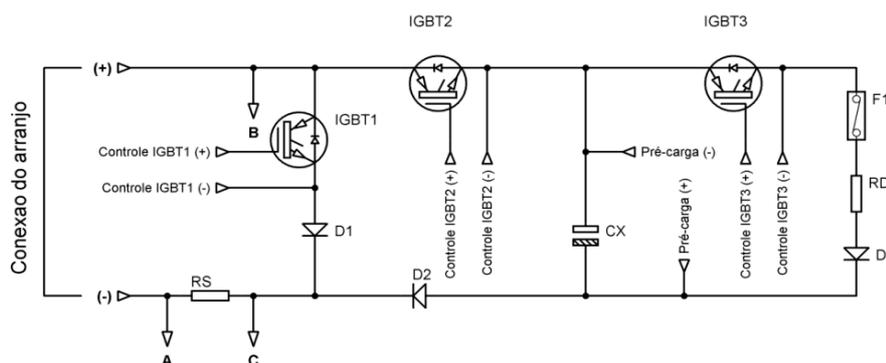


Figura 1: Circuito de chaveamento.

No circuito da Figura 1, o IGBT1 tem a função de colocar o arranjo fotovoltaico em curto-circuito, o IGBT2 acopla o arranjo à carga capacitiva representada por CX, promovendo desta maneira a varredura dos pontos que compõem a curva característica. O IGBT3 é utilizado para descarregar os capacitores através do resistor RD. Os diodos D1 e D2 exercem a função de proteger o circuito caso o arranjo seja interligado com a polaridade invertida e o diodo D3 impede que a pré-carga reversa aplicada na carga capacitiva seja dissipada através do resistor RD devido ao diodo interno do IGBT3. A pré-carga reversa tem por objetivo polarizar o arranjo no segundo quadrante (corrente positiva e tensão negativa) com intuito de compensar as quedas de tensão nos diversos elementos do circuito, permitindo que o ponto de curto-circuito do arranjo fotovoltaico seja determinado com maior exatidão. Na posição do IGBT1 e do IGBT2 do circuito de chaveamento foi

empregado o modelo GT100DA120U, fabricado pela Vishay Semiconductors, que pode operar, em modo contínuo, com V_{CE} de 1200 V e I_C de 258 A em uma temperatura de junção de 25 °C (Vishay, 2012).

Para a posição do IGBT3, o modelo empregado foi IRG4PH40UD cujos valores de operação são $V_{CE}=1200$ V e $I_C=41$ A em uma temperatura de junção igual a 25 °C (International Rectifier, 2006). A resistência R_D é composta pela associação em série de 3 resistores de 470 Ω x 100 W, resultando em uma resistência nominal de 1410 Ω . A carga capacitiva é constituída pela associação de 4 capacitores de 4700 μF x 450 V que nominalmente resulta em uma capacitância de 4700 μF cujo limite de tensão alcança 900 V.

O uso do capacitor como carga para polarizar um arranjo fotovoltaico baseia-se no fato dele se comportar idealmente como um curto-circuito quando descarregado e como circuito aberto quando plenamente carregado. Partindo do princípio que um gerador fotovoltaico pode ser aproximado por uma fonte de corrente não ideal, a obtenção de sua curva característica pode ser alcançada com o uso da carga capacitiva. Na Figura 2 pode ser visto o comportamento da tensão e da corrente em função do tempo para um arranjo quando polarizado por uma carga capacitiva (a) e também a sua curva característica (b).

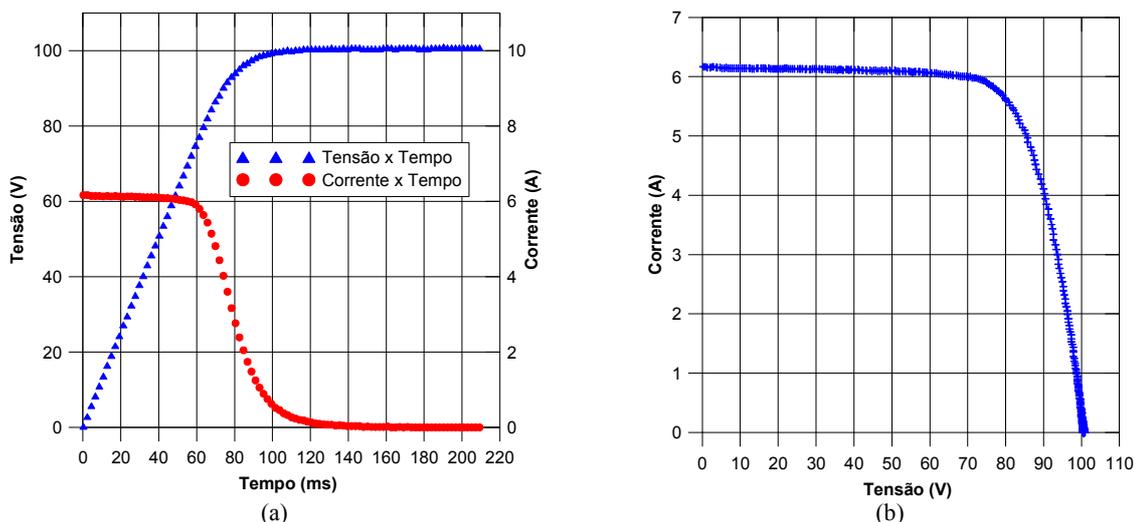


Figura 2: Tensão e corrente em função do tempo para um arranjo polarizado por uma carga capacitiva (a) e sua curva característica (b).

A estimativa do tempo de carga é necessária para a determinação da capacitância utilizada de forma que seja compatível com o tempo de aquisição do sistema de medida. Para completar o sistema de potência, uma etapa intermediária entre a placa Arduino e os IGBTs é necessária para proteção desses componentes e para que a lógica correta de acionamento dos transistores do circuito de chaveamento (Figura 1) ocorra (Oliveira, 2015). O diagrama esquemático do circuito de acionamento dos IGBTs é apresentado na Figura 3.

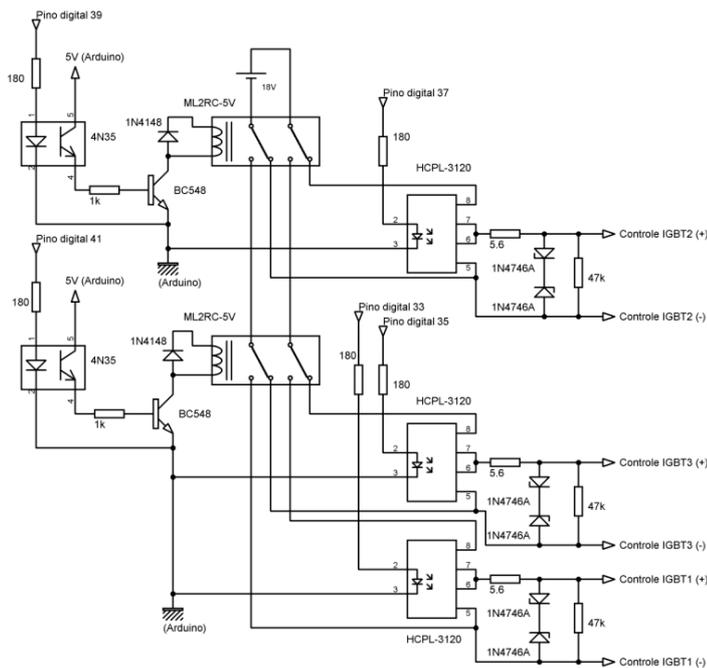


Figura 3: Circuito de acionamento dos IGBTs.

O circuito de acionamento dos IGBTs utiliza relés e optoacopladores. No circuito de chaveamento observa-se que os emissores dos IGBTs não estão conectados em um ponto comum, sendo necessário acioná-los com uma fonte independente. Para contornar este problema, os relés acoplam a fonte de 18 V, composta por duas baterias de 9 V ligadas em série, somente no IGBT que está sendo acionado.

O tempo de carga (t) do capacitor acoplado ao arranjo pode ser aproximado pela Equação 1, onde C é a capacitância.

$$t = \frac{V_{OC}}{I_{SC}} C \quad (1)$$

Sistema de Medição

O sistema de medição contempla as medidas de tensão, corrente, temperatura e irradiância. A medida de tensão é realizada entre os pontos B e C do diagrama da Figura 1 através de um divisor de tensão resistivo exibido na Figura 4.

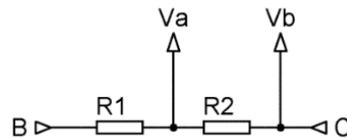


Figura 4: Divisor de tensão resistivo para atenuar a tensão de entrada.

A função do divisor é atenuar a tensão de entrada, vinda do arranjo, em um valor seguro para o conversor analógico-digital (ADC) do controlador lógico programável. Essa atenuação é dada pela Equação 2.

$$A = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

A determinação dos valores de R₁ e R₂ depende do valor da tensão de circuito aberto do gerador fotovoltaico, de forma a limitar a 3,3 V a tensão que chega à entrada analógica do controlador lógico programável. A medida da corrente utiliza um resistor shunt (representado por R_S no circuito da Figura 1), cuja queda de tensão é amplificada 55 vezes através do amplificador de instrumentação apresentado na Figura 5. A amplificação é necessária para que o fundo de escala do resistor shunt (60 mV) seja o mais próximo possível do fundo de escala do conversor AD da placa Arduino.

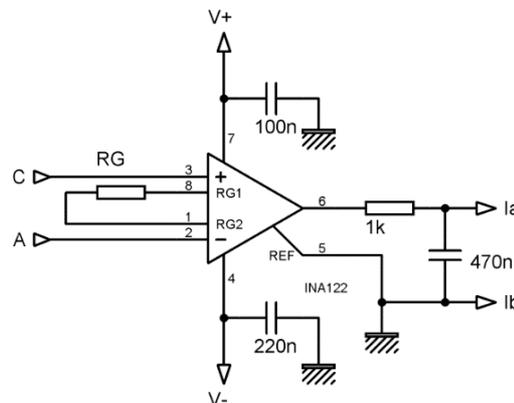


Figura 5: Circuito de amplificação para medida da corrente do arranjo. Os pontos A e C são conectados aos pontos A e C do circuito da Figura 1.

A medida da irradiância é realizada com uma célula de referência calibrada, cuja constante de calibração é igual a 0,0459 mV/(W/m²). Este sinal elétrico é amplificado usando o mesmo circuito da Figura 5, porém com um ganho de 44 vezes. A temperatura da célula é medida utilizando um sensor integrado de temperatura LM35 que fornece um sinal de 10 mV para cada grau celsius de variação de temperatura (10 mV/°C). O sistema fica acomodado em uma maleta de alumínio. As funções são acessadas e selecionadas através de dois botões e exibidas por um *display* de LCD. Os dados obtidos pela varredura são gravados na memória interna da placa Arduino e posteriormente transferidos para um cartão de memória no formato de valores separados por vírgulas (CSV), com dados de tempo, tensão, corrente, temperatura e irradiância.

LEVANTAMENTO DE CURVAS I-V DE UM ARRANJO FOTOVOLTAICO

Para analisar o comportamento do protótipo desenvolvido na medição de curvas I-V, foi montado um arranjo fotovoltaico composto por uma série de 3 módulos da marca Yingli Solar, modelo YL245P-29b, cujas especificações elétricas para

condição de $G=1000 \text{ W/m}^2$, $T_{\text{cel}}=25 \text{ }^\circ\text{C}$ e espectro AM 1,5, estão listadas na **referencia..**

Parâmetro	Valor
P_m	04.04
V_{oc}	51,8 V
I_{sc}	8,63 A
V_{mp}	30,2 V
I_{sc}	8,11 A

Tabela 1: Parâmetros elétricos informados pelo fabricante do módulo YL245P-29b.

A série de módulos foi instalada no terraço do prédio que abriga o simulador solar do LABSOL, conforme mostra a Figura 6. O ponto de conexão do traçador com o arranjo para a medida das curvas I-V foi junto aos módulos a fim de minimizar a queda de tensão nos cabos, uma vez que o traçador usa medida a dois fios.



Figura 6: Instalação da série de módulos usada para testes (3 módulos da fileira inferior) (a) e os mesmos módulos artificialmente sombreados para provocar defeitos na curva característica (b).

O desempenho do traçador de curvas I-V portátil desenvolvido e denominado de protótipo foi analisado a partir de comparação com um dispositivo comercial. O sistema portátil comercial utilizado como referência é o modelo MP-11 IV Checker da *EKO Instruments*, cujas principais características são apresentadas na Tabela 2. É importante destacar que o objetivo não é avaliar o MP-11 IV Checker, mas sim utilizá-lo como equipamento de referência para analisar o desempenho do protótipo de traçador de curvas I-V desenvolvido. Os dois equipamentos são portáteis, uma vez que foram desenvolvidos para medições de arranjos fotovoltaicos em campo. A análise será mediada a partir da comparação entre os dispositivos sob diferentes condições de irradiância e temperatura.

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

Tabela 2: Características técnicas do traçador de curvas I-V comercial.

Todas as curvas I-V levantadas foram determinadas em dias de céu limpo e sem a presença significativa de nebulosidade. Para cada irradiância foram realizadas 10 medições com o protótipo desenvolvido e 10 medições com o MP-11 IV Checker. As medições para cada irradiância foram realizadas de forma alternada com os dois equipamentos. Denomina-se de ensaio para uma irradiância as 10 medições realizadas com cada um dos equipamentos. As curvas I-V foram determinadas para quatro irradiâncias diferentes, sendo que para as irradiâncias 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 irradiância de 730 W/m^2 havia um sombreamento parcial de células dos módulos do arranjo fotovoltaico produzido de maneira artificial conforme mostra a Figura 6 (b).

A Figura 7 apresenta a curva I-V do arranjo fotovoltaico medida a partir do protótipo desenvolvido e do traçador MP-11 para diferentes irradiâncias. Observa-se concordância nas curvas medidas pelos dispositivos sugerindo desempenhos similares na caracterização e obtenção de curvas I-V de arranjos fotovoltaicos a partir de medidas em campo. As curvas medidas se aproximaram para todas as condições de irradiância, inclusive para a situação de sombreamento parcial do arranjo fotovoltaico. Entretanto para garantir a confiabilidade do desempenho do protótipo desenvolvido, é importante uma análise estatística comparativa das curvas I-V medidas.

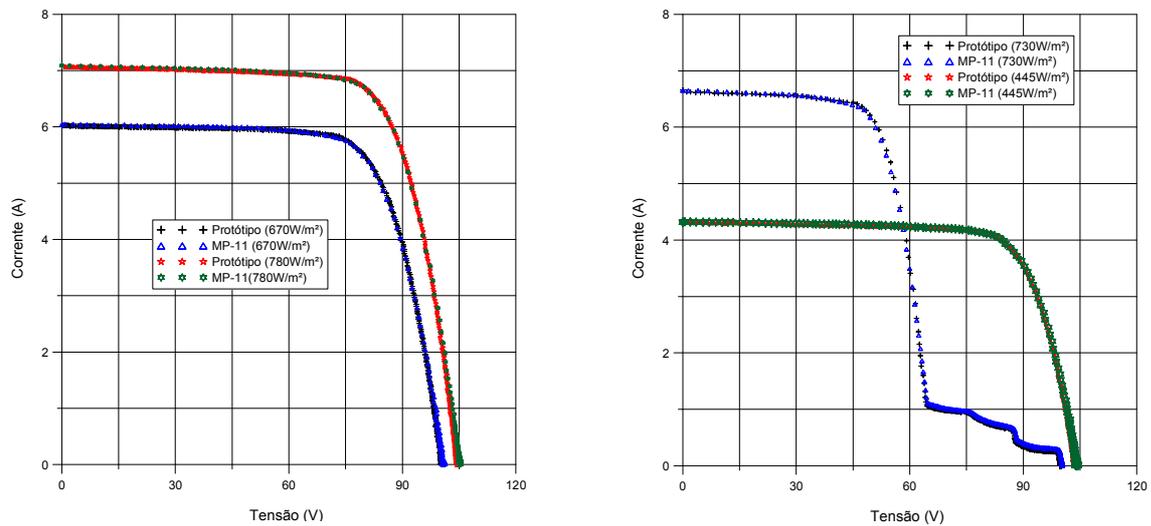


Figura 7: Curva I-V medida a partir do protótipo desenvolvido e do traçador comercial MP-11 em diferentes irradiâncias.

ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

A Figura 8 apresenta o coeficiente de variação de irradiância e temperatura de célula das medições de curvas I-V para cada ensaio de irradiância. O coeficiente de variação de irradiância e de temperatura de célula para cada ensaio foi inferior a 3 %. É importante destacar que cada ensaio compreende uma sequência de 10 medições de curvas I-V.

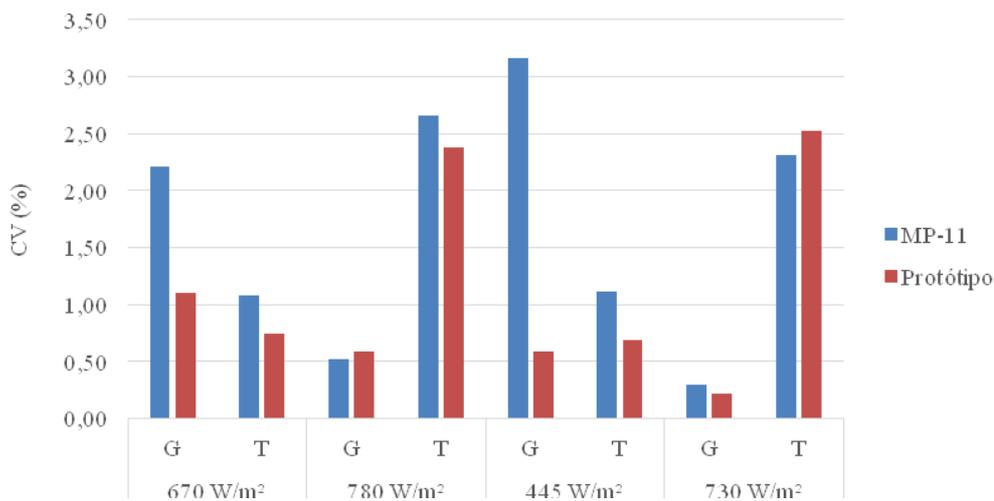


Figura 8: Coeficiente de variação CV de irradiância e temperatura de célula dos dois traçadores.

Em cada ensaio composto por 10 medições em uma dada irradiância, do protótipo desenvolvido e do traçador MP-11, foi realizada uma análise estatística com a determinação da média, desvio padrão e coeficiente de variação dos parâmetros de tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto circuito (I_{sc}) e potência máxima (P_m). Para comparar adequadamente o desempenho dos dispositivos é importante avaliar medidas de posição e medidas de dispersão dos parâmetros avaliados.

A Figura 9 apresenta a distribuição empírica dos dados de potência máxima medida pelos dispositivos, protótipo desenvolvido e traçador MP-11, para cada ensaio de irradiância. A distribuição é formada pelo primeiro e terceiro quartil e pela mediana. A distribuição também apresenta o menor valor não inferior ao limite inferior e o maior valor não superior ao limite superior. Na irradiância de 670 W/m², a mediana e a amplitude de P_m do traçador MP-11 foram, respectivamente, 446,8 W e 15,6 W enquanto que a mediana e a amplitude de P_m do traçador protótipo foram 448,3 W e 15,3 W, respectivamente. Uma comparação similar para irradiância de 780 W/m² apresenta mediana e amplitude de P_m do traçador MP-11 de, respectivamente, 536,6 W e 5,5 W enquanto que mediana e amplitude de P_m do traçador protótipo de 538,1 W e 5,8 W, respectivamente.

Na irradiância de 445 W/m², a mediana e a amplitude de P_m do traçador MP-11 foram, respectivamente, 319,5 W e 32,6 W enquanto que a mediana e a amplitude de P_m do traçador protótipo foram 318,2 W e 29,8 W, respectivamente. Na irradiância de 730 W/m² que apresenta a condição de sombreamento parcial, a mediana e a amplitude de P_m do traçador MP-11 foram, respectivamente, 308,9 W e 6,8 W enquanto que a mediana e a amplitude de P_m do traçador protótipo foram 310,9 W e 6,2W, respectivamente. Os dispositivos, protótipo e traçador MP-11, apresentam medidas de posição e medidas de dispersão, em cada ensaio de irradiância, que evidenciam um comportamento similar na determinação de P_m .

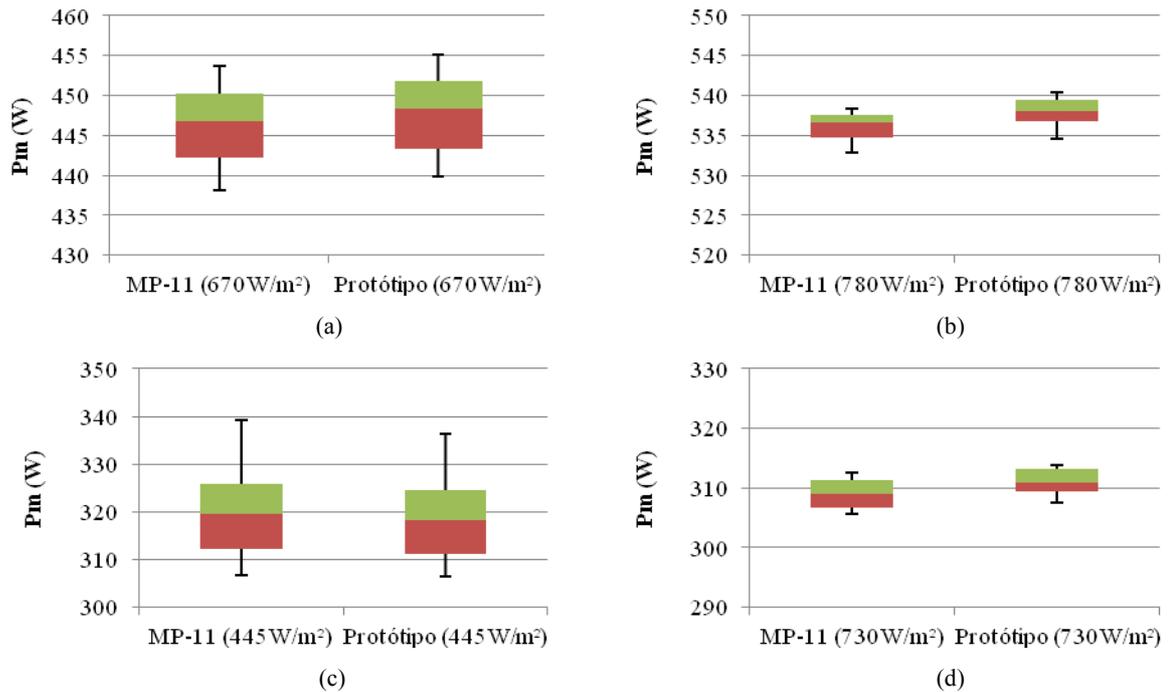


Figura 9: Distribuição empírica da medida de P_m do protótipo desenvolvido e do traçador MP-11 para cada irradiância.

A Figura 10 apresenta a distribuição empírica dos dados de corrente de curto-circuito medida pelos dispositivos para cada ensaio de irradiância. A análise estatística mostra que o desempenho dos dispositivos na determinação de I_{sc} é muito similar.

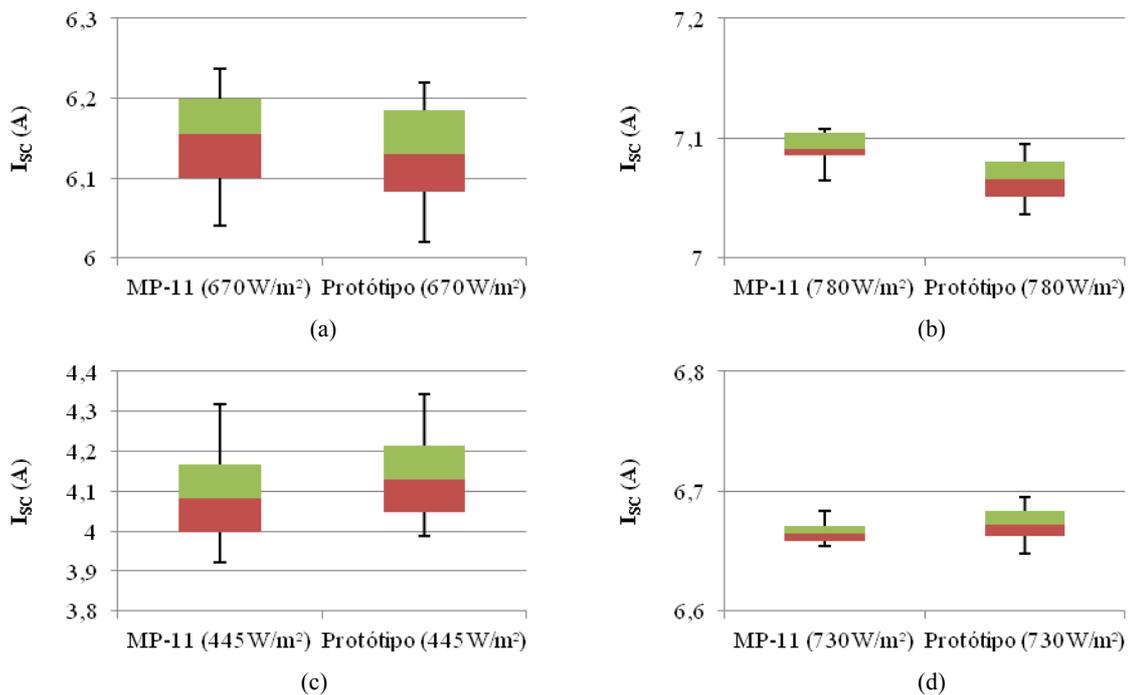


Figura 10: Distribuição empírica da medida de I_{sc} do protótipo desenvolvido e do traçador MP-11 para cada irradiância.

Na irradiância de 670 W/m^2 , a mediana e a amplitude de I_{sc} do traçador MP-11 foram, respectivamente, 6,16 A e 0,2 A enquanto que a mediana e a amplitude de I_{sc} do traçador protótipo foram 6,13 A e 0,2 A, respectivamente. Uma comparação similar para irradiância de 780 W/m^2 apresenta mediana e amplitude de I_{sc} do traçador MP-11 de, respectivamente, 7,09 A e 0,04 A enquanto que mediana e amplitude de I_{sc} do traçador protótipo de 7,07 A e 0,06 A, respectivamente.

Na irradiância de 445 W/m^2 , a mediana e a amplitude de I_{sc} do traçador MP-11 foram, respectivamente, 4,08 A e 0,4 A enquanto que a mediana e a amplitude de I_{sc} do traçador protótipo foram 4,13 A e 0,35 A, respectivamente. Na irradiância de 730 W/m^2 que apresenta a condição de sombreamento parcial, a mediana e a amplitude de I_{sc} do traçador MP-11 foram, respectivamente, 6,66 A e 0,03 A enquanto que a mediana e a amplitude de I_{sc} do traçador protótipo foram 6,67 A e 0,05 A,

respectivamente. Os dispositivos, protótipo e traçador MP-11, apresentam medidas de posição e medidas de dispersão, em cada ensaio de irradiância, que evidenciam um comportamento similar também na determinação de I_{sc} .

A Figura 11 apresenta a distribuição empírica dos dados de tensão de circuito aberto medida pelos dispositivos, protótipo desenvolvido e traçador MP-11, para cada irradiância. A análise estatística mostra que o desempenho dos dispositivos na determinação da tensão de circuito aberto é muito similar. A mediana de V_{oc} nos ensaios de irradiância esteve entre 100 V e 105 V, sendo que para cada irradiância, as medidas de V_{oc} , do protótipo e do traçador MP-11 foram similares. A medida de amplitude esteve entre 0,5 V e 1 V para ambos dispositivos.

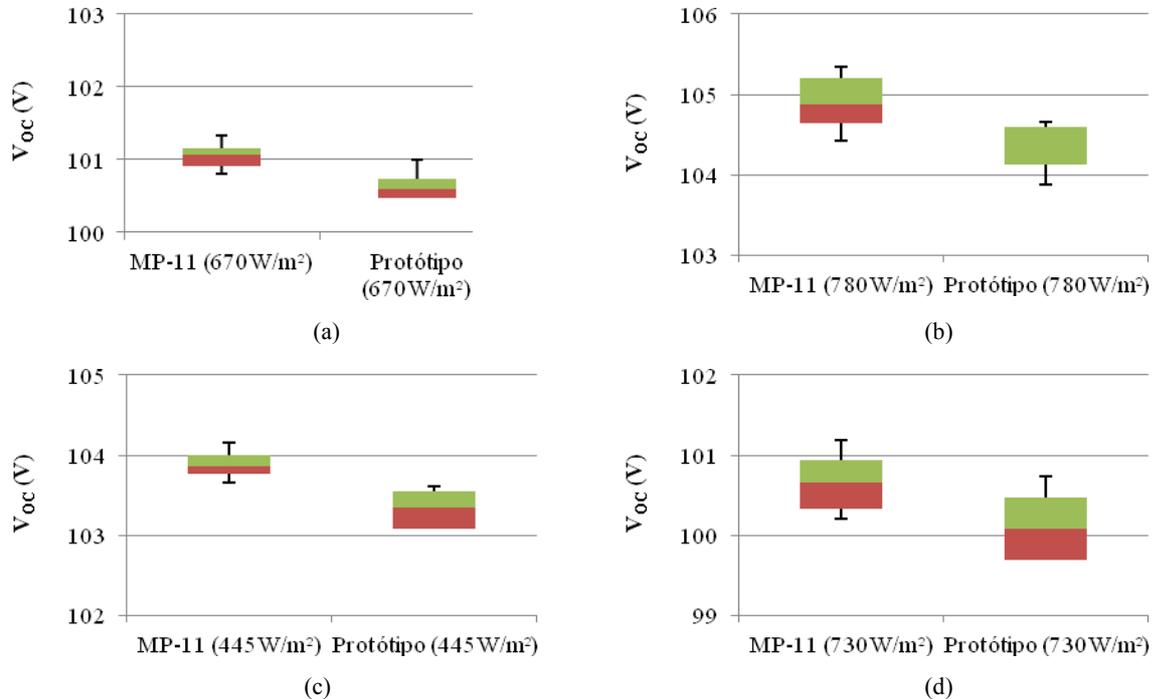


Figura 11: Distribuição empírica da medida de V_{oc} do protótipo desenvolvido e do traçador MP-11 para cada irradiância.

A Figura 12 apresenta o coeficiente de variação de P_m , V_{oc} e I_{sc} em cada ensaio de irradiância para os dispositivos. Observa-se que o coeficiente de variação dos parâmetros, para cada ensaio de irradiância, é muito similar para os dispositivos, protótipo desenvolvido e traçador MP-11.

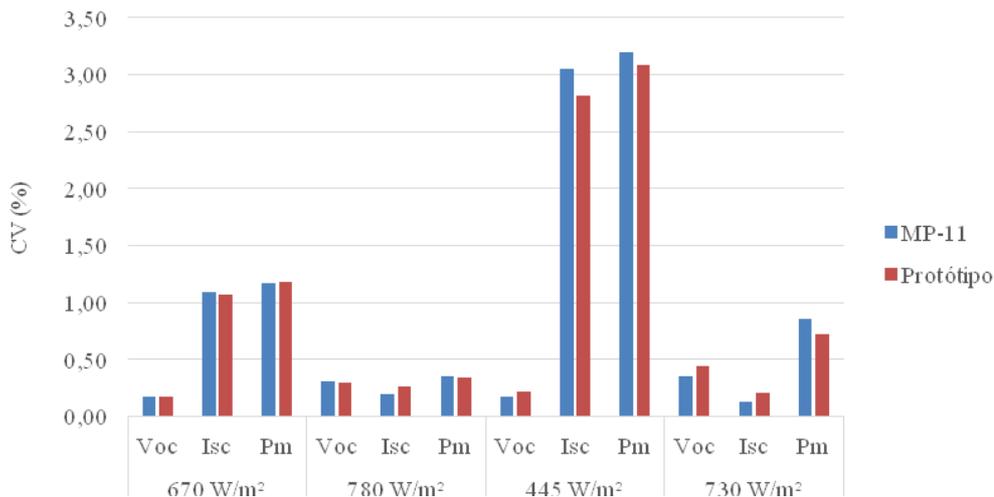


Figura 12: Coeficiente de variação de P_m , V_{oc} e I_{sc} do protótipo desenvolvido e do traçador MP-11 para cada irradiância.

A partir da análise estatística foi possível comprovar que o desempenho dos dispositivos, protótipo desenvolvido e traçador MP-11 é muito similar na determinação dos principais parâmetros elétricos do arranjo fotovoltaico: tensão de circuito aberto, corrente de curto circuito e potência máxima. A média dos parâmetros elétricos de cada ensaio de irradiância com 10 medidas para o protótipo desenvolvido e para o traçador MP-11 é apresentada na Tabela 3. Observa-se que as médias dos parâmetros elétricos do arranjo fotovoltaico são similares para ambos dispositivos.

Irradiância	Traçador I-V	V_{oc}	I_{sc}	P_m	FF
670 W/m ²	MP-11	101,05	6,15	446,42	0,72
	Protótipo	100,63	6,13	447,92	0,73
780 W/m ²	MP-11	104,91	7,09	536,09	0,72
	Protótipo	104,27	7,07	538,04	0,73
445 W/m ²	MP-11	103,89	4,09	320,05	0,75
	Protótipo	103,32	4,14	318,96	0,75
730 W/m ²	MP-11	100,65	6,67	308,99	0,46
	Protótipo	100,13	6,67	311,04	0,47

Tabela 3: Média de cada ensaio de irradiância do protótipo desenvolvido e do traçador MP-11.

O erro padrão para cada ensaio de irradiância do protótipo desenvolvido e traçador MP-11 também foi determinado, sendo utilizado um nível de confiança de 95 %. A Figura 13 apresenta o erro padrão na medida da potência máxima para cada ensaio de irradiância dos dispositivos. Observa-se que para cada ensaio de irradiância, o erro padrão na medida da potência máxima realizada pelos dispositivos é muito similar.

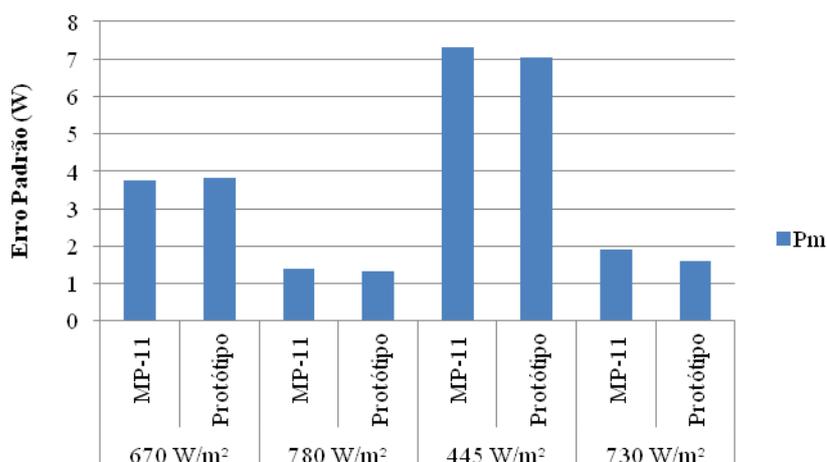


Figura 13: Erro padrão de P_m para cada ensaio de irradiância.

A Figura 14 apresenta o erro padrão na medida da tensão de circuito aberto e da corrente de curto circuito para cada ensaio de irradiância dos dispositivos. Observa-se que para cada ensaio de irradiância, o erro padrão na medida de V_{oc} e I_{sc} realizada pelos dispositivos é muito similar.

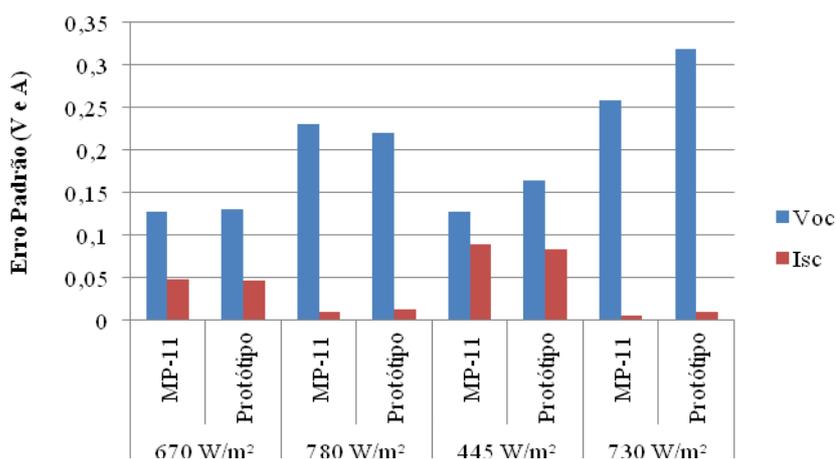


Figura 14 – Erro padrão de V_{oc} e I_{sc} para cada ensaio de irradiância.

CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento e análise de desempenho de um traçador de curvas I-V portátil para aplicação em arranjos fotovoltaicos a serem medidos em campo. O protótipo desenvolvido utilizou uma carga capacitiva como método de polarização do gerador fotovoltaico sendo o chaveamento realizado por transistores bipolares de porta

isolada (IGBT). Para controle do chaveamento dos IGBTs e aquisição dos pontos I-V, a placa Arduino foi aplicada demonstrando-se adequada para a proposta. O protótipo construído foi aplicado no levantamento da curva I-V de um gerador fotovoltaico composto de uma série de 3 módulos instalada no terraço do prédio que abriga o simulador solar do Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LABSOL/UFRGS). O desempenho do traçador de curvas I-V portátil desenvolvido e denominado de protótipo foi analisado a partir de comparação com um dispositivo comercialmente disponível. O dispositivo utilizado como referência foi o modelo MP-11 IV Checker da *EKO Instruments*. Os dois equipamentos são portáteis, uma vez que foram desenvolvidos para medições de arranjos fotovoltaicos em campo. A análise foi realizada a partir da comparação entre os dispositivos sob diferentes condições de irradiância e temperatura. Todas as curvas I-V levantadas foram determinadas em dias de céu limpo e sem a presença significativa de nebulosidade. Para cada irradiância foram realizadas 10 medições com o protótipo desenvolvido e 10 medições com o dispositivo MP-11. As medições para cada irradiância foram realizadas de forma alternada com os dois equipamentos. As curvas I-V foram determinadas para quatro irradiâncias diferentes, sendo que para as irradiâncias de 670 W/m², 780 W/m² e 445 W/m² o arranjo fotovoltaico estava em condições normais sem sombreamento enquanto que para a irradiância de 730 W/m², havia um sombreamento parcial de células dos módulos do arranjo fotovoltaico produzido de maneira artificial. O resultado, de maneira geral, foi satisfatório e pode-se afirmar que o protótipo se mostrou adequado para aplicação em medidas em campo de curvas I-V de arranjos fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABINEE, Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. **Proposta para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. Grupo Setorial de Sistemas Fotovoltaicos. 2012.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº482**. 2012.
- Arduino. **Arduino Due**. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDue>> . Acesso em: 02 março 2015.
- BREYER, C.; GERLACH, A. **Global overview on grid-parity**. Progress in Photovoltaics: Research and applications. 2013. Vol. 21; pp. 121-136.
- BÜHLER, Alexandre José. **Estudo de técnicas de determinação experimental e pós-processamento de curvas características de módulos fotovoltaicos**. 2011. 195 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- GASPARIN, Fabiano Perin. **Desenvolvimento de um traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos**. 2009. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Programa Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- INMETRO. Instituto Nacional De Metrologia, Normalização E Qualidade Industrial. **INMETRO 004/2011**: Requisitos de avaliação da conformidade para sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica (módulo, controlador de carga, inversor e bateria). Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, 2011. 49 p.
- International Electro-Technical Commission. Standard IEC 60904-1: Photovoltaic Devices: **Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics**, 2006.
- International Rectifier. **Insulated Gate Bipolar Transistor With Ultrafast Soft Recovery Diode IRG4PH40UD Data Sheet**. Kansas, 2006. Disponível em: <<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irg4ph40ud.pdf>>. Acesso em: 02 março 2015.
- KRENZINGER, Arno; ZILLES, Roberto. **Fotovoltaica en Brasil: Potencial, Mercado y Políticas Públicas**. XV Congreso Ibérico y X Congreso Iberoamericano de Energia Solar. Vigo, Galicia, Espanha. 2012.
- OLIVEIRA, Fernando Schuck de. **Desenvolvimento de Traçador de Curvas I-V Portátil para Arranjos Fotovoltaicos**. 2015. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Programa Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- Vishay Semiconductors. **Insulated Gate Bipolar Transistor GT100DA120U Data Sheet**. Selb, 2012. Disponível em: <<http://www.test.vishay.com/docs/93196/gt100da1.pdf>>. Acesso em: 02 março 2015.

ABSTRACT

This work presents the development and performance analysis of an I-V tracer for field measurements of photovoltaic (PV) arrays. The system uses a capacitive load as a polarization method for the PV generator and the switching is performed electronically by insulated gate bipolar transistors (IGBT). An Arduino board was used to control the switching of the IGBT's and for acquisition of the IV curve, being adequate for this purpose. The control program was written in a variation of C++ language. Auxiliary circuits to amplify the signal were built to measure the electric current and the solar irradiance using a shunt resistor and a calibrated reference solar cell as sensors, respectively. The temperature is measured by a LM35 temperature sensor with satisfactory results. The data acquired by the Arduino board are saved on a memory stick for later analysis. The assembled prototype was applied to measure the I-V curve of a photovoltaic generator composed by a string of 3 PV modules installed on the roof of one building at the facilities of the Solar Energy Laboratory at Federal University of Rio Grande do Sul (LABSOL). The I-V curves measured by the prototype were compared to I-V curves measured by an I-V tracer commercially available. The prototype has shown accurate and adequate for field measurement of photovoltaic arrays.

Keywords: Photovoltaic Systems, IV Curve Tracer, Capacitive Load.