

DESENVOLVIMENTO DE TRAÇADOR DE CURVA I-V PORTÁTIL PARA CARACTERIZAÇÃO DE ARRANJOS FOTOVOLTAICOS ATÉ 400V E 10A

Rafael Kotchetkoff Carneiro – rafael.k.carneiro@gmail.com rafael.carneiro@solsticioenergia.com

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – FEEC

Solstício Energia Projetos e Engenharia LTDA

Talles Viana Vargas – talles.viana1@gmail.com

José Antenor Pomilio – antenor@fee.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC

Resumo. Devido ao crescimento expressivo no número de instalações fotovoltaicas no Brasil, tem-se a necessidade de equipamentos que realizem diagnósticos e auxiliem nas atividades de operação e manutenção (O&M) desses geradores. Este artigo descreve o desenvolvimento de um traçador de curva I-V portátil, para arranjos fotovoltaicos com tensões de circuito aberto até 400V e correntes de curto-circuito até 10A. Foi desenvolvido um protótipo utilizando controle por Arduino Mega e com o projeto e construção do circuito de chaveamento e de potência utilizando carga capacitiva e chaves MOSFET. A aplicação visada é a caracterização, comissionamento através da ABNT NBR 16274/2014 e diagnóstico de arranjos fotovoltaicos de baixa escala, através de um equipamento nacional facilmente implementável, evitando assim os altos custos com os quais equipamentos semelhantes chegam ao Brasil e possibilitando que a setor solar nacional tenha capacidade de execução de sistemas fotovoltaicos com qualidade e que possibilite as atividades de O&M.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Traçador de Curva I-V, Eletrônica de Potência para Energias Renováveis

1. INTRODUÇÃO

1.1. As energias alternativas no Brasil

No Brasil, em 2012, entrou em vigor o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, estabelecendo as regras de mercado para geração distribuída de fontes alternativas, principalmente referentes à energia solar fotovoltaica e à eólica (ANEEL, 2012).

A partir de então se tornou possível instalar um sistema fotovoltaico em prédios e casas ligadas à rede elétrica, o que garante o maior tempo possível de fornecimento de energia, ao mesmo tempo em que a própria energia é gerada de forma mais barata.

Ocorreu um grande crescimento na capacidade instalada em energia fotovoltaica, passando de zero para 21MW no período 2014-2015, assim como na energia eólica e demais fontes renováveis (Tolmasquim, p.279).

Tabela 1 - Potência instalada em 02/02/2018 por setor de instalação (elaboração própria baseado no BIG ANEEL, 2018)

Tipo	Quantidade	Potência Fiscalizada (kW)	%
Hidrelétrica	1306	101.059.155	63,96
Térmica	3.005	41.544.887	26,29
Eólica	508	12.445.843	7,88
Nuclear	2	1.990.000	1,26
Fotovoltaica	82	965.325	0,61
Total	4.904	158.005.260	100

A energia solar é fonte direta e indireta de quase todas as outras formas de energia encontradas na natureza que o ser humano utiliza para geração de energia elétrica. A energia solar fotovoltaica se baseia na transformação direta da radiação solar em energia elétrica, mas fontes de energia térmica, hidráulica, eólica, biomassa, maremotriz entre outras são oriundas indiretamente da energia solar.

1.2. Requisitos técnicos para garantia de longevidade de sistemas fotovoltaicos

Este crescimento do setor de energia solar fotovoltaica, no contexto brasileiro e no contexto mundial, exige um acompanhamento técnico, que garanta a qualidade das instalações e que garanta sua vida útil prolongada.

Assim, a curva I-V (curva de corrente vs. tensão) característica de cada painel e de cada arranjo fotovoltaico é uma das maiores fornecedoras de informações valiosas para gerenciamento, operação e manutenção (O&M) de sistemas fotovoltaicos (Oliveira, 2015), tanto em escala residencial quanto em escala de usinas.

Além disso, a caracterização destes arranjos é essencial para se garantir um índice de produtividade e de desempenho (*performance ratio*) compatível com o proposto em projeto, os quais influenciam as decisões de investimento e de operação técnica.

Além disso, o comissionamento de sistemas fotovoltaicos é previsto na norma ABNT NBR 16274/2014 (Sistemas fotovoltaicos conectados à rede - Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho). Na categoria II destes testes de comissionamento normativos é prevista a tomada de curvas I-V para garantia da instalação correta do sistema conforme projeto inicial (ABNT, 2014).

1.3. Curvas típicas de módulos fotovoltaicos comerciais

Uma família típica de curvas I-V presente no *datasheet* de módulos fotovoltaicos pode ser vista na Fig. 1, extraída de módulos do fabricante ReneSola.

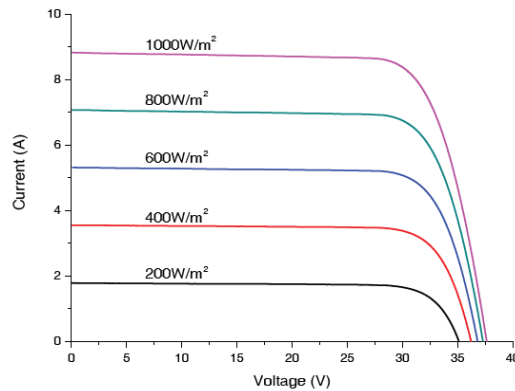


Figura 1 - Curvas I-V de módulos fotovoltaicos ReneSola JC260M-24/BBS (ReneSola)

O eixo Y indica a corrente em Ampère. O cruzamento da curva no eixo Y é um dos parâmetros mais importantes de um painel fotovoltaico, a chamada corrente de curto-circuito, a I_{sc} . O eixo X das tensões (em Volt) indica a existência de uma tensão de circuito aberto V_{oc} dos módulos FV, outro parâmetro igualmente importante.

Notar que a curva de potência *versus* tensão de um módulo fotovoltaico é obtida multiplicando-se a corrente pela tensão no gráfico, dando origem ao gráfico da potência do painel fotovoltaico conforme Fig. 2.

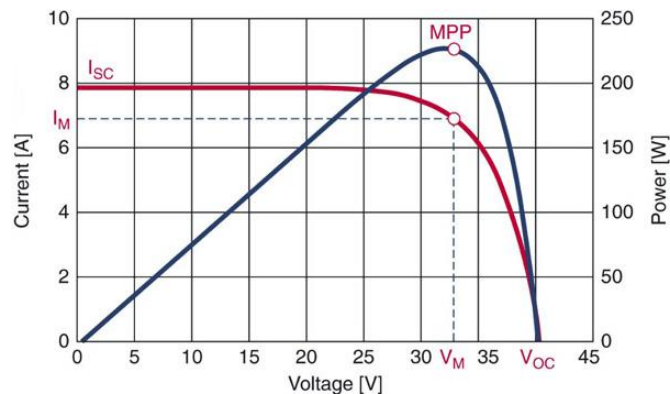


Figura 2 - Curva I-V de um módulo fotovoltaico sobreposta por uma curva típica de potência vs. tensão (Digikey, 2013)

É possível notar a existência do ponto de máxima potência (*mpp*, na sigla em inglês), que é constantemente rastreado pelo rastreador de *mpp*, o MPPT (*maximum power point tracker*, na sigla em inglês), que otimiza a geração do sistema fotovoltaico em cada circunstância ambiental. Este ponto de máxima potência possui um par de valores I-V, chamado de V_{mp} e I_{mp} , usados para caracterizar os painéis fotovoltaicos e que servem como padrão de operação nominal para cálculos.

Os valores de V_{mp} e I_{mp} são variáveis de acordo com as condições de irradiação, temperatura e espectro de frequências incidente no painel. Para parâmetro comparativo, utilizam-se principalmente dois modos diferentes de condições climáticas, os valores STC (*Standard Test Conditions*) e os valores NOCT (*Normal Operating Cell Temperature*). A Tab. 2 exemplifica estes valores.

Tabela 2 - Características elétricas de painéis ReneSola JC250/255/260M-24/BB (ReneSola)

Electrical Characteristics STC	JC250M-24/Bb	JC255M-24/Bb	JC260M-24/Bb
Maximum Power (Pmax)	250 W	255 W	260 W
Power Tolerance	0 ~ +5W	0 ~ +5W	0 ~ +5W
Module Efficiency	15.4%	15.7%	16.0%
Maximum Power Current (Imp)	8.31 A	8.39 A	8.53 A
Maximum Power Voltage (Vmp)	30.1 V	30.4 V	30.5 V
Short Circuit Current (Isc)	8.83 A	8.86 A	8.95 A
Open Circuit Voltage (Voc)	37.4 V	37.5 V	37.6 V
Values at Standard Test Conditions STC (AM1.5, Irradiance 1000W/m ² , Cell Temperature 25°C)			

Electrical Characteristics NOCT	JC250M-24/Bb	JC255M-24/Bb	JC260M-24/Bb
Maximum Power (Pmax)	185 W	189 W	193 W
Maximum Power Current (Imp)	6.57 A	6.63 A	6.74 A
Maximum Power Voltage (Vmp)	28.2 V	28.5 V	28.6 V
Short Circuit Current (Isc)	7.12 A	7.20 A	7.27 A
Open Circuit Voltage (Voc)	35.0 V	35.1 V	35.2 V
Values at Normal Operating Cell Temperature, Irradiance of 800 W/m ² , AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s			

Um ponto interessante relacionado aos módulos fotovoltaicos é relativo à sua fabricação um tanto quanto incerta; usualmente fabricam-se módulos não tendo uma potência em W_p (baseada na STC) específica em mente, mas sim tendo uma faixa de W_p possíveis saindo de fábrica.

Por exemplo, fabricam-se painéis na faixa de 250W_p e 260W_p. Testam-se todos os painéis aplicando a STC e se separam os módulos com potência nominal de 250W_p, 255W_p e 260W_p, cada um com uma tolerância de +5W_p e -0W_p. Isto pode ser observado na Tab. 2.

Para se identificar possíveis erros no despacho de lotes de painéis dos fabricantes para uma usina solar, por exemplo, pode-se utilizar o traçador de curva I-V, que conseguirá a curva característica dos painéis testados e sua análise indicará se os mesmos se encontram dentro da tolerância especificada.

2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Desenvolver um protótipo portátil de caracterizador de arranjos fotovoltaicos para arranjos com características elétricas de até 10 A e 400 V, consistindo de:
 - Uso de carga capacitiva;
 - Sistema de chaveamento utilizando MOSFET's de potência e controle digital via plataforma Arduino;
 - Circuitos de medição e aquisição de dados de tensão e corrente usando plataforma Arduino, através de pontes resistivas e sensor Hall de corrente;
 - Construção de placa de circuito impresso (PCB, na sigla em inglês) para o módulo de comando e interface entre Arduino e sistema de potência;
 - Construção de circuito de potência utilizando resistores de alta potência e esquemas de proteção;
 - Alimentação portátil utilizando-se baterias, sem a necessidade de fontes externas de bancada.

Os objetivos foram tomados usando como princípio os trabalhos feitos por (Oliveira, 2015), e por (Muñoz et al., 2006), com propostas de modificação.

3. METODOLOGIA DE EXPERIMENTAÇÃO E CONSTRUÇÃO

Para a tomada de curvas características I-V de módulos e arranjos fotovoltaicos, existem diversas metodologias sendo a mais simples baseada no uso de carga resistiva variável, conectada diretamente aos terminais do arranjo fotovoltaico a ser estudado, conforme a circuito esquemático na Fig. 3.

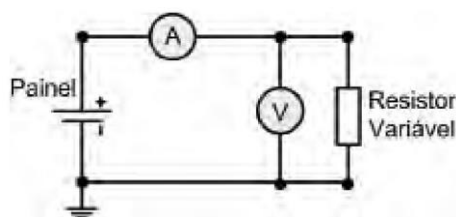


Figura 3 - Circuito geral de um traçador de curva I-V simples (Rogowski, 2010)

Mede-se a corrente e a tensão da célula ou do módulo fotovoltaico, enquanto varia-se a resistência de um valor extremamente baixo até um valor extremamente alto, obtendo os valores de corrente de curto-circuito (I_{sc}) até o valor de tensão de circuito aberto (V_{oc}) da célula ou do módulo referência. Este método com carga resistiva é limitado para arranjos de baixa potência, baixa tensão e baixa corrente.

Neste protótipo, utilizou-se carga capacitiva para o traçador de curva I-V, conforme Fig. 4. A carga capacitiva possibilita trabalhar com tensões e correntes mais elevadas, além de oferecer minimização de custos e facilidade de disponibilidade dos materiais em relações às outras sugestões de carga.

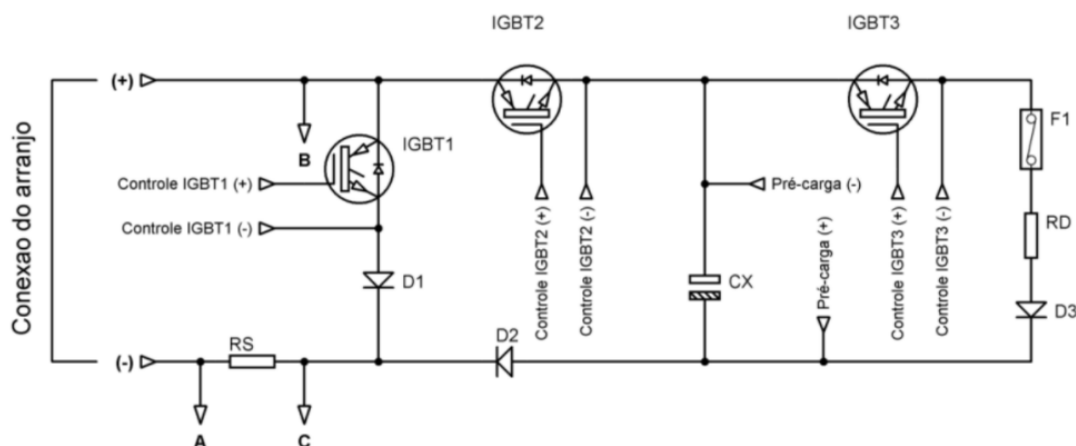


Figura 4 - Circuito para uso de carga capacitiva, usando chaves IGBT para, na ordem 1- obter a corrente de curto-circuito (I_{sc}); 2 - Conectar o arranjo à carga capacitiva; 3 - Descarregar o capacitor (Oliveira, 2015)

3.1. Do ajuste dos valores da curva IV

Os valores de tensão e corrente são obtidos em uma dada condição de temperatura de célula (T_c , em $^{\circ}C$) e de irradiância solar no plano do painel (TSI in the plan of array em W/m^2 , por exemplo) nos momentos das medidas, que idealmente devem ser constantes nos momentos dos testes. Após a aquisição dos pares I-V e da montagem da curva, é possível remontar a curva I-V do painel testado para a STC, para comparações com a curva disponibilizada em datasheet.

Para isso, é necessário realizar uma normalização dos pares I-V obtidos, usando-se os valores de T_c e de irradiância medidos, e assumindo que o espectro solar medido é o mesmo que o considerado em STC, para massa de ar de AM1.5.

3.2. Circuito proposto, proteções e dimensionamento

Devido a questões de custo e disponibilidade de componentes, facilidade de trabalho e implementação prática, montagem manual de protótipo e considerações de qualidade dos componentes, foi proposto um circuito eletrônico de chaveamento e um circuito de potência com as seguintes características:

- MOSFET IRFP460;
- Sensor Hall para medição de corrente;
- Ponte resistiva para medição de tensão;
- Circuitos de carga, descarga e pré-carga da carga capacitiva, com as devidas proteções;
- Circuito de comando de chaveamento, com as devidas proteções, baseado em Arduino;
- Arduino Mega 2560.

Construíram-se dois circuitos separados, um para o chaveamento e um para os componentes de potência. O circuito de chaveamento foi ligado diretamente ao Arduino com as proteções necessárias para evitar a queima das portas do microcontrolador, como optoacopladores para acionamento dos relés e optoacopladores para acionamento dos MOSFET's.

O circuito de potência possui a carga capacitiva, circuito de pré-carga, circuito de descarga, circuito de ligação ao arranjo fotovoltaico e sensores de tensão e corrente para aquisição de dados. Todos os circuitos possuem diodos, fusíveis e resistores de proteção, dimensionados para operarem nos parâmetros nominais do traçador proposto.

3.3. Softwares utilizados

Para o desenho da placa de circuito impresso, foi utilizado o Altium 17.0. Para a programação em Arduino foi utilizado o Arduino IDE.

3.4. Detalhamento do circuito de chaveamento

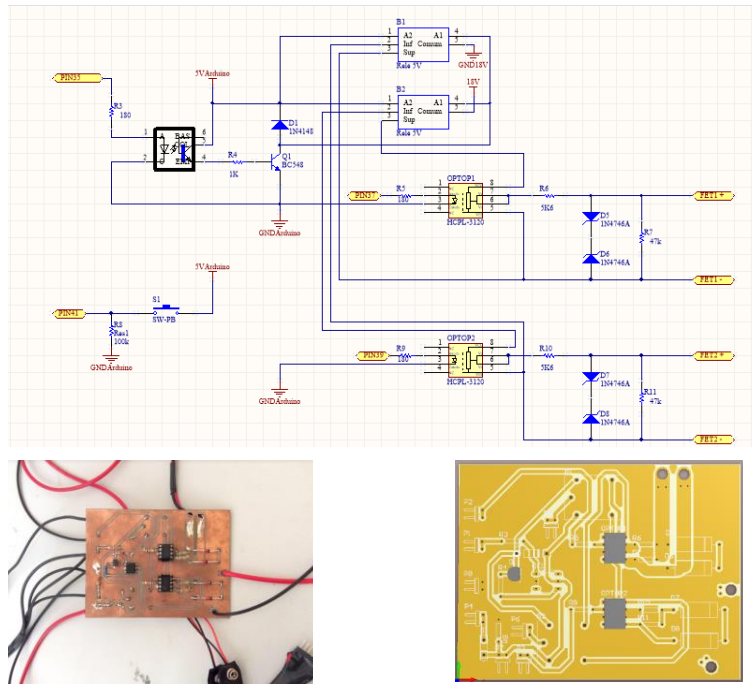


Figura 5 – a) Circuito de chaveamento e acionamento dos MOSFET’s a partir de um Arduino MEGA 2560; b) Circuito físico (*layout*) em desenho Altium e; c) o circuito impresso implementado, com os relés na parte inferior (não visível)

O circuito de chaveamento possui:

- Optoacoplador para acionamento dos relés, através de transistor NPN e diodo de proteção;
- Relés para selecionar a alimentação 18 V dos optoacopladores de potência HCPL3120, fazendo com que os MOSFET’s 1 e 2 nunca sejam simultaneamente acionados;
- Optoacopladores de potência para comando dos MOSFET’s;
- Diodos Zener para estabilização de tensão;
- Botão para acionar o modo de traçagem.

Houve dimensionamento e seleção de resistores de tamanho razoável a depender de suas funções.

3.5. Detalhamento do circuito de potência

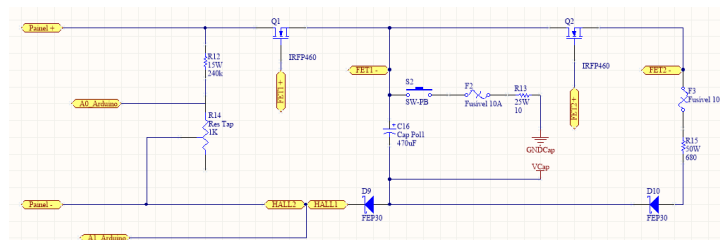


Figura 6 - Esquemático do circuito de potência, baseado em trabalho realizado (Oliveira, 2015), adaptado para uso de MOSFET’s e sensor Hall, além de não existir a chave para uso de medição única de curto circuito.

O circuito de potência possui:

- Carga capacitiva de 470 µF e 450 V de isolamento;
- Circuito de descarga do capacitor, com diodos de potência FEP30 para proteção, resistor de 680 Ω / 50 W, fusível de proteção de sobrecorrente e MOSFET IRFP460 para chaveamento e seleção do circuito;
- Circuito de carga reversa (pré-carga) no capacitor, para garantir que o ponto 0 V (e corrente de curto-circuito) do painel seja lido, contendo resistor de 10 Ω e 25 W, botão para acionamento da pré-carga e fusível de proteção de sobrecorrente;
- MOSFET IRFP460 para chaveamento e seleção da conexão dos painéis à carga capacitiva, fazendo as leituras necessárias;
- Ponte resistiva para leitura de tensão, com resistor de potência de alta resistência (2x 120 kΩ e 15 W) e trimpot 20 kΩ de 20 volts;

- Sensor Hall ACS712 de 30A, para leitura de corrente.

3.6. Condições de Teste

As condições ambientais e locais de teste, além das informações técnicas dos módulos testados estão apresentadas na Tab. 3.

Tabela 3 – Condições ambientais e locais de teste, com detalhamento técnico do módulo estudado

Fabricante e Modelo do Módulo Fotovoltaico	TECNOMETAL - SV240020	
Potência (Wp, no STC)	240 Wp	
Voc (V)	36 V	
Isc (A)	8,53 A	
Vmp (V)	30 V	
Imp (A)	8,04 A	
Cortesia de empréstimo	Solstício Energia Projetos e Engenharia LTDA	
Azimute	40°	
Inclinação dos painéis	3°	
Local dos testes	22°49'18.20"S 47°03'54"O	
Data e horário dos testes	31/05/2017, das 11h30 às 12h00	
Condição de tempo	Céu aberto, com sol pleno à disposição	
Módulo 1	Insolação total	
Módulo 1	Sombreamento parcial	
Módulos 1 e 2	Insolação quase-total	
Módulos 1 e 2	Sombreamento completo no painel 1	



4. RESULTADOS E ANÁLISES

Para os testes realizados com insolação total e sombreamento parcial de um módulo fotovoltaico foram obtidas as curvas I-V e calculados, a partir destas curvas, os pares P-V, disponibilizados na Fig. 7.

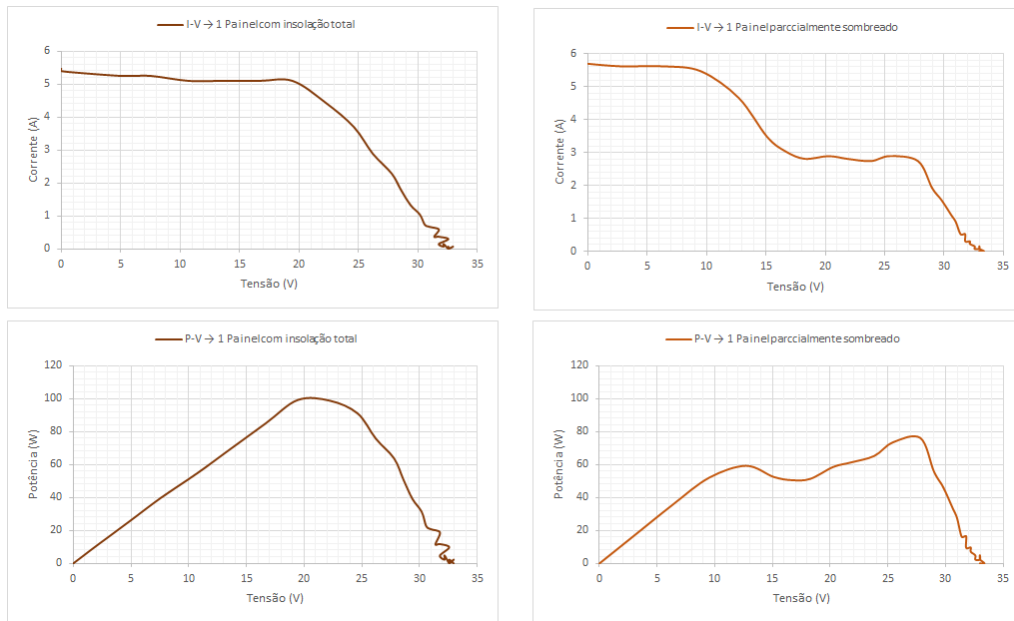


Figura 7 - Comparativo das curvas I-V e P-V de painel 1 com insolação total e painel 1 parcialmente sombreado

É possível observar então o funcionamento pleno do módulo fotovoltaico com a insolação total possível, além de observar a atuação dos diodos de *bypass* na situação com sombreamento parcial.

Notar que a potência máxima observada no módulo fotovoltaico de 240Wp foi de 100W, devido às condições do teste serem diferentes das condições padrão de teste (*STC*, na abreviação em inglês), de insolação de 1000W/m², espectro solar de AM 1.5 e temperatura de célula de 25°C. Para comparação dos valores obtidos no teste com os valores nominais do módulo fotovoltaico, seria necessária a normalização da curva I-V para as condições *STC*, que não foi realizada devido à falta de equipamentos próprios para este fim.

A Fig. 8 ilustra a ligação usual dos diodos de *bypass* em módulos fotovoltaicos, feitas para minimizarem o efeito de sombras nas *strings* fotovoltaicas. Nesta figura é exemplificada a ligação de um módulo de 72 células.

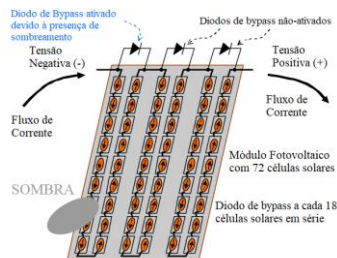


Figura 8 - Imagem ilustrativa de painel solar com 72 células fotovoltaicas, mostrando a atuação de um diodo de *bypass* numa *string* de células sob sombra parcial (tradução própria, baseada em EUREMS)

Assim, não só a área da sombra é um fator importante em arranjos fotovoltaicos, mas também seu formato, que pode ou não atuar diodos específicos a depender das células fotovoltaicas sombreadas.

4.1. Análise de perdas em arranjos fotovoltaicos

É possível analisar as perdas em um arranjo fotovoltaico através da análise de sua curva I-V observando-se cinco principais parâmetros afetados, de acordo com as fontes de perda. A Fig. 9 resume as perdas possíveis.

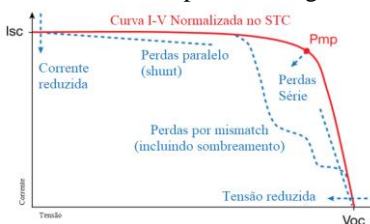


Figura 9 - Resumo gráfico das interpretações de distorção na curva I-V (tradução própria, baseada em Hernday, 2011)

Observa-se assim, um erro sistemático das curvas obtidas, pois todas apresentam uma alta inclinação na descida, apresentando altas perdas série. Essas perdas podem ser explicadas principalmente devido à montagem experimental, no que as conexões entre os painéis e o traçador eram feitas através de uma extensão com pontas MC4 (conexão ao painel) e nua com terminal jacaré (conexão ao traçador).

Além das perdas série relativamente altas, foram observadas distorções nas curvas, originadas por erros de leitura de corrente provenientes do sensor de efeito Hall utilizado e proposto como substituto do sensor INA (Oliveira, 2015).

5. CONCLUSÕES

O trabalho realizado mostrou a viabilidade da construção e operação de um traçador de curvas I-V portátil, mesmo que este protótipo não apresente as características de um produto comercial. Foi realizada a implementação de um protótipo com resultados razoáveis, que deverão melhorar com a futura substituição dos sensores e demais melhorias.

As duas maiores problemáticas no protótipo final foram a alta resistência série e a distorção do sinal em baixas correntes. A primeira se deve a uma má conexão do cabeamento de potência, enquanto a segunda se deve à uma sensibilidade insatisfatória do sensor de corrente Hall ACS712 de 30 A para uso integrado com Arduino.

A alta resistência série deve ser corrigida através do uso de conectores apropriados, enquanto a distorção da leitura da corrente deve ser corrigida através da substituição do sensor de corrente por um mais adequado. Estes problemas do protótipo impedem seu uso em nível de produto comercial, mas demonstram a viabilidade do desenvolvimento nacional de equipamentos do tipo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Solstício Energia Projetos e Engenharia LTDA pelo apoio institucional e pelo fornecimento dos módulos fotovoltaicos e demais materiais elétricos utilizados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Arduino. 2011. “Arduino Mega 2560 Specifications.” : 2560.
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Arduino+MEGA+2560#0>.
- Blake, Carl, and Chris Bull. 1970. “IGBT or MOSFET : Choose Wisely.” *International Rectifier*.
<http://www.irf.com/technical-info/whitepaper/choosewisely.pdf>.
- Gasparin, Fabiano Perin. 2009. “DESENVOLVIMENTO DE UM TRAÇADOR DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.” Tese de Mestrado, UFRGS.
- Hernday, Paul. 2011. “Field Applications for I-V Curve Tracers.” *SolarPro* (4.5): 1–19.
http://solarprofessional.com/articles/design-installation/field-applications-for-i-v-curve-tracers?v=disable_pagination.
- Moretón, Rodrigo, Eduardo Lorenzo, and Javier Muñoz. 2015. “A 500-kW PV Generator I–V Curve.” *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 15(February 2013): 659–76. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.2401>.
- Muñoz, Javier, and Eduardo Lorenzo. 2006. “Capacitive Load Based on IGBTs for on-Site Characterization of PV Arrays.” *Solar Energy* 80(11): 1489–97.
- Oliveira, Fernando Schuck de. 2015. “DESENVOLVIMENTO DE TRAÇADOR DE CURVAS I-V PORTÁTIL PARA ARRANJOS FOTOVOLTAICOS.” Tese de Mestrado, UFRGS.
- ReneSola. 2005. “Virtus ® II Module Datasheet.”
- Rogowski, Bernardo. 2010. “Desenvolvimento de Um Traçador de Curvas V X I Para Painéis.” *RTC* 2(1): 17–23.

PORTABLE I-V CURVE TRACER DEVELOPMENT FOR CHARACTERIZATION OF SOLAR ARRAYS UP TO 400V AND 10A

Abstract. *Due to the great increase in photovoltaic installations in Brazil, the need for diagnose and support equipments for operations and maintenance (O&M) activities increase as well. This article describes the development of a portable IV curve tracer for solar arrays up with open-circuit voltages up to 400V and short-circuit currents up to 10A. A prototype was implemented using Arduino Mega and with the power switching circuitry using capacitive load and MOSFET switches. The intended application is the characterization, commissioning through Brazilian standards, notably ABNT NBR 16724/2014 and diagnoses of low-scale solar arrays, through a national and ease-of-development equipment, which avoids the high costs associated with similar equipments come to Brazil, aggregating in quality to Brazilian solar photovoltaic systems and O&M activities.*

Key words: *Photovoltaic Solar Energy, IV Curve Tracer, Power Electronics for Renewables*