

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE TRAÇADOR DE CURVA IxV PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS USANDO O MÉTODO DE CARGA ELETRÔNICA

Marcio Leal Macedo Luna – marciolealmacedo@hotmail.com

Paulo Cesar Marques de Carvalho – carvalho@dee.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. Traçadores de curva IxV para módulos fotovoltaicos (FV) são utilizados como um método de diagnóstico de problemas nos módulos como condições de sombreamento, conexões defeituosas e condições de degradação. Existem diversos tipos e marcas de traçadores disponibilizados comercialmente, mas seus custos são bastante elevados. A presente pesquisa aborda o desenvolvimento e a validação de um traçador de curva IxV para um módulo FV focando a simplicidade do dispositivo e o seu baixo custo. O traçador desenvolvido se baseia no método de carga eletrônica utilizando um MOSFET de potência como carga para o módulo. Através de uma adequada variação do sinal de tensão de gate-source do MOSFET é possível adquirir os pontos de intersecção das curvas IxV características do módulo FV e do MOSFET. Estes pontos são registrados através de uma placa de aquisição de dados, com PIC 18F2550, que é controlada via USB por um computador com uma interface gráfica para usuário desenvolvida com o software MATLAB garantindo maior flexibilidade e funcionalidade ao dispositivo. O processo de validação foi realizado através da comparação de resultados obtidos pelo traçador desenvolvido e por um traçador comercial sobre um mesmo módulo nas mesmas condições de temperatura e irradiância solar. Os resultados mostraram que as curvas do traçador desenvolvido e do traçador comercial ficaram bem próximas, com erros médios (entre os valores obtidos com o traçador desenvolvido e os valores obtidos com o traçador comercial) de corrente, tensão e potência menores do que 4,2%.

Palavras-chave: Energia Solar, Módulos FV, Traçador de curva IxV.

1. INTRODUÇÃO

Os módulos FV podem ser caracterizados eletricamente de várias maneiras. Em geral, os fabricantes disponibilizam catálogos onde as principais informações dos módulos são mostradas. Entre estas informações estão os principais parâmetros elétricos: tensão de circuito aberto (Voc), corrente de curto-circuito (Isc), corrente (Impp), tensão (Vmpp) e potência no ponto de máxima potência (Pmax); e fator de forma (FF). Estes parâmetros elétricos são disponibilizados pelo fabricante para condições específicas de temperatura e irradiância solar conhecidas como condições de teste padrão ($G=1000 \text{ W/m}^2$ e $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$) ou STC (*Standard Test Conditions*).

Os traçadores de curva IxV para módulos FV são utilizados para averiguar esses parâmetros elétricos para quaisquer condições de temperatura e irradiância. Além disso, a curva IxV disponibilizada por estes dispositivos é capaz de diagnosticar problemas nos módulos FV como condições de sombreamento, conexões defeituosas além de estimar a degradação sofrida pelo módulo devido às intempéries do ambiente ao longo dos anos. Desta forma, estes dispositivos fornecem as características elétricas reais dos módulos FV sendo de fundamental importância para estudos e pesquisas com módulos FV.

O princípio básico para medição da curva IxV de módulos FV se baseia no controle da tensão e da corrente do ponto de curto circuito ao ponto de circuito aberto. Segundo Piliougine et al. (2011), os principais métodos conhecidos na literatura que realizam esta operação são baseados em: resistor variável, carga capacitiva, carga eletrônica, conversores dc-dc e fonte de potência de quatro quadrantes.

O método mais simples de medição da curva, usado em Ahmed et al. (2014), é o que utiliza um resistor variável. Neste método, o valor da resistência varia de zero a infinito para captura dos pontos de tensão e corrente do instante de curto-circuito ao instante de circuito aberto do módulo FV. A desvantagem deste método está no fato dos resistores terem de absorver grandes quantidades de potência, o que dificulta o uso em aplicações que envolvem muitos módulos.

O método capacitivo, utilizado por Munõz et al. (2006), consiste no carregamento de um conjunto de capacitores, ocorrendo a aquisição dos pontos do curto-circuito ao circuito aberto no instante de carregamento. Este é o método mais utilizado comercialmente.

A fonte de quatro quadrantes é um equipamento que pode ser utilizado como fonte ou como carga. O método de medição da curva IxV usado em Piliougine et al. (2011) consiste na geração de uma rampa de tensão para o módulo. No instante de polarização do módulo, corrente e tensão são medidas com multímetros de disparo instantâneo. Este método é o mais utilizado por fabricantes. Sua desvantagem é o custo elevado da fonte de quatro quadrantes.

Conversores dc-dc também podem ser utilizados para medição da curva IxV de módulos FV. Em Durán et al. (2012), o conversor colocado entre o módulo e uma carga conhecida é capaz de fazer a varredura dos pontos de operação do módulo do curto circuito ao circuito aberto através da variação na relação de *duty-cycle*.

Outro método utilizado para medição da curva $I \times V$, usado por Sahbel et al. (2013), Kherchi et al. (2013) e Leite et al. (2012), consiste no uso de um transistor como carga, usualmente um MOSFET de potência, e a partir do controle da tensão de *gate-source* são medidos os pontos entre o transiente de abertura da chave, ou seja, do curto-circuito ao circuito aberto. A desvantagem deste método está na necessidade do transistor ter que dissipar toda a potência do módulo, assim este método se limita para aplicações com poucos módulos FV.

O método utilizado no presente artigo foi o que utiliza uma carga eletrônica devido a sua simplicidade, ao seu baixo custo e a necessidade de uso de um traçador para pequenas potências (200-300 W).

2. MÉTODO DE CARGA ELETRÔNICA

De acordo com Belmili et al. (2010), a carga eletrônica é um método que permite simular uma carga estática ou dinâmica. Através do controle eletrônico desta carga é possível o controle de sua corrente. A carga eletrônica mais adequada para aplicações com módulos FV é o MOSFET devido a sua capacidade de dissipar valores consideráveis de potência, suportar valores elevados de corrente e possuir uma resistência interna bastante pequena entre *drain* e *source* da ordem de miliohms.

Na Fig. 1 é mostrado o esquemático de uso de uma carga eletrônica com MOSFET acoplada a um módulo FV. Os estágios de comando e potência integram a carga. O estágio de potência é responsável pela dissipação da potência do módulo FV e o estágio de comando é responsável pelo controle de corrente que passa através do MOSFET.

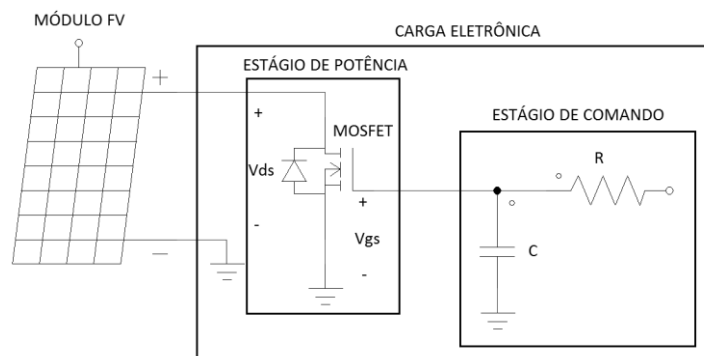


Figura 1- Esquemático de uma carga eletrônica com uso de MOSFET conectada a um módulo FV.

As Eq. (1) e Eq. (2) sintetizam o funcionamento da carga eletrônica de acordo com Belmili et al. (2010), a partir delas é possível a interpretação de como ocorre o controle da corrente e da tensão do módulo FV através do MOSFET.

$$V_{pv} = V_{ds} \quad (1)$$

$$I_{pv} = I_{ds} \quad (2)$$

Onde V_{pv} é a tensão de saída do módulo FV, V_{ds} é tensão *drain-source* do MOSFET, I_{pv} é a corrente de saída do módulo FV e I_{ds} é a corrente de *drain-source* do MOSFET.

Na Fig. 2 são mostrados os pontos de operação do módulo FV conectado ao MOSFET. Estes pontos são as intersecções das curvas do MOSFET controladas pela tensão de *gate-source* com a curva característica do módulo. Assim, variando-se, rapidamente, de modo que não haja variação de temperatura no módulo e irradiância sobre o módulo, a tensão de *gate-source* é possível caracterizar a curva $I \times V$.

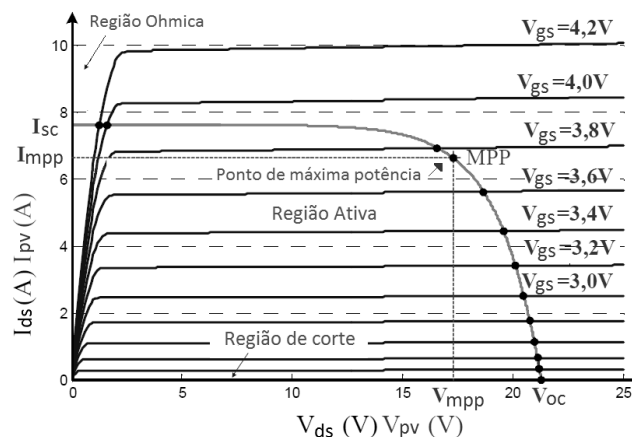


Figura 2- Curvas características do MOSFET (em preto) e curva característica do módulo FV (em cinza).

3. DESCRIÇÃO DO DISPOSITIVO DESENVOLVIDO

Na Fig. 3 é mostrado o esquemático de funcionamento do dispositivo. A partir da interface gráfica para usuário desenvolvida no *software* MATLAB é possível enviar um comando de acionamento para uma placa de aquisição de dados com PIC 18F2550, esta placa envia um sinal para o estágio de comando que controla o fluxo de corrente pelo módulo através do estágio de potência. Durante o transiente de curto circuito ao circuito aberto do módulo FV, sensores de corrente e tensão adquirem os pontos da curva IxV, estes pontos são lidos pela placa de aquisição e enviados para o computador que apresenta os dados através da interface no MATLAB. Para caracterização adequada da curva IxV é necessária fornecer a temperatura do módulo e a irradiância incidente sobre o mesmo no momento no qual a curva é traçada. Assim, foram utilizados um piranômetro (modelo LP02) para medição de irradiância solar próximo ao módulo e sensores de temperatura do tipo termo resistência pt100 para medição de temperatura em baixo do módulo. As temperaturas e a irradiância solar foram medidas através de um sistema supervisorio constituído de um CLP (Controlador Lógico Programável) e um computador.

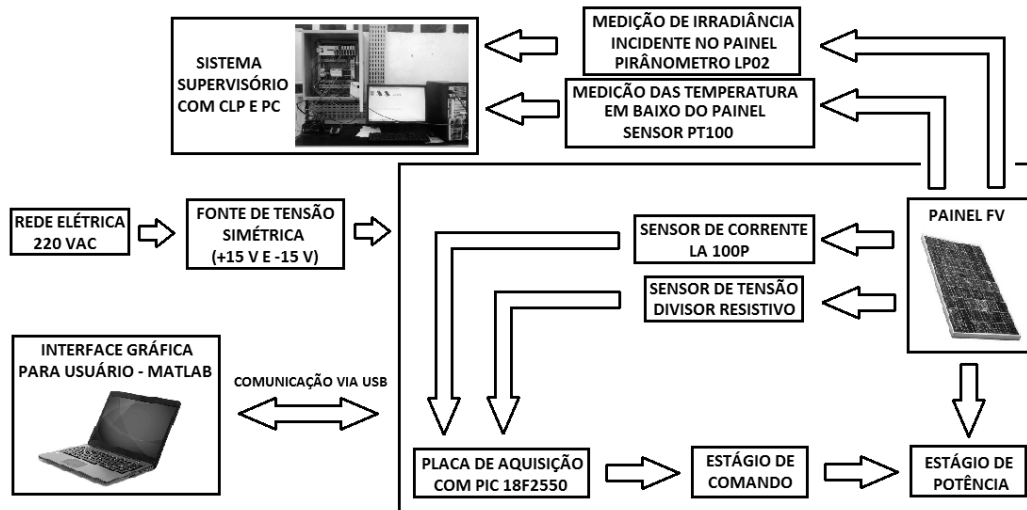


Figura 3- Esquemático do funcionamento geral do dispositivo para traçar a curva IxV de um módulo FV.

3.1 Estágio de potência

Na Fig. 4 é mostrado o esquemático do circuito elétrico projetado com os estágios de potência e de comando. O sensor de tensão utilizado foi um divisor resistivo com resistores de 680 Ω e 6,8 k Ω , a tensão adquirida no resistor de 680 Ω é lida pela placa de aquisição no pino AN1 do microcontrolador, o capacitor de C2 de 100 nF foi utilizado para filtrar distorções desta tensão. O sensor de corrente utilizado foi o LA 100P, seu funcionamento se baseia no efeito Hall para medição da corrente. Como este sensor possui corrente nominal de 100 A, fornecendo 5 V de saída para esta corrente foram enroladas 15 voltas para aumentar a sensibilidade de aquisição da corrente, pois foi definido como 6 A a corrente máxima a ser medida. Assim, quando o módulo fornecer 6 A, o sensor irá perceber uma corrente de 90 A fornecendo 4 V de tensão como resposta. A alimentação deste sensor é uma fonte simétrica de +15 V e -15 V. A saída do sensor de corrente vai para o pino AN0 do microcontrolador na placa de aquisição.

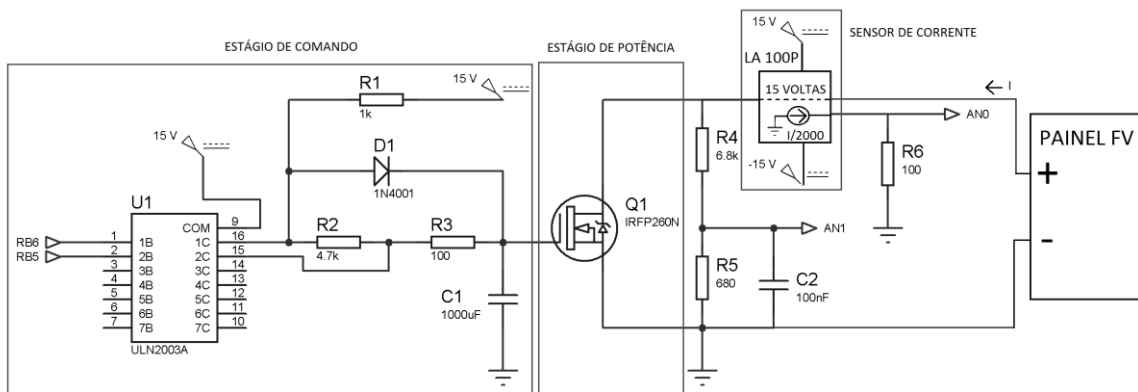


Figura 4- Circuito elétrico do dispositivo.

O MOSFET utilizado no estágio de potência foi o IRFP260N, este foi escolhido devido a sua capacidade de dissipar uma quantidade de potência superior a 300 W, a sua capacidade de conduzir correntes elevadas próximas de 50 A, a sua capacidade de suportar tensões *drain-source* até 200 V e a sua resistência *drain-source* possuir um valor pequeno da ordem de 40 m Ω . Esta resistência deve ser muito pequena para que não haja interferência na medição da corrente de curto circuito no módulo FV.

Destaca-se que a escolha deste MOSFET atendeu a necessidade de uso em módulos FV com potência de pico de até 160 W, correntes de curto-circuito de até 6 A e tensões de circuito aberto de até 50 V. Assim, o dispositivo desenvolvido na presente pesquisa não deve ser utilizado com módulos ou conjuntos de módulos em que a potência máxima a ser entregue seja superior a 300 W ou a corrente de curto-circuito seja superior a 6 A ou ainda a tensão de circuito aberto seja superior a 50 V, pois o dimensionamento dos sensores foi realizado para medir até esses limites.

3.2 Estágio de comando

No estágio de comando foi utilizado o *driver* ULN2003A composto por sete transistores Darlington. Os pinos RB6 e RB5 na Fig. 4 possuem origem no microcontrolador PIC 18F2550 utilizado na placa de aquisição. O princípio de funcionamento do estágio de comando segue as lógicas:

- Quando RB6 e RB5 tiverem nível logico baixo (0 V) o capacitor C1 irá carregar através do resistor R1 e do diodo D1.
- Quando RB6 tiver nível logico alto (5 V) e RB5 nível logico baixo (0 V), o capacitor C1 irá descarregar lentamente através dos resistores R2 e R3.
- Quando RB5 tiver nível logico alto (5 V) e RB6 nível logico baixo (0 V), o capacitor C1 irá descarregar rapidamente através do resistor R3.

Para aquisição da curva IxV do módulo FV, inicialmente, deve-se carregar o capacitor, rapidamente, com 15 V colocando os pinos RB5 e RB6 em nível logico baixo, e em seguida descarregar o capacitor colocando RB5 ou RB6 em nível logico alto. No desenvolvimento deste trabalho, o capacitor se descarrega pelos resistores RB6 e RB5 devido à compatibilidade com a velocidade de aquisição do PIC 18F2550. Com sistemas de aquisição mais velozes é possível uma aquisição mais rápida através do descarregamento do capacitor C1 apenas pelo resistor R3.

Ao se carregar o capacitor C1 com 15 V, o MOSFET fica totalmente aberto à passagem de corrente e assim o módulo FV permanece em curto circuito; ao descarregar o capacitor C1, o MOSFET vai limitando a passagem de corrente até o momento no qual a corrente se torne nula. Desta forma, é possível a aquisição dos pontos entre o instante de curto circuito e o instante de circuito aberto da curva IxV do módulo FV. Os pontos medidos são adquiridos pelo microcontrolador e enviados ao computador onde são armazenados pelo programa em MATLAB e exibidos na interface de usuário desenvolvida.

3.3. Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados utilizado foi uma placa de aquisição de dados SanUSB com PIC 18F2550. Esta placa possui interface com computador via USB o que flexibiliza a gravação do PIC e a comunicação com o mesmo. O código gravado no microcontrolador possui a finalidade de fazer com que este receba os comandos do computador via USB e a partir desses o estágio de comando possa carregar e descarregar o capacitor C1 da Fig. 4. Além dessas funções, o PIC envia os dados dos sensores de tensão e corrente para o computador durante o transiente de abertura do MOSFET.

As principais características da placa de aquisição utilizada são:

- Conversor A/D de 10 bits;
- Alimentação de 5 V integrada com o USB conectado ao computador;
- 13 canais de conversão A/D;
- 32 KBytes de memória flash e 2048 bytes de memória SRAM;

3.4. Interface gráfica de usuário desenvolvida

Visando uma maior funcionalidade do traçador desenvolvido, na presente pesquisa foi projetada uma interface gráfica para manipulação por usuários. Esta interface foi desenvolvida a partir do *software* MATLAB, pois este possui diversas funcionalidades matemáticas que facilitam o desenho das curvas IxV e PxV dos módulos FV; além disto, este software possui a possibilidade de comunicação com dispositivos externos ao computador como placas de aquisições de dados.

Na Fig. 5 é mostrada a interface desenvolvida com as curvas para o módulo FV YL95P-17b 2/3 do fabricante YINGLI SOLAR para a situação de irradiância igual a 490 W/m² e temperatura igual a 316,2 K em baixo do módulo.

Na Fig. 5(a) é mostrado o gráfico da curva IxV que aparece após pressionar o botão (CURVA IxV), na Fig. 5(b) aparece o gráfico PxV após o botão (CURVA PxV) ser pressionado e na Fig. 5(c) aparece o gráfico com as curvas de tensão (em volts) e corrente (em ampères) em relação ao número de pontos medidos no momento do transiente entre o curto-circuito e o circuito aberto quando o botão (CURVAS I e V) é pressionado.

Os valores de corrente de curto circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente no ponto de máxima potência (I_{mpp}), tensão no ponto de máxima potência (V_{mpp}), potência máxima (P_{max}) e fator de forma (FF) são mostrados do lado direito do gráfico e são relativos à curva $I \times V$. O botão (EXPORTAR .txt) cria três arquivos .txt na pasta onde o código no MATLAB foi salvo; estes arquivos salvam os valores de corrente, tensão e potência dos pontos adquiridos no transiente de fechamento do MOSFET. Estes arquivos são criados para se exportar com maior facilidade as curvas $I \times V$ e $P \times V$ para desenho em outros softwares. O botão (FIGURES) abre três janelas com cada gráfico da Fig. 5 isolado em cada janela no formato *figure* do MATLAB para possibilitar a análise e exportação dos gráficos com melhor qualidade.

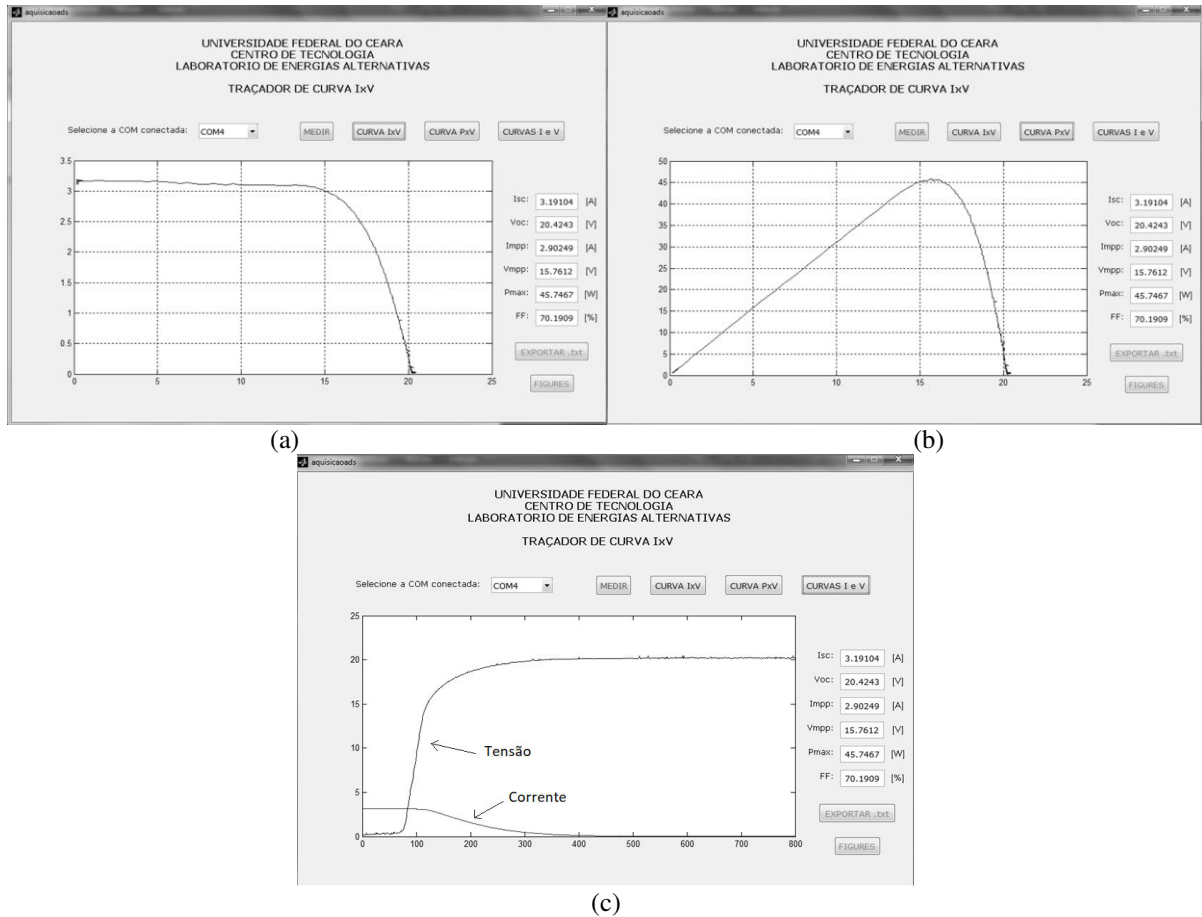


Figura 5- Interface gráfica desenvolvida: (a) Curva $I \times V$, (b) Curva $P \times V$, (c) Curvas de corrente e tensão mostrando o transiente do curto-circuito ao circuito aberto.

4. RESULTADOS E VALIDAÇÃO

Para validar o traçador desenvolvido foi utilizado o traçador comercial MINI-KLA como critério de comparação para analisar as diferenças entre os dois traçadores. Devido à necessidade de valores constantes de irradiância e temperatura durante o experimento de validação foram utilizados quatro interruptores para chavear rapidamente a conexão do módulo FV com os dois traçadores.

O módulo FV utilizado para validação do traçador desenvolvido foi o TSM 160 do fabricante Azur. As características elétricas em STC (*Standard Test Conditions*) do mesmo são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros elétricos em STC para o módulo FV TSM 160.

Corrente de curto circuito (I_{sc}):	4,94 A
Tensão de circuito aberto (V_{oc}):	43,5 V
Corrente no ponto de potência máxima (I_{mpp}):	4,54 A
Tensão no ponto de potência máxima (V_{mpp}):	35,25 V
Potência máxima (P_{mpp}):	160 W

Na Fig. 6 é mostrado o traçador desenvolvido (esquerda) e o traçador comercial (MINI-KLA) a direita utilizado no processo de validação. Nas Fig. 7 e 8 são mostradas as curvas IxV e PxV dos dois traçadores; através de uma inspeção visual, percebe-se que as curvas estão bastante próximas, demonstrando a exatidão do traçador desenvolvido.

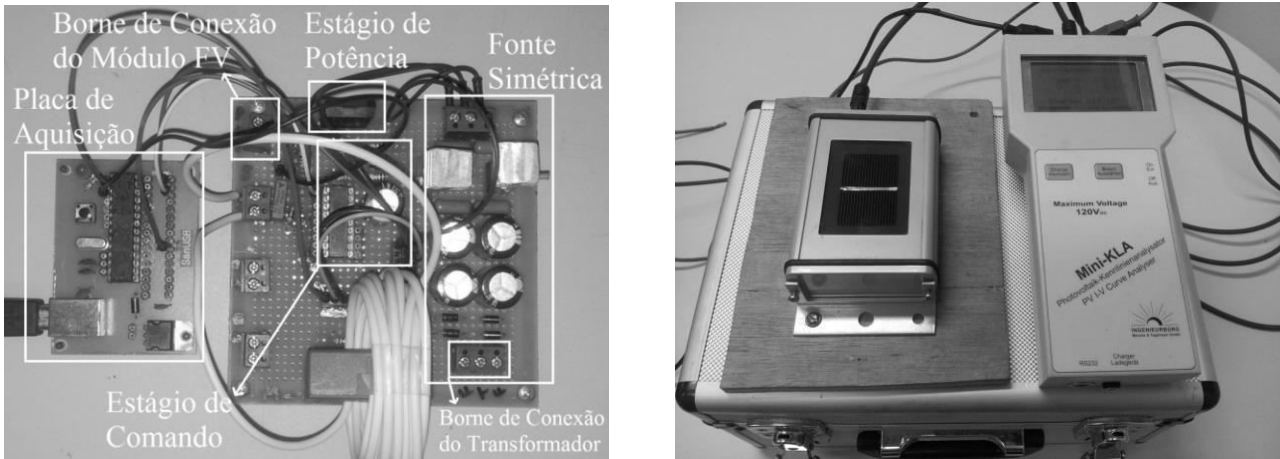


Figura 6 – Traçador desenvolvido (esquerda), traçador comercial MINI-KLA (direita) utilizado no processo de validação.

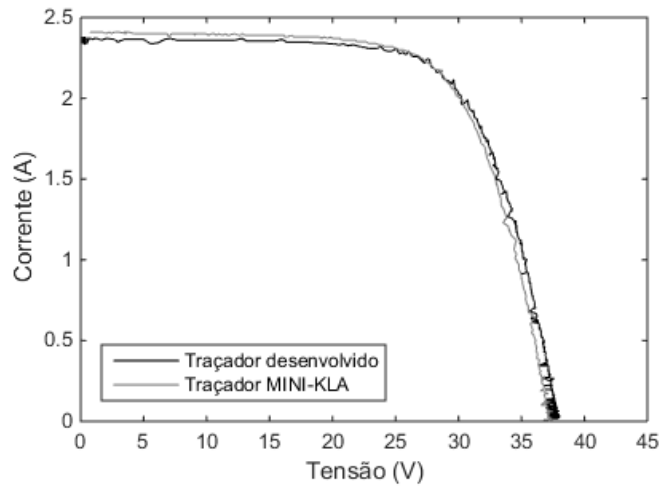


Figura 7 – Comparação dos dois traçadores para o módulo AZUR TSM 160 numa condição de irradiância solar de 465 W/m² e temperatura ambiente de 303,31 K: Curvas IxV.

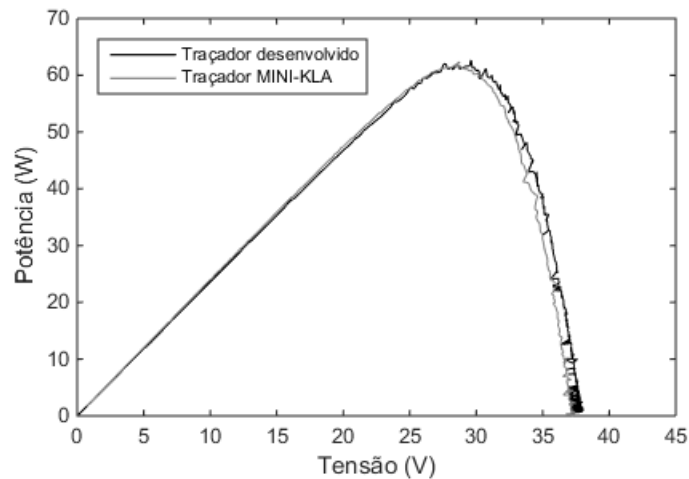


Figura 8 – Comparação dos dois traçadores para o módulo AZUR TSM 160 numa condição de irradiância solar de 465 W/m² e temperatura ambiente de 303,31 K: Curvas PxV.

Os experimentos com o módulo TSM 160 foram realizados no dia 25 de fevereiro de 2016 durante o período da tarde. Apesar da baixa nebulosidade foram identificadas algumas quedas bruscas na irradiância solar, conforme Fig. 9. Nesta é possível identificar uma variação de temperatura no módulo de 342,6 a 314 K. A irradiância variou de 982 a 126 W/m² e a temperatura ambiente se manteve próxima de 305 K.

Na Tabela 2 são mostradas 20 situações de validação com o módulo TSM 160.

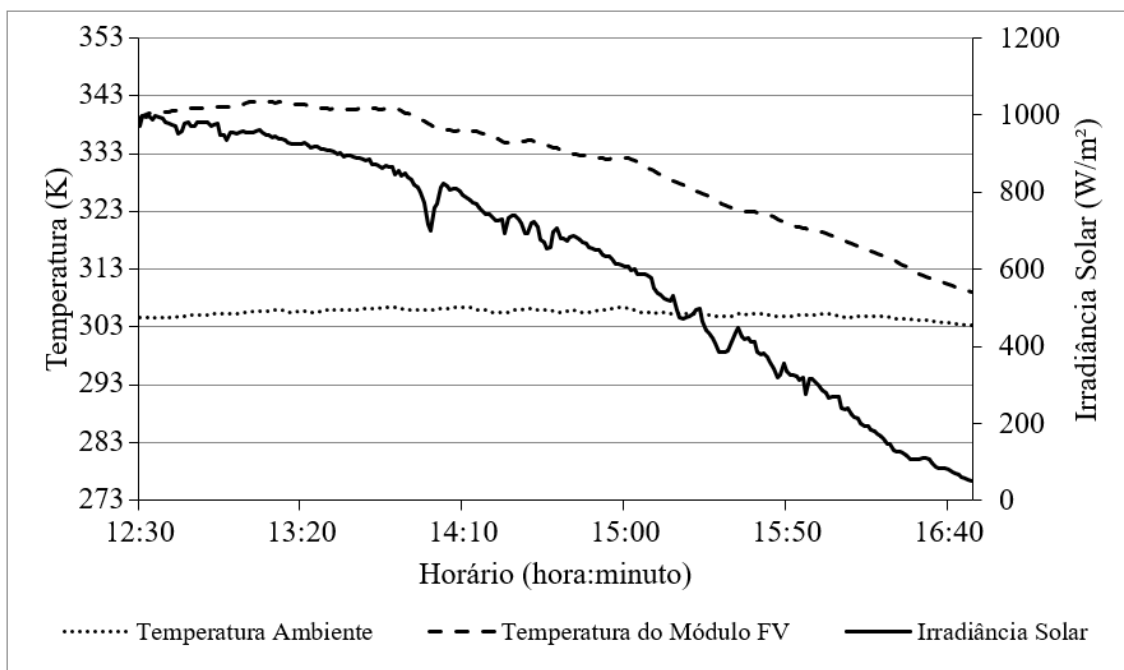


Figura 9 – Dados de irradiância solar e temperatura do módulo TSM 160 no dia 25/02/2016.

Tabela 2 – Situações de teste e validação do traçador desenvolvido para o módulo TSM 160.

Situação	Horário (Hora:Minuto)	G (W/m ²)	T (K)
1	12:57	982	341,0
2	13:26	932	342,6
3	13:49	884	340,8
4	14:15	812	337,1
5	14:23	770	336,8
6	14:30	725	335,5
7	14:45	681	334,2
8	15:01	639	332,2
9	15:11	601	331,9
10	15:21	532	329,0
11	15:26	476	327,8
12	15:37	401	324,7
13	15:44	444	323,2
14	15:48	405	322,9
15	15:53	371	322,2
16	15:56	321	321,4
17	16:12	269	318,8
18	16:19	226	317,4
19	16:27	178	315,5
20	16:33	126	314,0

Nas Fig. 10 e 11 são mostradas, como exemplo, as curvas IxV e PxV, respectivamente, relativas as situações 2, 5, 9, 12, 16 e 20 da Tab.2 obtidas com o traçador desenvolvido.

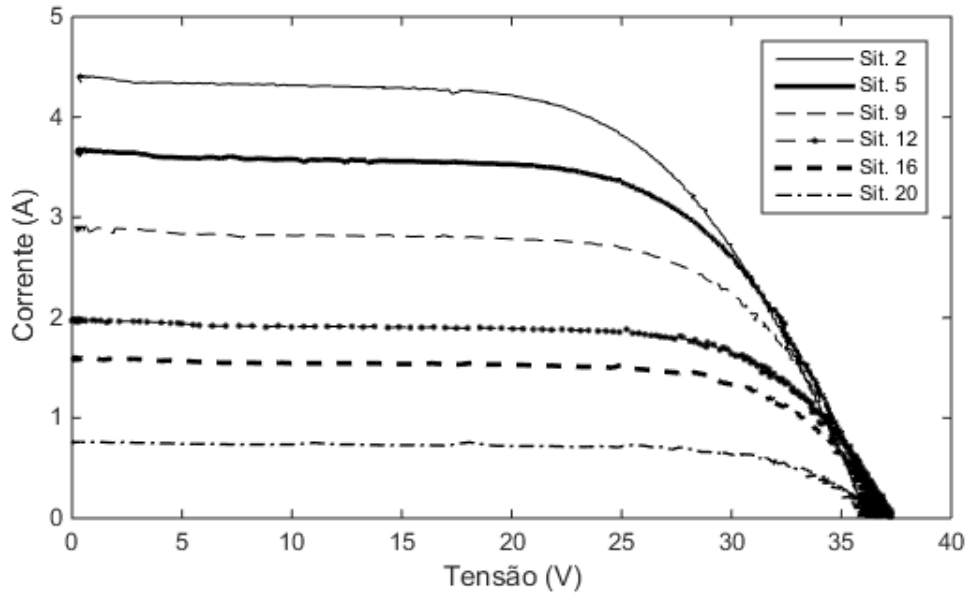


Figura 10 – Curvas IxV medidas com o traçador desenvolvido para as situações 2, 5, 9, 12, 16 e 20 descritas na Tab. 2.

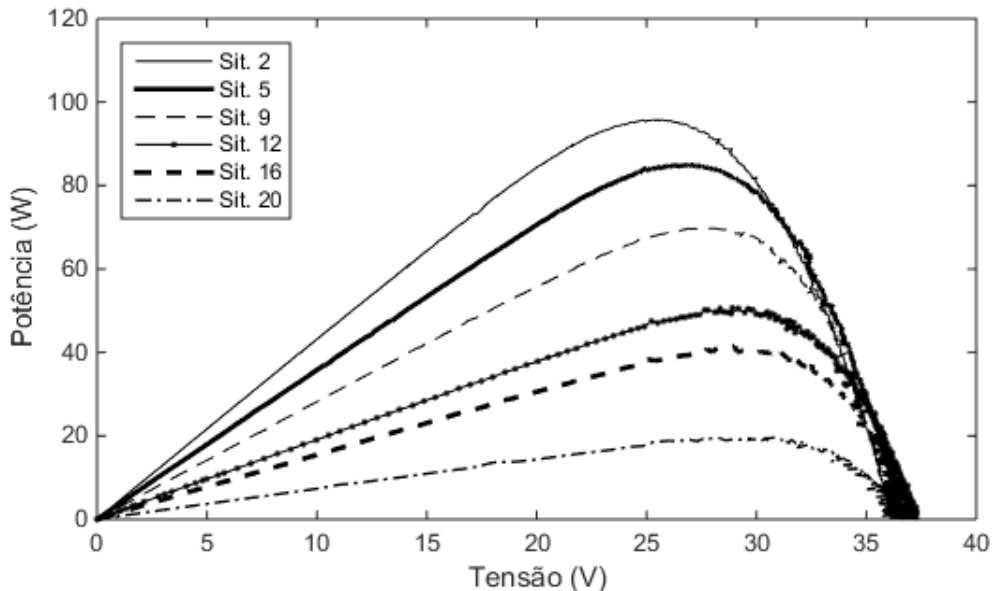


Figura 11 – Curvas P_xV medidas com o traçador desenvolvido para as situações 2, 5, 9, 12, 16 e 20 descritas na Tab. 2.

Os erros percentuais entre os parâmetros elétricos medidos com o traçador desenvolvido em relação ao traçador comercial são mostrados na Fig. 12. Os maiores erros encontrados foram na corrente no ponto de potência máxima, com exceção da situação 20 onde o erro na tensão no ponto de máxima potência ultrapassou os 12%. A causa do erro encontrado para a situação 20 está na interpolação linear realizada pelo traçador desenvolvido e no excesso de pontos medidos que faz com que a curva I_xV apresentasse distorções para baixas irradiâncias. Essas distorções próximas ao ponto de potência máxima acentuam o erro entre os dois traçadores. Apesar disso, o traçador desenvolvido apresenta resultados bem próximos dos resultados obtidos com o traçador comercial MINI-KLA para as condições nas quais foi realizada a validação.

Os erros apresentados se devem às incertezas de medição dos dois equipamentos; esses erros são inerentes às medições que envolvem sensores de tensão e de corrente. A precisão de medição do sensor de corrente LA-100P utilizado no traçador desenvolvido é de $\pm 0,7\%$ e os resistores utilizados para medir tensão possuem precisão de $\pm 5\%$. Já o traçador MINI-KLA possui precisão de $\pm 0,4\%$ em todas as medições, tanto de corrente como de tensão.

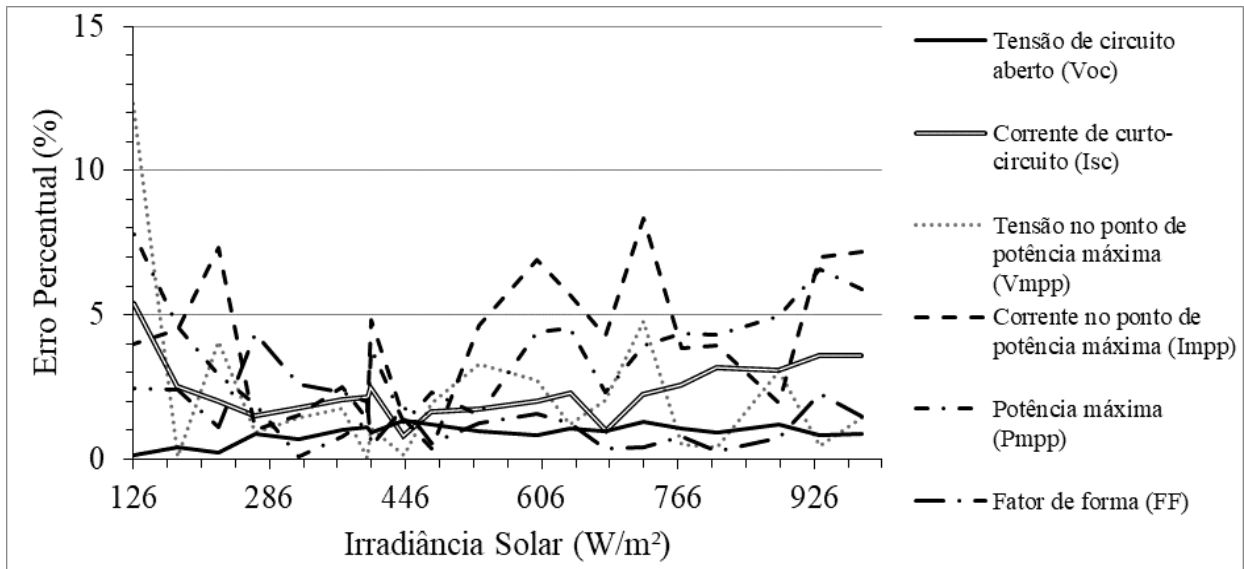


Figura 12 – Erros percentuais dos parâmetros elétricos medidos com o traçador desenvolvido em relação ao traçador comercial para o módulo TSM 160.

Na Tab. 3 são mostrados os erros máximos, mínimos e médios para os parâmetros elétricos medidos com o módulo TSM 160. Em todos os parâmetros o erro médio foi menor do que 4,2% e os maiores erros foram encontrados na corrente no ponto de potência máxima sendo encontrado um erro médio de 4,13%.

Tabela 3 – Erros máximos, mínimos e médios para cada parâmetro elétrico (módulo TSM 160)

	Voc	Isc	Vmpp	Impp	Pmpp	FF
Erro máximo (%):	1,36	5,41	12,34	8,33	7,86	4,37
Erro mínimo (%):	0,14	0,81	0,05	0,38	0,08	0,26
Média dos ERROS (%):	0,91	2,39	2,18	4,13	3,49	1,52

Na Fig. 13 são mostradas as potências máximas obtidas com os dois traçadores para as medições com o módulo TSM 160. Observa-se que, no experimento, o módulo consegue atingir potência máxima maior que 100 W e para condições de irradiância solar igual a 126 W/m² consegue atingir potência próxima de 20 W.

Na Fig. 14 são mostrados os fatores de forma calculados a partir dos parâmetros elétricos medidos com os dois traçadores. Observa-se que o fator de forma varia durante o experimento com valores entre 59 e 69%.

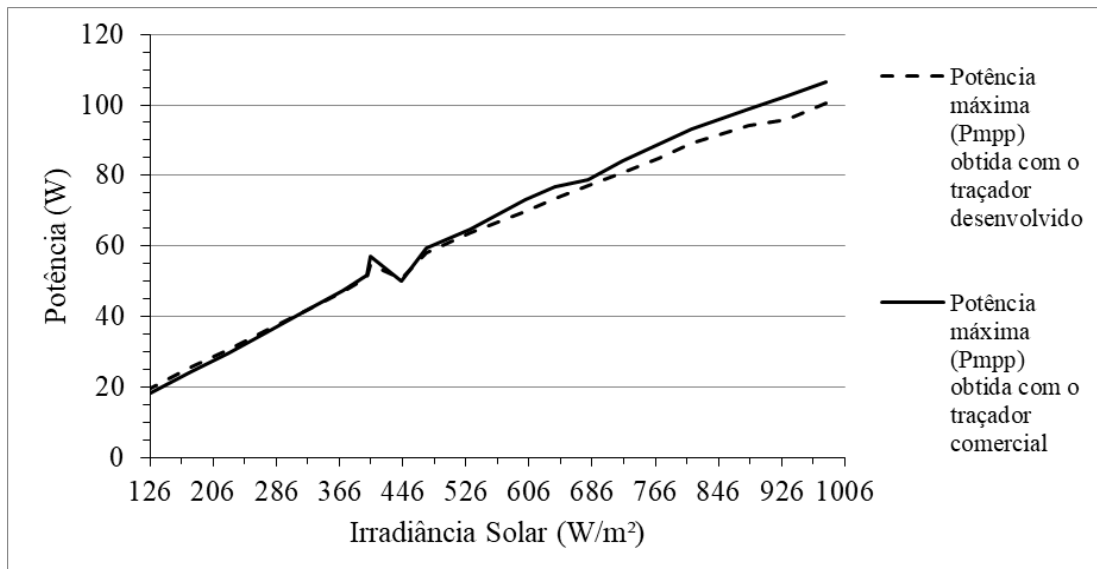


Figura 13 – Potência máxima medida para cada situação mostrada na Tab. 2.

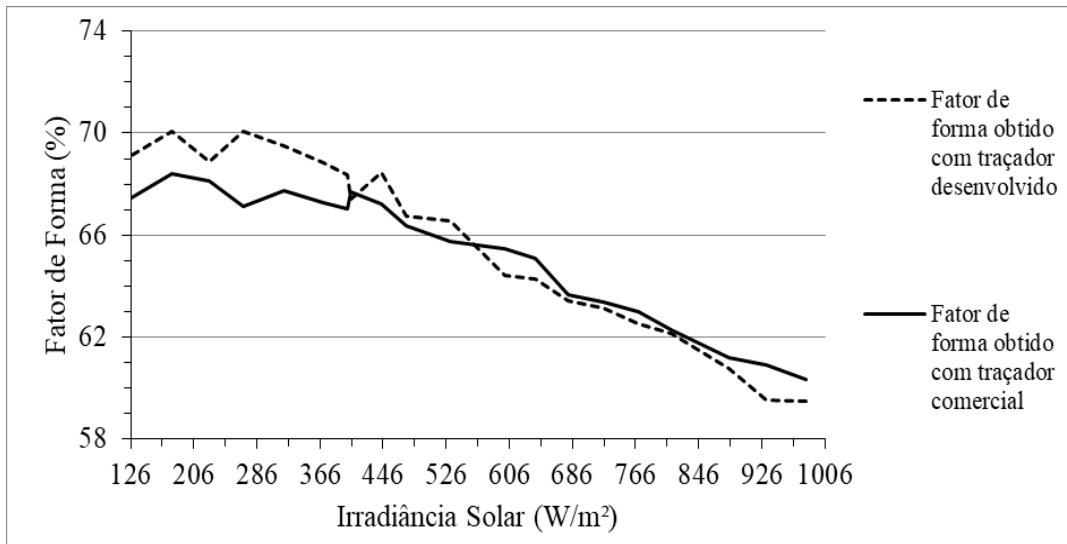


Figura 14 – Fator de forma calculado para cada situação mostrada na Tab. 2.

Na Fig. 15 são mostradas as correntes de curto circuito e as tensões de circuito aberto medidas com cada traçador. Percebe-se que as tensões de circuito aberto medidas com ambos traçadores variam menos de 1,5 V no experimento apesar da temperatura do módulo variar mais de 25 K.

Na Fig. 16 são mostradas as correntes e tensões nos pontos de máxima potência medidas com os dois traçadores para o módulo TSM160. Percebe-se que a tensão no ponto de potência máxima variou aproximadamente 5 V durante o experimento, este valor é bem superior a variação da tensão de circuito aberto (1,5 V).

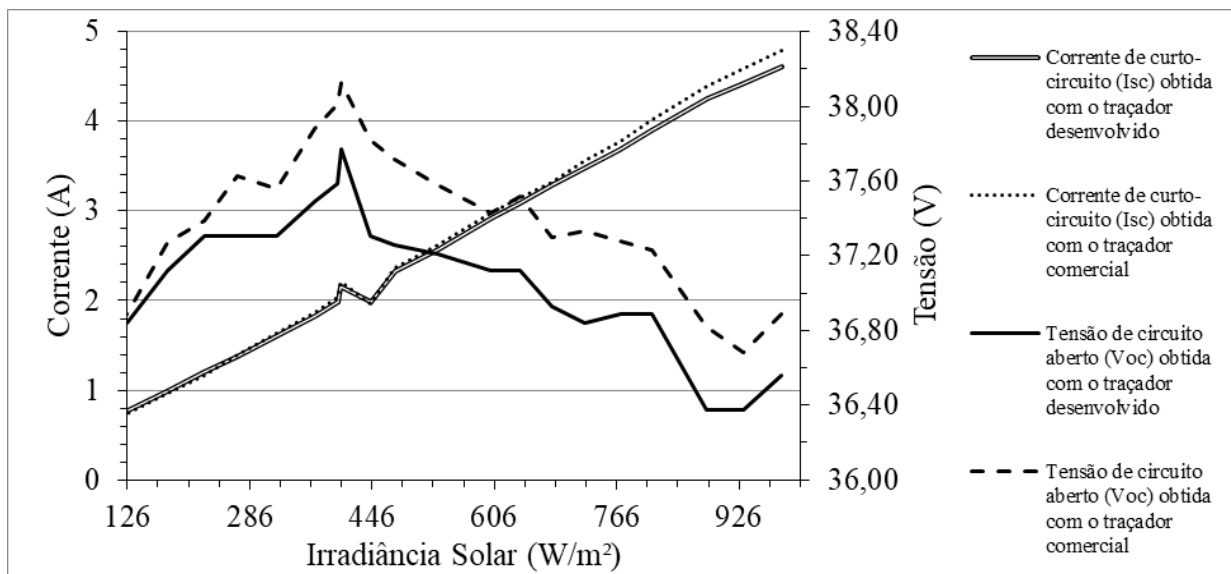


Figura 15 – Valores de I_{sc} e V_{oc} medidos com os dois traçadores para situações mostradas na Tab. 2.

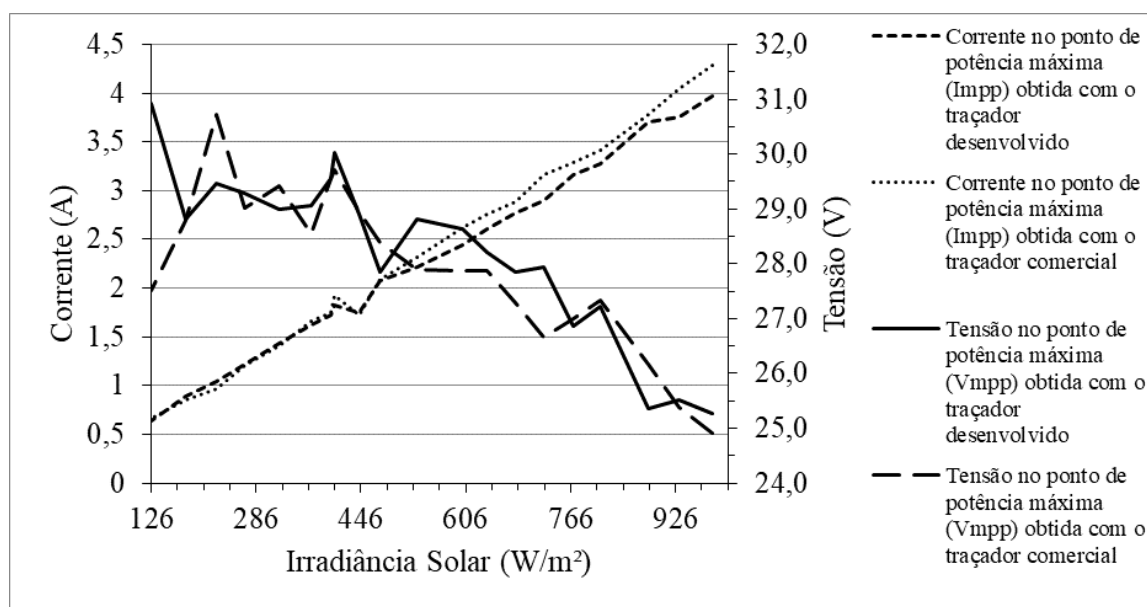


Figura 16 – Valores de I_{mpp} e V_{mpp} medidos com os dois traçadores para situações mostradas na Tab. 2.

5. CONCLUSÕES

Traçadores comerciais de curva IxV para módulos FV possuem um preço bastante elevado e muitas vezes não estão disponíveis no comércio nacional. A presente pesquisa abordou o desenvolvimento de um traçador de curva IxV para um módulo FV de média potência ou um conjunto de módulos FV de baixa potência. O projeto deste traçador visou simplicidade e baixo custo. Além disso, traçadores de curva IxV para módulos FV fornecem os parâmetros elétricos dos módulos para qualquer condição de irradiância solar e temperatura.

Na literatura mundial, os principais métodos para caracterização da curva IxV são: resistor variável, fonte de 4 quadrantes, capacitivo, carga eletrônica e conversores cc-cc. Nestes métodos é possível a medição de pares IxV do ponto de curto circuito ao ponto de circuito aberto.

No presente artigo foi desenvolvido um traçador de curva IxV para módulos FV usando o método de carga eletrônica através do MOSFET IRFP260N. Um estágio de comando foi desenvolvido para que, através da adequada variação no sinal de *gate-source* do MOSFET, fosse possível a obtenção da curva IxV, do instante de curto-circuito ao instante de circuito aberto, num intervalo de tempo de aproximadamente 3 s. Para este intervalo, o número de pontos para cada curva IxV foi definido em 800.

No dia 25 de fevereiro de 2016 foram realizadas medições com o módulo TSM 160 com potência de 160 Wp. Neste dia, as medições foram realizadas em condições de irradiância solar variando entre 126 e 982 W/m² e temperatura do módulo variando entre 314 e 342,6 K. Os resultados da comparação entre os dois traçadores mostraram erros médios percentuais pequenos para todos os parâmetros elétricos obtidos (menores do que 4,2%). Os maiores erros foram encontrados na corrente no ponto de potência máxima, numa média igual a 4,13%.

Os erros obtidos estão razoáveis quando comparados com erros encontrados na literatura. Em Gasparin (2009) são obtidos erros de até 8,9% quando da comparação das curvas IxV obtidas com o traçador desenvolvido em relação às fornecidas pelo fabricante dos módulos. Já em Benghanem (2009) são encontrados erros em comparação a modelos elétricos de até 15,1%. Em Simon e Meyer (2006) são encontrados erros de até 0,94% para medições de corrente de curto circuito e de até 1,24% para medições da tensão de circuito aberto quando da comparação com um traçador comercial.

Agradecimentos

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo de mestrado concedida ao primeiro autor para a realização da pesquisa;

Ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa concedida ao segundo autor.

REFERÊNCIAS

- Ahmed, C.B.; Kassas, M.; Ahmed, S.E., 2014. PV-standalone monitoring system performance using LabVIEW. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy* n. 1, vol. 3.
- Belmili, H.; Cheikh, S.M.A.; Haddadi, M.; Larbes, C., 2010. Design and development of a data acquisition system for photovoltaic modules characterization. *Renewable Energy* n. 35, p. 1484-1492.
- Benghanem, M, 2009. Low cost management for photovoltaic systems in isolated site with new IV characterization model proposed. *Energy Conversion and Management*, v. 50, n. 3, p. 748-755.

- Durán, E.; Andújar, J.M.; Enrique, J.M.; Pérez-Oria, J.M., 2012. Determination of PV Generator I-V/P-V Characteristic Curves Using a DC-DC Converter Controlled by a Virtual Instrument. International Journal of Photoenergy. Article ID 843185.
- Gasparin, F. P., 2009. Desenvolvimento de um traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Kherchi, M.; Haddadi, M., 2013. Design and development of an IV tracer for photovoltaic panels characterization, ICNCRE'13 - International Conference on Nanoelectronics, Communications and Renewable Energy, Jijel (Algeria).
- Leite, V.; Batista, J.; Chenlo, F.; Afonso, J.L., 2012. Low-cost Instrument for Tracing Current-Voltage Characteristics of Photovoltaic Modules, ICREPQ'12 - International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Santiago de Compostela (Espanha).
- Munõz, J.; Lorenzo, E., 2006. Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays. Solar Energy n. 80, p. 1489-1497.
- Piliougine, M.; Carretero, J.; Mora-López, L.; Sidrach-de-Cardona, M., 2011. Experimental system for current-voltage curve measurement of photovoltaic modules under outdoor conditions. Progress in photovoltaics: research and applications n. 19, p. 591-602.
- Sahbel, A.; Hassan, N.; Abdelhameed, M.M.; Zekry, A., 2013. Experimental Performance Characterization of Photovoltaic Modules Using DAQ. Energy Procedia n. 00, p. 000-000.
- Simon, M.; Meyer, E. L., 2006. Low cost I-V system employing variable power supply unit as an electronic load. Journal of Engineering, Design and Technology, v. 10, n. 3, p. 330-344.

DEVELOPMENT AND VALIDATION OF IxV CURVE TRACER FOR PHOTOVOLTAIC MODULES USING ELECTRONIC LOAD METHOD

Abstract. *IxV curve tracers for photovoltaic (PV) modules are used as a method of diagnosing problems in modules such as shadowing conditions, faulty connections and degradation conditions. There are several types and brands of tracers available commercially, but their costs are quite high. The present research deals with the development and validation of an IxV curve tracer for an PV module focusing on the simplicity of the device and its low cost. The tracer developed is based on the electronic load method using a MOSFET as a load for the module. By means of an adequate variation of the gate-source voltage signal of the MOSFET it is possible to acquire the points of intersection of the characteristic IxV curves of the PV module and the MOSFET. These points are registered through a data acquisition board, with PIC 18F2550, which is controlled via USB by a computer with a graphical user interface developed with MATLAB software guaranteeing greater flexibility and functionality to the device. The validation process was performed by comparing the results obtained by the developed tracer and by a commercial tracer on the same module under the same conditions of temperature and solar irradiance. The results showed that the curves of the developed tracer and the commercial tracer were very close, with average errors (between the values obtained with the tracer developed and the values obtained with the commercial tracer) of current, voltage and power lower than 4.2 %.*

Key words: *Solar Energy, PV Modules, IxV Curve Tracer.*