



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCIO LEAL MACEDO LUNA

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE TRAÇADOR DE CURVA $I \times V$ PARA
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

FORTALEZA

2016

MARCIO LEAL MACEDO LUNA

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE TRAÇADOR DE CURVA IxV PARA
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistema de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L983d Luna, Marcio Leal Macedo.
Desenvolvimento e validação de traçador de curva IxV para módulos fotovoltaicos / Marcio Leal Macedo Luna. – 2016.
146 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.
Coorientação: Prof. Dr. Sérgio Daher.

1. Energia Solar. 2. Módulos FV. 3. Traçador de Curva IxV. I. Título.

CDD 621.3

MARCIO LEAL MACEDO LUNA

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE TRAÇADOR DE CURVA IxV PARA
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistema de Energia Elétrica.

Aprovada em: 02/05/2016.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Paulo Cesar Marques de Carvalho, Dr. (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)



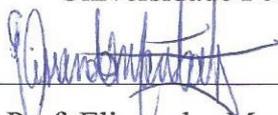
Prof. Sérgio Daher, Dr.-Ing. (Coorientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)



Prof. Fernando Luiz Marcelo Antunes, PhD.

Universidade Federal do Ceará (UFC)



Prof. Elissandro Monteiro do Sacramento, Dr.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

“O segredo do sucesso é a constância do propósito.” (Benjamin Disraeli).

“O homem não é nada além daquilo que a educação faz dele.” (Immanuel Kant).

“Tudo tem alguma beleza, mas nem todos são capazes de ver.” (Confúcio).

Agradeço, a Deus pelas oportunidades e pela força concedida em todos os momentos, a minha família e a meus amigos pela paciência e pelas experiências vividas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, pela força e determinação que foi confiada a mim durante esta jornada.

Aos meus familiares, principalmente meu pai e meu irmão, que me apoiaram nos momentos mais difíceis e me auxiliaram com ensinamentos.

A Bruna pela sua paciência comigo em todo o tempo que dediquei a este trabalho e pelos ensinamentos que foram passados a mim.

Ao prof. Paulo Carvalho pelos ensinamentos, confiança e ajuda que foram dedicados a mim durante todo o período deste trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro dado a mim durante a pesquisa.

A todos os professores e servidores do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UFC que contribuíram direta ou indiretamente para este trabalho.

Aos membros da banca avaliadora deste trabalho que auxiliaram na sua melhoria com ensinamentos e contribuições técnicas de valiosa importância.

A todos os meus colegas do Laboratório de Energias Alternativas (LEA) e de outros laboratórios no DEE que me ajudaram e me auxiliaram durante o desenvolvimento deste trabalho.

Finalmente, gostaria de agradecer a todos os meus amigos que diretamente ou indiretamente me deram coragem, determinação e ensinamentos para finalizar este trabalho.

RESUMO

Os traçadores de curva IxV para módulos FV são utilizados como um método de diagnóstico de problemas como sombreamento, conexões defeituosas e condições de degradação. Existem diversos tipos e marcas de traçadores disponibilizados comercialmente, mas seus custos são bastante elevados no mercado brasileiro devido à necessidade de importação. A presente dissertação aborda o desenvolvimento e a validação de um traçador de curva IxV para módulos FV baseado no método de carga eletrônica com uso de MOSFET como carga para o módulo. Através da adequada variação do sinal de tensão de *gate-source* do MOSFET foi possível adquirir os pontos de tensão e corrente nos terminais dos módulos FV. Estes pontos foram registrados através de uma placa de aquisição de dados, com PIC18F2550, que é controlada via USB por um computador com uma interface gráfica para usuário. Esta interface foi desenvolvida com o *software* MATLAB, garantindo maior flexibilidade e funcionalidade ao dispositivo. Para medições da temperatura do módulo FV foram utilizados sensores PT100 e para as medições de irradiância solar foi utilizado um piranômetro modelo LP02 do fabricante Hukseflux Thermal Sensor; estes sensores foram utilizados através de um sistema supervisorio composto por um PC e um controlador lógico programável (CLP). O processo de validação foi realizado através da comparação dos parâmetros elétricos fornecidos pelo traçador desenvolvido e pelo traçador comercial MINI-KLA. A partir desta comparação um erro foi gerado para cada parâmetro. Foram utilizados 3 módulos FV de diferentes características elétricas (20 Wp, 87 Wp e 160 Wp) e observou-se proximidade entre as curvas do traçador desenvolvido com as curvas do traçador comercial. A média dos erros para os 3 módulos relativa aos parâmetros elétricos obtidos com os 2 traçadores foi inferior a 5% em condições sem sombreamento. Em duas condições de sombreamento, as curvas IxV fornecidas pelos dois traçadores relativas ao módulo FV KC 85 T foram comparadas e observou-se na primeira situação que o traçador MINI-KLA conseguiu caracterizar apenas parcialmente a curva enquanto que o traçador desenvolvido conseguiu caracterizar a curva totalmente, na segunda situação observou-se grande proximidade entre as curvas dos dois traçadores com diferença percentual máxima nos parâmetros elétricos igual a 5,41%.

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

ABSTRACT

The IxV curves tracers for PV modules are used as a method of diagnosis of problems such as shadowing, faulty connections and degradation conditions. There are several types and brands tracers commercially available, but their costs are quite high in the Brazilian market due to the need to import. This thesis describes the development and validation of a IxV curve tracer for PV modules based on the electronic load method using MOSFET as load to the module. By appropriate variation of the MOSFET gate-source voltage signal was possible to acquire the points of voltage and current of the PV modules terminals. These points were recorded using a data acquisition board with PIC18F2550, which is controlled by a computer via a USB with a graphical interface to the user. This interface was developed in MATLAB software ensuring greater flexibility and functionality to the device. For PV module temperature measurements PT100 sensors were used and measurements of solar irradiance was used a pyranometer LP02 model Hukseflux Thermal Sensor manufacturer, these sensors were connected to a supervisory system consists of a PC and a programmable logic controller (PLC). The validation process was conducted by comparing the electrical parameters provided by the developed tracer and the commercial tracer MINI-KLA. From this comparison an error was generated for each parameter. Three PV modules of different electrical characteristics (20 Wp, 87 Wp e 160 Wp) were used and there was similarity between the curves of the developed tracer with the curves of the commercial tracer. The average of errors of the electrical parameters for the 3 PV modules was less than 5% at no shading conditions. In two conditions of shading, the IxV curves provided by the two tracers for the KC 85 T PV module were compared and it was observed in the first situation that the MINI-KLA tracer could characterize only partially the curve while the tracer developed could characterize the curve fully, in the second situation there was great similarity between the curves of the two tracers with maximum percentage difference in the electrical parameters equal to 5.41%.

Key-words: Solar Energy. PV Modules. IxV Curve Tracer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Espectros de irradiância solar.....	6
Figura 2	Modelo funcional de uma célula FV.....	8
Figura 3	Camadas constituintes de um módulo FV.....	10
Figura 4	Curva característica (IxV) em vermelho e curva de potência versus tensão (PxV) em azul de um módulo FV (m-Si, 72 células).....	11
Figura 5	Curvas IxV para diferentes condições de irradiância e temperatura igual a 25 °C.....	12
Figura 6	Curvas PxV para diferentes condições de irradiância e temperatura igual a 25 °C.....	13
Figura 7	Curvas IxV determinadas a diferentes temperaturas e a 1000 W/m ² de irradiância.....	14
Figura 8	Curvas PxV determinadas a diferentes temperaturas e a 1000 W/m ² de irradiância.....	14
Figura 9	Efeito da variação da resistência série na curva IxV.....	15
Figura 10	Efeito da variação da resistência paralela na curva IxV.....	15
Figura 11	Circuito equivalente com um diodo, uma resistência série e uma paralela de uma célula FV.....	17
Figura 12	Impacto das perdas na curva IxV de módulos FV.....	20
Figura 13	Uso de um traçador de curva IxV comercial para estudos de sujidade.....	21
Figura 14	Módulos FV expostos a sujidade intensa.....	21
Figura 15	Diferentes estágios de sujidade a que foi submetido o módulo FV.....	22
Figura 16	Diagrama de células no módulo sob teste por (RILEY, 2014).....	23
Figura 17	Curva IxV de um módulo FV com uma célula sombreada.....	24
Figura 18	Curva PxV de um módulo FV com uma célula sombreada.....	24
Figura 19	Curvas IxV relativas a condições de sombreamento de um painel FV.....	25
Figura 20	(a) Simulação de uma condição de sombreamento numa instalação urbana; (b) Curvas IxV (em vermelho) e PxV (em verde).....	26
Figura 21	(a) Esquemático geral do método capacitivo, (b) transiente de carregamento do capacitor onde a curva IxV é caracterizada.....	28
Figura 22	Traçador de curva IxV construído com fonte de 4 quadrantes.....	29

Figura 23	Conversor SEPIC utilizado por (DURÁN et al., 2012) para caracterização de módulos FV.....	30
Figura 24	Intersecção das curvas IxV do MOSFET (em azul) e do módulo FV (em vermelho).....	30
Figura 25	Esquemático do circuito de potência.....	32
Figura 26	Esquemático do circuito elétrico montado por (LEITE; CHENLO, 2010).....	33
Figura 27	(a) Curva IxV; (b) Curva PxV obtidas por (LEITE; CHENLO, 2010).....	34
Figura 28	Interface desenvolvida por (BENGHANEM, 2009) no software Matlab.....	35
Figura 29	Esquemático do circuito elétrico utilizado por (RODRIGUES, 2009)	35
Figura 30	Esquemático do dispositivo desenvolvido por (GASPARIN, 2009)...	36
Figura 31	Interface de gerenciamento desenvolvida por (GASPARIN, 2009)....	37
Figura 32	Protótipo montado por (VALENTE, 2011).....	37
Figura 33	Esquema proposto por (PILIOUGINE et al., 2011) para medição da curva IxV de módulos FV.....	39
Figura 34	Medições experimentais para um módulo FV sob diferentes irradiâncias. Curva superior (921 W/m ² e 40,7 °C) e curva inferior (339 W/m ² e 39 °C).....	39
Figura 35	Diagrama do dispositivo montado por (BELMILI et al., 2010).....	41
Figura 36	Interface gráfica de gerenciamento montada por (BELMILI et al., 2010).....	41
Figura 37	Diagrama do sistema desenvolvido por (LEITE et al., 2012).....	42
Figura 38	Área de operação segura para o MOSFET IRFP260N mostrando onde devem estar as curvas IxV.....	42
Figura 39	Interface gráfica de gerenciamento desenvolvida por (LEITE et al., 2012).....	43
Figura 40	Comparação do dispositivo montado por (SIMON; MEYER, 2006) e um traçador comercial.....	44
Figura 41	Diagrama esquemático do dispositivo montado por (DURÁN et al., 2012).....	45

Figura 42	Interface gráfica desenvolvida no software LabVIEW por (DURÁN et al., 2012).....	45
Figura 43	Curvas obtidas a partir do osciloscópio por (DURÁN et al., 2012)....	46
Figura 44	Circuito elétrico montado por (DURÁN et al., 2012).....	47
Figura 45	Interface desenvolvida por (ISAAC, 2013).....	47
Figura 46	Diagrama geral do traçador desenvolvido.....	49
Figura 47	Curvas características para o MOSFET IRFP260N para as temperaturas de junção: (a) 25 °C; (b) 175 °C.....	51
Figura 48	Esquemático simplificado do circuito utilizado com os estágios de comando e de potência.....	51
Figura 49	Circuito elétrico utilizado para caracterização de módulos FV.....	59
Figura 50	(a) Sensor de corrente LA100P; (b) Sensor utilizado com as 15 voltas de um cabo de 1 mm ²	55
Figura 51	Sensor PT100 utilizado.....	57
Figura 52	Sensor PT100 coberto pela espuma isolante.....	58
Figura 53	Sensor e espuma acoplados ao módulo através do silicone.....	58
Figura 54	Detalhe dos transmissores de temperatura utilizados numa configuração de 3 fios.....	59
Figura 55	Piranômetro utilizado.....	59
Figura 56	Placa SanUSB com PIC18F2550.....	60
Figura 57	Placa de aquisição conectada a placa com traçador desenvolvido.....	61
Figura 58	Diagrama de gravação do código no microcontrolador.....	62
Figura 59	Supervisório de medição de temperatura e irradiância solar.....	63
Figura 60	Circuito elétrico da fonte simétrica construída.....	63
Figura 61	Interface desenvolvida.....	65
Figura 62	Detalhe dos arquivos criados no formato .txt pelo software Matlab...	65
Figura 63	Curva IxV medida através do dispositivo desenvolvido.....	66
Figura 64	Curva PxV medida através do dispositivo desenvolvido.....	67
Figura 65	Curvas de tensão (em azul) e de corrente (em vermelho) medidas através do dispositivo desenvolvido durante o transiente de caracterização.....	67
Figura 66	Circuito elétrico desenvolvido no software Proteus.....	68
Figura 67	Representação do instante de curto-circuito na simulação.....	69

Figura 68	Representação do instante de circuito aberto na simulação.....	70
Figura 69	Representação do carregamento do capacitor C1 pelo resistor R3.....	71
Figura 70	Transiente de caracterização do módulo FV pelo descarregamento do capacitor C1 através do resistor R3. A corrente é mostrada em vermelho e a tensão em azul.....	72
Figura 71	Representação do descarregamento do capacitor C1 pelos resistores R3 e R7.....	72
Figura 72	Transiente de caracterização do módulo FV pelo descarregamento do capacitor C1 através dos resistores R3 e R7. A corrente é mostrada em vermelho e a tensão em azul.....	73
Figura 73	Curvas IxV e PxV medidas com o traçador desenvolvido para $G=846 \text{ W/m}^2$ e $T=66,5 \text{ }^\circ\text{C}$	74
Figura 74	Transiente de curto circuito a circuito aberto medido com o traçador desenvolvido para $G=846 \text{ W/m}^2$ e $T=66,5 \text{ }^\circ\text{C}$	75
Figura 75	Tensões entre drain e source e entre gate e source medidas com o osciloscópio para $G=846 \text{ W/m}^2$ e $T=66,5 \text{ }^\circ\text{C}$	75
Figura 76	Tensão e corrente entre drain e source medidas com o osciloscópio para $G=775 \text{ W/m}^2$ e $T=66,5 \text{ }^\circ\text{C}$	76
Figura 77	Transiente de curto circuito a circuito aberto medido com o traçador desenvolvido para $G=775 \text{ W/m}^2$ e $T=66,5 \text{ }^\circ\text{C}$	76
Figura 78	Traçador MINI-KLA.....	78
Figura 79	Interface do traçador MINI-KLA.....	79
Figura 80	Experimento montado para validação do traçador desenvolvido.....	79
Figura 81	Dados de irradiância solar e temperatura para o módulo KS 20 T no dia 11/02/2016.....	80
Figura 82	Curvas IxV medidas com o traçador desenvolvido para as situações 1, 6, 8, 11 e 13 descritas na Tabela 3.....	81
Figura 83	Curvas PxV medidas com o traçador desenvolvido para as situações 1, 6, 8, 11 e 13 descritas na Tabela 3.....	82
Figura 84	Erros percentuais dos parâmetros elétricos medidos com o traçador desenvolvido em relação ao traçador comercial para o módulo KS 20 T.....	82

Figura 85	Potência máxima medida para cada situação mostrada na Tabela 3...	83
Figura 86	Fator de forma calculado para cada situação mostrada na Tabela 3....	84
Figura 87	Correntes de curto circuito e tensões de circuito aberto medidas com os dois traçadores para situações mostradas na Tabela 3.....	85
Figura 88	Correntes e tensões nos pontos de potência máxima medidas com os dois traçadores para situações mostradas na Tabela 3.....	85
Figura 89	Dados de irradiância solar e temperatura para o módulo KC 85 T no dia 01/03/2016.....	86
Figura 90	Curvas IxV medidas com o traçador desenvolvido para as situações 13, 14, 15, 16, 17 e 18 descritas na Tabela 6.....	88
Figura 91	Curvas PxV medidas com o traçador desenvolvido para as situações 13, 14, 15, 16, 17 e 18 descritas na Tabela 6.....	88
Figura 92	Erros percentuais dos parâmetros elétricos medidos com o traçador desenvolvido em relação ao traçador comercial para o módulo KC 85 T.....	89
Figura 93	Potência máxima medida para cada situação mostrada na Tabela 6...	90
Figura 94	Fator de forma calculado para cada situação mostrada na Tabela 6....	90
Figura 95	Correntes de curto circuito e tensões de circuito aberto medidas com os dois traçadores para situações mostradas na Tabela 6.....	91
Figura 96	Correntes e tensões nos pontos de máxima potência medidas com os dois traçadores para situações mostradas na Tabela 6.....	91
Figura 97	Dados de irradiância solar e temperatura para o módulo TSM 160 no dia 25/02/2016.....	92
Figura 98	Curvas IxV medidas com o traçador desenvolvido para as situações 2, 5, 9, 12, 16 e 20 descritas na Tabela 9.....	93
Figura 99	Curvas PxV medidas com o traçador desenvolvido para as situações 2, 5, 9, 12, 16 e 20 descritas na Tabela 9.....	94
Figura 100	Erros percentuais dos parâmetros elétricos medidos com o traçador desenvolvido em relação ao traçador comercial para o módulo TSM 160.....	94
Figura 101	Potência máxima medida para cada situação mostrada na Tabela 9...	95
Figura 102	Fator de forma calculado para cada situação mostrada na Tabela 9....	96

Figura 103	Correntes de curto circuito e tensões de circuito aberto medidas com os dois traçadores para situações mostradas na Tabela 9.....	96
Figura 104	Correntes e tensões nos pontos de potência máxima medidas com os dois traçadores para situações mostradas na Tabela 9.....	97
Figura 105	Curva IxV para o módulo KC85T sombreado nas condições de $G=351 \text{ W/m}^2$ e $T=53,2 \text{ }^\circ\text{C}$	98
Figura 106	Curva PxV para o módulo KC85T sombreado nas condições de $G=351 \text{ W/m}^2$ e $T=53,2 \text{ }^\circ\text{C}$	98
Figura 107	Transiente de caracterização obtido com o traçador MINI-KLA nas condições de $G=351 \text{ W/m}^2$ e $T=53,2 \text{ }^\circ\text{C}$	99
Figura 108	Transiente de caracterização obtido com o traçador desenvolvido nas condições de $G=351 \text{ W/m}^2$ e $T=53,2 \text{ }^\circ\text{C}$	99
Figura 109	Curva IxV para o módulo KC85T sombreado nas condições de $G=418 \text{ W/m}^2$ e $T=56,7 \text{ }^\circ\text{C}$	100
Figura 110	Curva PxV para o módulo KC85T sombreado nas condições de $G=418 \text{ W/m}^2$ e $T=56,7 \text{ }^\circ\text{C}$	101
Figura 111	Transiente de caracterização obtido com o traçador desenvolvido nas condições de $G=418 \text{ W/m}^2$ e $T=56,7 \text{ }^\circ\text{C}$	101
Figura 112	Transiente de caracterização obtido com o traçador MINI-KLA nas condições de $G=418 \text{ W/m}^2$ e $T=56,7 \text{ }^\circ\text{C}$	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Resumo dos trabalhos pesquisados.....	31
Tabela 2	Parâmetros elétricos em STC para o módulo FV KS 20T.....	80
Tabela 3	Situações de teste e validação do traçador desenvolvido para o módulo KS 20 T.....	81
Tabela 4	Erros máximos, mínimos e médios para cada parâmetro medido (módulo KS 20 T).....	83
Tabela 5	Parâmetros elétricos em STC para o módulo FV KC 85 T.....	86
Tabela 6	Situações de teste e validação do traçador desenvolvido para o módulo KC 85 T.....	87
Tabela 7	Erros máximos, mínimos e médios para cada parâmetro medido (módulo KC 85 T).....	89
Tabela 8	Parâmetros elétricos em STC para o módulo FV TSM 160.....	92
Tabela 9	Situações de teste e validação do traçador desenvolvido para o módulo TSM 160.....	93
Tabela 10	Erros máximos, mínimos e médios para cada parâmetro elétrico (módulo TSM 160).....	95
Tabela 11	Parâmetros elétricos obtidos com os 2 traçadores para o módulo KC 85 T sombreado nas condições de $G=351 \text{ W/m}^2$ e $T=53,2 \text{ }^\circ\text{C}$	99
Tabela 12	Parâmetros elétricos obtidos com os 2 traçadores para o módulo KC85T sombreado nas condições de $G=418 \text{ W/m}^2$ e $T=56,7 \text{ }^\circ\text{C}$	100

LISTA DE SÍMBOLOS

A	[m ²]	Área do módulo FV
FF	[%]	Fator de Forma do módulo FV
G	[W/m ²]	Irradiância Solar
I_{ph}	[A]	Fotocorrente
I_{PV}	[A]	Corrente gerada pelo módulo FV
I_d	[A]	Corrente que flui pelo diodo
I_{Rp}	[A]	Corrente que flui pela resistência paralela
I_0	[A]	Corrente de saturação do diodo
I_{ds}	[A]	Corrente que flui entre <i>drain</i> e <i>source</i>
I_{mpp}	[A]	Corrente no ponto de potência máxima
I_{SC}	[A]	Corrente de curto circuito do módulo FV
I_{SCSTC}	[A]	Corrente de curto circuito do módulo FV para condições STC
k_b	[J/K]	Constante de Boltzman
K_n	[A/V ²]	Coefficiente específico de construção do MOSFET
m	[-]	Fator de idealidade do diodo
P_{mpp}	[W]	Potência máxima gerada pelo módulo FV
q	[C]	Carga do elétron
R_s	[Ω]	Resistência série do modelo representativo de uma célula FV
R_p	[Ω]	Resistência paralela do modelo representativo de uma célula FV
T	[°C]	Temperatura do módulo FV
V_{OC}	[V]	Tensão de circuito aberto do módulo FV
V_{mpp}	[V]	Tensão no ponto de potência máxima
V_{OCSTC}	[V]	Tensão de circuito aberto do módulo FV para condições STC
V_{pv}	[V]	Tensão gerada pelo módulo FV
V_{ds}	[V]	Tensão entre <i>drain</i> e <i>source</i>
V_{gs}	[V]	Tensão entre <i>gate</i> e <i>source</i>
V_{th}	[V]	Tensão de <i>threshold</i>
V_{alim}	[V]	Tensão de alimentação do PIC
α	[%]	Coefficiente da variação da corrente de curto circuito com a

		temperatura
β	[mV/°C]	Coeficiente da variação da tensão de circuito aberto com a temperatura
η	[%]	Eficiência do módulo FV
γ	[%/°C]	Coeficiente da variação da potência máxima com a temperatura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos do Trabalho	3
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	<i>3</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>3</i>
1.2	Estrutura do Trabalho	3
2	TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA	5
2.1	Contexto Histórico	5
2.2	Irradiação Solar	5
2.3	Efeito Fotovoltaico	7
2.4	Células e Módulos Fotovoltaicos	8
<i>2.4.1</i>	<i>Tipos de Células</i>	<i>8</i>
<i>2.4.2</i>	<i>Módulo FV</i>	<i>9</i>
<i>2.4.3</i>	<i>Características das Células FV</i>	<i>10</i>
<i>2.4.3.1</i>	<i>Parâmetros Elétricos e Curva $I \times V$</i>	<i>10</i>
<i>2.4.3.1.1</i>	<i>Influência da Variação de Irradiância Solar</i>	<i>12</i>
<i>2.4.3.1.2</i>	<i>Influência da Variação de Temperatura</i>	<i>13</i>
<i>2.4.3.1.3</i>	<i>Influência da Variação de Resistência Série</i>	<i>14</i>
<i>2.4.3.1.4</i>	<i>Influência da Variação de Resistência Paralela (ou Shunt)</i>	<i>15</i>
<i>2.4.3.2</i>	<i>Parâmetros Térmicos</i>	<i>16</i>
2.5	Circuito Equivalente de uma Célula Solar	17
2.6	Conclusões do Capítulo	18
3	ANOMALIAS NAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE MÓDULOS FV .	19
3.1	Tipos de Perdas em Módulos FV	19
3.2	Sujidade	20
3.3	Sombreamento	22

3.4	Conclusões do Capítulo	26
4	ESTADO DA ARTE DE TRAÇADORES DE CURVA IxV PARA MÓDULOS FV	27
4.1	Métodos de Caracterização	27
4.2	Revisão Bibliográfica	31
4.3	Conclusões do Capítulo	48
5	PROTÓTIPO DESENVOLVIDO DE TRAÇADOR DE CURVA IxV	49
5.1	Descrição Experimental.....	49
5.1.1	<i>Descrição da Carga Eletrônica Utilizada</i>	50
5.1.2	<i>Estágio de Potência</i>	51
5.1.3	<i>Estágio de Comando</i>	52
5.1.4	<i>Instrumentação</i>	54
5.1.4.1	<i>Medições de Corrente</i>	54
5.1.4.2	<i>Medições de Tensão</i>	56
5.1.4.3	<i>Medições de Temperatura</i>	56
5.1.4.4	<i>Medições de Irradiância Solar</i>	59
5.1.5	<i>Sistema de Aquisição de Dados</i>	60
5.1.6	<i>Fonte de Alimentação</i>	63
5.1.7	<i>Interface Gráfica para Usuário</i>	64
5.2	Simulação no Software Proteus.....	68
5.2.1	<i>Simulação do Instante de Curto Circuito</i>	69
5.2.2	<i>Simulação do Instante de Circuito Aberto</i>	70
5.2.3	<i>Simulações do Acionamento do Estágio de Comando</i>	70
5.2.3.1	<i>Simulação da Primeira Forma de Acionamento do Estágio de Comando</i>	71
5.2.3.2	<i>Simulação da Segunda Forma de Acionamento do Estágio de Comando</i>	72
5.3	Medições com Osciloscópio.....	73
5.4	Conclusões do Capítulo	77

6	RESULTADOS E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL	78
6.1	Procedimentos para Validação Experimental	78
6.2	Medições com o Módulo KS 20 T	80
6.3	Medições com o Módulo KC 85 T	86
6.4	Medições com o Módulo TSM 160	92
6.5	Medições para Identificação de Sombreamento	97
6.6	Conclusões do Capítulo	102
7	CONCLUSÕES	103
7.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	105
7.2	Artigos Publicados em Congresso	105
8	REFERÊNCIAS	106
	APÊNDICES	112

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com o aquecimento global é crescente cada vez mais nos países desenvolvidos e nos países em desenvolvimento. Os agravamentos dos problemas ambientais nos últimos anos e a conscientização global levaram, recentemente, ao acordo climático firmado na Conferência do Clima de Paris (21ª Conferência das Partes - COP21). O acordo assinado pelos 195 países membros da UNFCCC (Convenção-Quadro das Nações Unidas para Mudanças Climáticas) objetiva limitar o aquecimento máximo do planeta numa temperatura abaixo de 2 °C. Para conseguir atender este limite os países terão que emitir menos gás carbônico além de adotar fontes de energias renováveis como a solar, hidráulica e eólica.

Neste contexto, o Brasil vem adotando medidas jurídicas mais sofisticadas para favorecer o uso de energias renováveis. Um exemplo disso foi a aprimoração realizada, em 2015, na Resolução Normativa 482/2012 que criou o sistema de compensação de energia elétrica. Esta resolução determinou que quando a quantidade de energia gerada em determinado mês for superior à energia consumida naquele período, o consumidor fica com créditos que podem ser utilizados para diminuir a fatura dos meses seguintes. Com as novas regras que entraram em vigor em 1º de março de 2016 o prazo de validade para uso dos créditos passou de 36 para 60 meses. Além disso, foi criada a possibilidade de instalação de geração distribuída em condomínios, sendo que a energia gerada pode ser repartida entre os condôminos em porcentagens definidas pelos próprios consumidores. Desde a publicação da Resolução em 2012 até outubro de 2015 foram instaladas 1285 centrais geradoras, sendo 1233 com a fonte solar fotovoltaica, 31 eólicas, 13 híbridas (solar/eólica), 6 movidas a biogás, 1 a biomassa e 1 hidráulica. (ANEEL, 2016)

Outros fatores que tenderam a aumentar a demanda pela energia solar foram o primeiro e o segundo leilões de energia de reserva que foram realizados em 2015. No primeiro leilão, foram contratados 30 empreendimentos de geração de energia solar através de módulos fotovoltaicos. A capacidade total chegou a 1043 MWp e o preço médio do leilão ficou em R\$ 301,79/MWh. A previsão de investimentos deste leilão foi de R\$ 4,3 bilhões com os empreendimentos localizados nos Estados da Bahia, Piauí, Paraíba, Minas Gerais e Tocantins. No segundo leilão, foram contratados 20 projetos de geração de energia eólica e 33 projetos de geração de energia solar através de módulos fotovoltaicos. A capacidade contratada, neste leilão, foi de 548,2 MW em energia eólica e 1115 MWp em energia solar. O

preço médio contratado para energia solar foi de R\$ 297,75/MWh e para energia eólica foi de R\$ 203,46/MWh. O total de investimento, neste leilão, chegou a R\$ 6,8 bilhões. (EPE, 2016)

Segundo dados da (ANEEL, 2016) a matriz energética brasileira é constituída majoritariamente por usinas hidrelétricas, estas possuem uma participação de aproximadamente 61,1% na matriz. Em complementariedade a esta fonte estão as usinas termoelétricas que respondem por aproximadamente 27,8% da matriz.

Apesar das hidrelétricas serem um tipo de fonte de energia alternativa, as mesmas possuem alguns impactos negativos, pois em diversos casos é necessário realocar todos os habitantes de uma ou várias cidades o que leva a impactos sociais e culturais. (BORGES NETO; CARVALHO, 2012)

Dados da (ANEEL, 2016) indicam que a geração de energia elétrica através de módulos fotovoltaicos corresponde a aproximadamente 0,02% da matriz energética brasileira. Esta forma de geração tende a ser bastante promissora e com crescente participação na matriz. A pequena participação desta forma de geração se deve à baixa eficiência das células solares juntamente com o elevado custo de produção das mesmas, fatores que devem ser alterados no futuro. (CORRÊA, 2015)

Apesar dos módulos fotovoltaicos apresentarem uma estrutura elétrica simples para uso, sua manutenção deve ser contínua e periódica para garantir que os mesmos estejam operando em condições esperadas. Deste modo, uma análise elétrica do funcionamento dos módulos é necessária para diagnosticar possíveis problemas como sombreamento, conexões internas defeituosas, rachaduras no vidro e sujidade.

Para encontrar os problemas mencionados é necessário a observação e o estudo da curva corrente-tensão (IxV) do módulo. Esta curva é característica de cada tipo de módulo e expressa os principais parâmetros elétricos do mesmo. Os fabricantes dos módulos muitas vezes fornecem esta curva juntamente com os principais parâmetros elétricos do módulo no catálogo do produto, mas apenas para as condições de teste padrão. Essas condições raramente são encontradas em campo, sendo condições típicas de testes laboratoriais.

Para caracterizar eletricamente o módulo são utilizados equipamentos denominados de traçadores de curva IxV. Estes são capazes de extrair a curva IxV do módulo para qualquer condição de irradiância solar e temperatura do mesmo. Existem vários fabricantes deste equipamento, mas seu valor é elevado devido às taxas de importação. Além disso, estão disponíveis vários tipos de traçadores que são capazes de medir curvas IxV de módulos ou painéis com diversos módulos. Quanto maiores os limites de corrente e tensão que o traçador for capaz de medir maior é o seu preço.

O uso de traçadores em painéis com muitos módulos é ainda mais necessário devido a fatores como perdas por cabeamento, desacoplamento entre módulos e envelhecimento poderem ocasionar grandes perdas de energia elétrica. Além disso, o arquivamento de curvas IxV é mais uma ferramenta para diagnósticos rápidos de problemas em grandes usinas solares.

1.1 Objetivos do Trabalho

1.1.1 Objetivo Geral

A presente dissertação tem como objetivo geral o desenvolvimento de um traçador de curva IxV para uso em módulos fotovoltaicos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudo sobre a tecnologia fotovoltaica e sobre as anomalias nas curvas IxV de módulos fotovoltaicos;
- Levantamento de estado da arte sobre traçadores de curva IxV;
- Simulação de um circuito elétrico que possa representar um traçador de curva IxV;
- Desenvolvimento de uma interface computacional para interação com o usuário do traçador de curva IxV desenvolvido;
- Projeto e instalação de um circuito elétrico capaz de traçar a curva IxV de um módulo fotovoltaico;
- Validação das curvas IxV com e sem sombreamento obtidas com o traçador desenvolvido através da comparação com as curvas obtidas de um traçador comercial.

1.2 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação foi organizada em 7 capítulos. No capítulo 1 foi visto a contextualização geral da temática da dissertação juntamente com seus objetivos. No capítulo

2 são explicados os princípios sobre a tecnologia fotovoltaica. São abordados o efeito fotovoltaico, os tipos de células solares e as influências existentes sobre a curva IxV de módulos fotovoltaicos. No capítulo 3 são expostos os tipos de anomalias nas curvas IxV e como identificá-los. No capítulo 4 são expostas as maneiras com as quais é possível traçar a curva IxV através do estado da arte sobre traçadores de curva IxV para módulos fotovoltaicos. No capítulo 5 é mostrado o método de funcionamento do traçador desenvolvido incluindo a simulação do circuito elétrico representativo do mesmo. No capítulo 6 são mostrados os resultados e a validação do traçador desenvolvido através da comparação com o traçador comercial MINI-KLA. No capítulo 7 são expostas as conclusões do trabalho desenvolvido além das recomendações para trabalhos futuros.

2 TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

Neste capítulo serão abordados os principais conceitos sobre a tecnologia fotovoltaica. Além do contexto histórico sobre essa tecnologia serão apresentados o princípio de funcionamento, os tipos, as características elétricas/térmicas e o circuito equivalente das células fotovoltaicas.

2.1 Contexto Histórico

Em 1839, foi observado pela primeira vez o efeito fotovoltaico (FV) por Edmond Becquerel ao constatar o surgimento de uma diferença de potencial entre eletrodos imersos numa solução ácida iluminada. Após esta descoberta, em 1883, as primeiras células solares foram fabricadas em selênio e desenvolvidas por C. E. Frits. Mais de um século após este fato, foram desenvolvidas as primeiras células FV baseadas na tecnologia de semicondutores nos Laboratórios Bell, nos EUA, em 1950. Estas células já conseguiam atingir eficiência na conversão de energia de até 6%. Com o início de corrida espacial desenvolvida durante a guerra fria muito se aprimorou na eficiência de conversão dessas células e em 2007, nos EUA, chegou-se a obter mais de 42% de eficiência no uso de células de silício. (VALENTE, 2011)

Desde a criação das primeiras células solares para os tempos atuais houve uma significativa redução no preço dessa tecnologia. Na década de 70, nos EUA, o Watt-pico era vendido a U\$ 150,00 e no final de 2013 o mesmo era vendido a U\$ 0,65. Este fato se deve principalmente ao elevado grau de purificação dos materiais semicondutores que vem sendo aprimorado anualmente e a difusão mundial cada vez maior desse meio de geração de energia elétrica. (PINHO; GALDINO, 2014)

O mercado mundial é dominado pelas células fabricadas a partir do silício cristalino. Além do silício existem outros materiais que são utilizados a partir de novas tecnologias como as células de filme fino.

2.2 Irradiação Solar

Segundo (TRENBERTH; FASULLO; KIEHL, 2009) apenas 47,2% de toda a irradiância que chega ao planeta Terra é absorvida pela superfície terrestre, pois 23,1% é refletida pela atmosfera, 22,9% é absorvida pela atmosfera e 6,7% é refletida pela superfície terrestre. Assim de toda potência disponibilizada pelo Sol à Terra chega, aproximadamente,

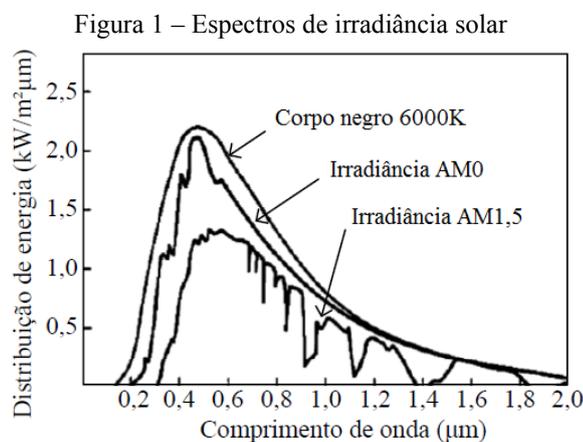
54% à superfície terrestre, correspondendo a um valor próximo de 94 mil TW. Este valor de potência seria o suficiente para em poucas horas suprir a demanda de energia mundial durante todo um ano.

A irradiação solar na superfície terrestre é composta de 3 componentes: a direta (ou de feixe), a difusa e a refletida (ou albedo). A primeira é composta dos raios solares que atingem diretamente a superfície, a segunda é composta por raios solares que se espalham pela atmosfera terrestre chegando na superfície de forma difusa e a terceira é a parcela que se espalha a partir da reflexão na superfície terrestre.

Em dias ensolarados com poucas nuvens ao menos 20% de toda a irradiação que chega à superfície é oriunda de irradiação difusa enquanto que em dias nublados esta relação pode chegar a 100%. Deste modo, é importante que os painéis FV estejam posicionados diretamente para o Sol para que chegue à sua superfície a maior quantidade possível de irradiação direta. Alguns sistemas de seguimento solar conseguem maximizar a geração de energia elétrica em painéis solares devido aos mesmos ficarem todo o tempo de exposição ao Sol recebendo mais irradiação direta do que difusa. (PINHO; GALDINO, 2014)

Outro fator que interfere na quantidade de energia elétrica gerada por um painel FV é o coeficiente Massa de Ar (AM, do inglês *Air Mass*) que é influenciado pelo ângulo zenital do sol, da distância Terra-Sol e das condições atmosféricas e meteorológicas do local. Por exemplo, quando AM possui valor igual a 1 significa que o sol encontra-se no zenite (ângulo zenital igual a 0°), para valor de AM igual a 2 significa que o sol encontra-se num ângulo zenital igual a 60° .

Na Figura 1 são mostrados os espectros de irradiância solar para AM0; AM1,5 e para um corpo negro a 6000 K (temperatura próxima da superfície do sol) que possui uma distribuição espectral semelhante a luz do sol.



Fonte: (BRIGHENTI, 2014)

2.3 Efeito Fotovoltaico

O efeito FV é um fenômeno físico caracterizado por ser a conversão de energia luminosa para energia elétrica. As células FV são os dispositivos utilizados para esta conversão, constituídas por material semicondutor onde estão presentes duas camadas energéticas denominadas de banda de valência e banda de condução. A separação entre estas duas é a denominada de banda proibida (ou *gap*) que para o silício cristalino possui valor de 1,12 eV. (SURICHAQUI, 2015)

Quando um elemento como o boro que possui três elétrons forma uma ligação com o silício que possui quatro elétrons ocorre à formação de uma lacuna que é um vazio na rede cristalina ocasionada pela falta de um elétron. Neste tipo de ligação o boro é conhecido como dopante do tipo P. Já para o caso do silício se unir com um elemento como o fósforo que possui cinco elétrons ocorre à presença de um elétron não emparelhado na ligação, na exposição desta a uma determinada quantidade de energia térmica ocorre à passagem do elétron não emparelhado da banda de valência para a de condução, por isso o fósforo é conhecido como dopante do tipo N. (MARCOLINO, 2011)

Numa lâmina de silício puro ao se adicionar fósforo numa metade e na outra se adicionar boro será formada uma junção PN. Os elétrons livres do lado N migram para o lado P composto de lacunas livres e forma-se uma corrente de portadores que só termina quando o lado N fica positivamente carregado devido à falta de elétrons e o lado P fica negativamente carregado devido ao excesso de elétrons. Neste instante, forma-se um campo elétrico que barra a continuidade do processo e forma-se uma zona de depleção entre as duas camadas caracterizada pela inexistência de portadores.

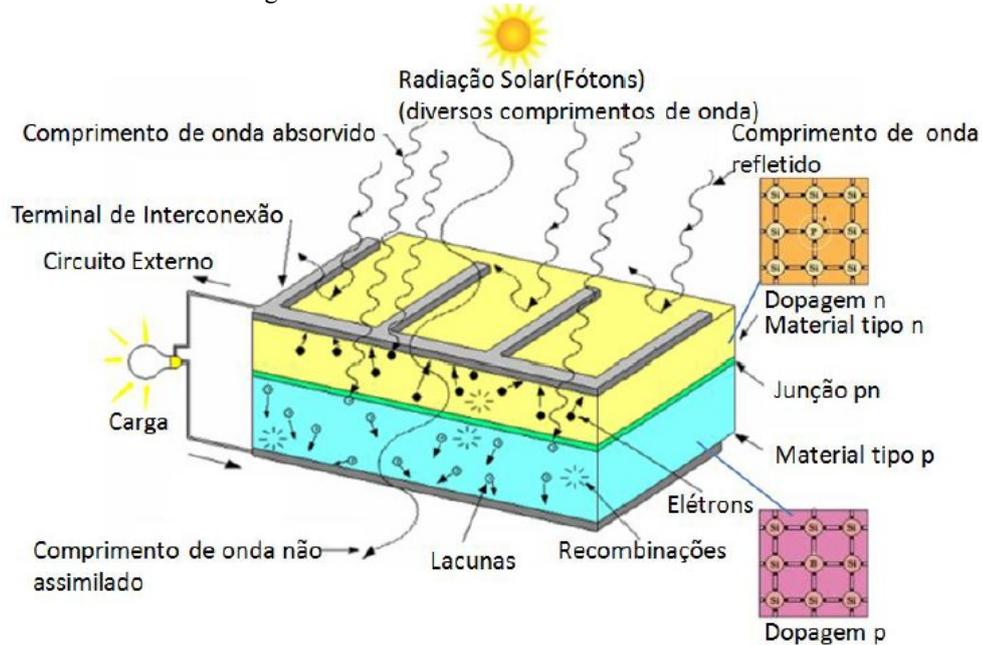
Se a junção PN for exposta a fótons com energia maior do que a de *gap* para o material semicondutor utilizado ocorre a fotogeração de pares elétrons-lacunas dando origem a uma corrente elétrica. A diferença de potencial causada por este deslocamento de cargas é o denominado efeito fotovoltaico.

Nas células FV, geralmente, o dopante tipo N fica exposto ao sol na parte frontal e possui uma espessura da ordem de 0,2 a 0,5 μm . Já o dopante do tipo P possui uma espessura muito maior da ordem de 200 a 300 μm . (GASPARIN, 2009)

Deve-se observar que nem todos os fótons que chegam ao material semicondutor são utilizados para a conversão de energia, somando-se este fato aos fenômenos de recombinação e injeção de pares elétrons-lacunas; e reflexão da luz solar que ocorre na superfície da célula tem-se uma resposta à baixa eficiência de conversão das células FV.

Na Figura 2 é mostrada uma representação de uma célula FV com a junção PN em destaque e o fluxo de cargas dando origem ao efeito FV. Ressalta-se que os tamanhos das camadas P e N são meramente ilustrativos, pois na junção a camada P é muito maior do que a camada N.

Figura 2 – Modelo funcional de uma célula FV



Fonte: (CORRÊA, 2015)

2.4 Células e Módulos Fotovoltaicos

2.4.1 Tipos de Células

O tipo de célula mais comercializada no mundo é a de silício. Existem três tipos de células de silício: as mono cristalinas (m-Si), as poli cristalinas (p-Si) e as de silício amorfo (a-Si).

As células m-Si são as mais comercializadas e utilizadas. Sua eficiência sob condições controladas de temperatura e irradiância solar em laboratório pode chegar próximo de 26%. Já as células p-Si possuem um grau de pureza menor devido a um processo com uso restrito de energia visando um preço menor quando comparado com as das células m-Si. Devido a isso sua eficiência é menor do que as últimas situando-se próximo de 21% em condições controladas em laboratório. (GREEN et al., 2015)

Atualmente, o tipo de célula que possui a melhor relação entre preço e eficiência são as construídas por silício cristalino. Mas uma nova tecnologia vem sendo desenvolvida com um consumo menor de energia no processo de fabricação e preços mais competitivos. Essas são as denominadas células de filme fino que possuem uma eficiência entre 8% e 10%. Além do baixo preço elas possuem uma vantagem inovadora, pois as mesmas são flexíveis podendo se adaptar a diversos tipos de superfícies irregulares. O fator negativo dessa tecnologia é o uso de materiais tóxicos que podem agredir significativamente o meio ambiente. Os principais materiais utilizados são silício amorfo; telureto de cádmio (*CdTe*); arseneto de gálio (*GaAs*); disseleneto de cobre e índio (*CIS*); e multijunção de silício (a-Si/c-Si). Estas últimas são uma combinação das tecnologias de silício cristalino e amorfo. (EL CHAAR; LAMONT; EL ZEIN, 2011)

Outras tecnologias de células FV que estão sendo desenvolvidas são as células foto eletroquímicas (células de Grätzel), as células de polímero e as células orgânicas. As primeiras se assemelham a baterias, pois utilizam a energia solar como força eletromotriz para promover reações eletroquímicas. Sua sensibilização ocorre por corantes nano-cristalinos e sua eficiência varia entre 5% e 11%. As células de polímero e as orgânicas são construídas a partir de semicondutores orgânicos. A grande vantagem do uso destes tipos de células é sua descartabilidade, pois em grande parte são formadas por plástico. Outra vantagem é o consumo menor de energia no processo de fabricação quando comparado com as células de silício. (ORTEGA, 2013)

2.4.2 Módulo FV

Os módulos FV são associações em série e/ou paralelo das células FV de forma que se tenham tensões e correntes maiores. As associações de vários módulos tanto em série como em paralelo dão origem aos painéis FV que são estruturas que fornecem quantidades de potência maiores capazes de abastecer casas ou até mesmo cidades.

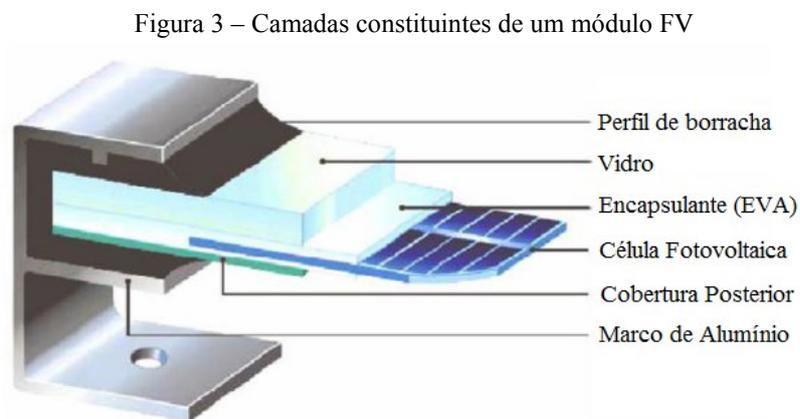
Segundo (GASPARIN, 2009) a estrutura do módulo é composta pelas seguintes camadas: cobertura, encapsulante, cobertura posterior, moldura e caixa de conexões.

O material mais utilizado na parte da cobertura é o vidro temperado devido a sua alta transparência e facilidade de limpeza. O encapsulante mais utilizado é o acetato de etil vinila, também denominado de EVA (do inglês, *Ethylene-Vinyl Acetate*), devido a sua boa capacidade de aderência as células.

O Tedlar é o material usualmente utilizado na camada posterior devido a sua rigidez dielétrica garantir um isolamento elétrico adequado para o módulo. Além disso, o Tedlar possui uma baixa resistência térmica o que é ideal para haver uma boa dissipação térmica no módulo.

A moldura é a parte que confere resistência mecânica ao módulo, geralmente alumínio é utilizado. A caixa de conexões é a parte onde ficam os terminais de conexão do módulo além de diodos que são utilizados como *bypass*.

Na Figura 3 são mostradas as principais camadas que compõem o módulo FV.



Fonte: (LUNA, 2013)

2.4.3 Características das Células FV

2.4.3.1 Parâmetros Elétricos e Curva IxV

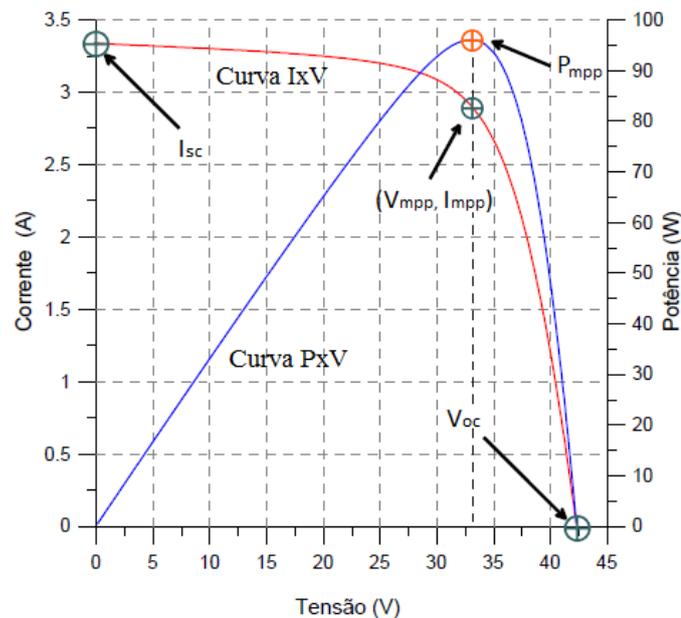
Os parâmetros elétricos de um módulo FV geralmente são fornecidos pelos fabricantes para condições específicas denominadas de condições de teste padrão ou STC (do inglês, *Standard Test Conditions*). Essas condições são: irradiância solar no plano incidente do módulo igual a 1000 W/m^2 , temperatura da célula igual a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e massa de ar (AM) igual a 1,5.

A curva IxV de um módulo FV é o comportamento da corrente em função da tensão nos terminais do módulo para condições específicas de temperatura e irradiância solar. Os parâmetros elétricos do módulo são retirados desta curva e são utilizados como um meio de monitoramento dos mesmos.

Na Figura 4 são mostradas as curvas IxV e PxV de um módulo FV, os principais parâmetros destas são:

- a) Corrente de curto circuito (I_{sc}): é a corrente máxima que um módulo pode produzir sendo que a tensão nos seus terminais é nula;
- b) Tensão de circuito aberto (V_{oc}): é a tensão máxima que um módulo pode gerar de forma que não haja corrente elétrica pelos seus terminais;
- c) Potência máxima (P_{mpp}): é o valor máximo de potência que pode ser gerado para determinadas condições de temperatura e irradiância solar; a sigla mpp deriva do inglês significando *maximum power point*;
- d) Corrente no ponto de potência máxima (I_{mpp}): é a corrente correspondente ao ponto no qual o módulo consegue produzir a potência máxima;
- e) Tensão no ponto de potência máxima (V_{mpp}): é a tensão correspondente ao ponto no qual o módulo consegue produzir a potência máxima;
- f) Fator de forma (FF): é um parâmetro, expresso pela Eq. (2.1), que indica a qualidade das células. Seu valor pode variar entre 0 e 1. Quanto mais novo o módulo FV maior será seu fator de forma. Para células cristalinas o FF possui valores entre 0,7 a 0,85 e para células de silício amorfo entre 0,5 a 0,7; (Rodrigues, 2009)

Figura 4 – Curva característica (IxV) em vermelho e curva de potência versus tensão (PxV) em azul de um módulo FV (m-Si, 72 células)



Fonte: Adaptado de (BÜHLER, 2007)

$$FF = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.1)$$

g) Eficiência: é definida como sendo o quociente entre a máxima potência que pode ser entregue a uma carga e a potência que incide sobre o plano coletor do módulo FV. Ou seja, é um parâmetro que indica a quantidade de energia solar que pode ser convertida em energia elétrica. A Eq. (2.2) mostra que a eficiência é inversamente proporcional à irradiância solar incidente (G) e à área do plano coletor (A).

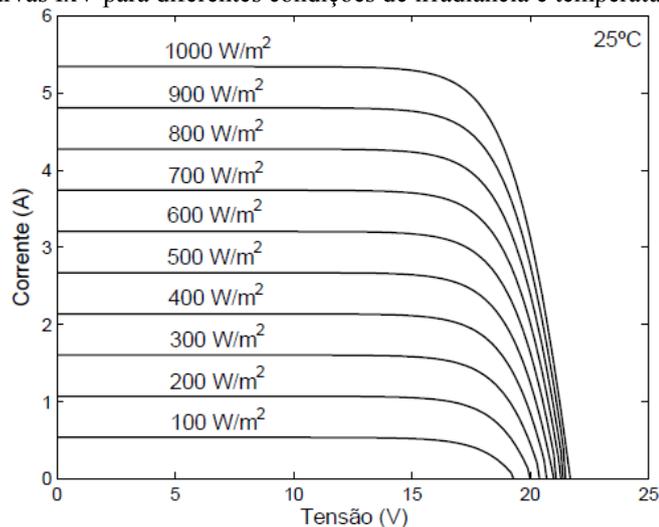
$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{A \cdot G} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

2.4.3.1.1 Influência da Variação de Irradiância Solar

Um dos fatores que altera a curva IxV de um módulo FV é a irradiância solar. Mantendo-se a temperatura constante e aumentando-se a irradiância, percebe-se um aumento proporcional na corrente de curto-circuito. Devido à relação entre tensão e corrente ser exponencial ocorre que a relação entre tensão e irradiância tem caráter logarítmico.

Na Figura 5 é mostrado o efeito do aumento da irradiância na curva IxV para uma temperatura constante e igual a 25 °C.

Figura 5 – Curvas IxV para diferentes condições de irradiância e temperatura igual a 25 °C

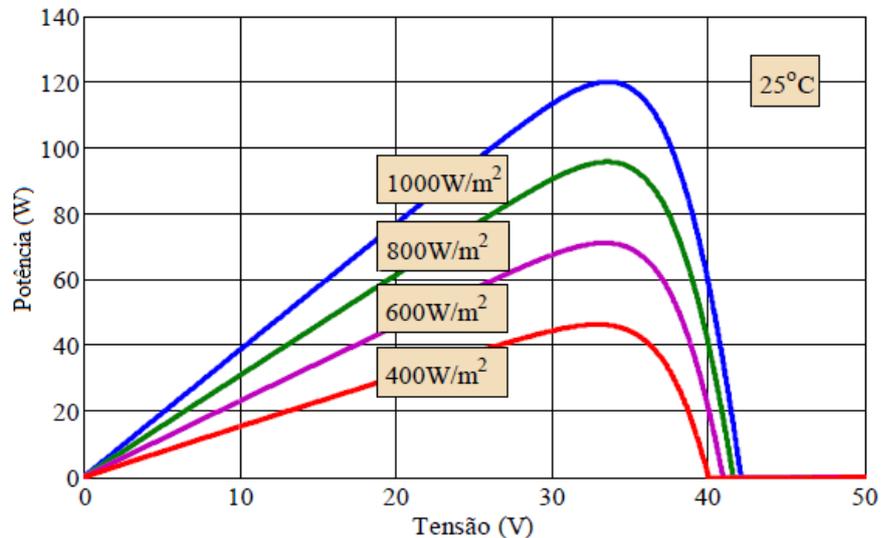


Fonte: (COSTA, 2010)

Na Figura 6 é mostrado o efeito do aumento da irradiância na curva PxV para uma temperatura do módulo FV constante e igual a 25 °C. Para uma variação de 400 W/m² a 1000

W/m^2 percebe-se que variação da corrente no ponto de potência máxima é maior do que a variação de tensão no ponto de potência máxima.

Figura 6 - Curvas PxV para diferentes condições de irradiância e temperatura igual a 25 °C



Fonte: Adaptado de (MATTOS, 2011)

2.4.3.1.2 Influência da Variação de Temperatura

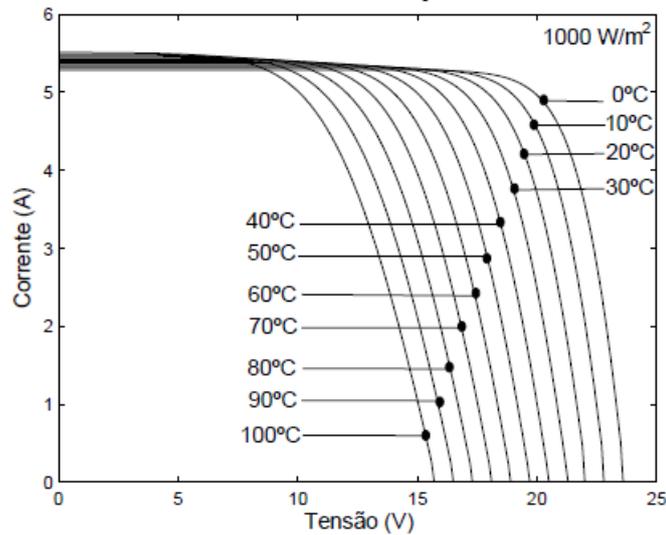
A temperatura é outro fator que interfere na forma da curva IxV. Diferentemente do que ocorre com a irradiância, onde o aumento desta desloca o ponto de potência máxima para cima, o aumento da temperatura desloca o ponto de potência máxima para o centro do gráfico influenciando negativamente na geração de energia elétrica.

O aumento da temperatura para uma condição de irradiância solar constante produz um pequeno aumento na corrente de curto circuito e uma redução na tensão de circuito aberto. Isso se deve ao aumento da corrente de portadores de carga minoritários (corrente de saturação) que é criada por excitação térmica.

Módulos que possuem boas resistências em relação aos efeitos do aumento da temperatura são os de silício amorfo.

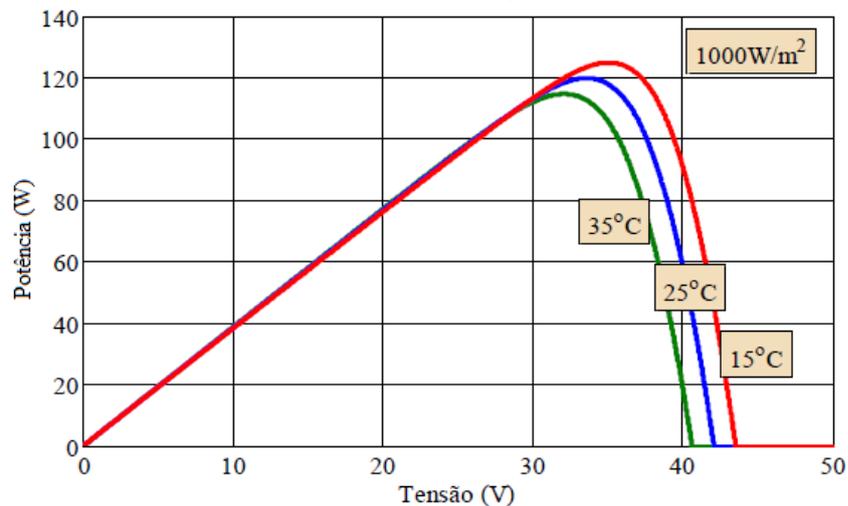
Na Figura 7 e na Figura 8 são mostradas, respectivamente, as curvas IxV e PxV para situações de irradiância constante e igual a 1000 W/m^2 ; e variações de temperatura.

Figura 7 – Curvas IxV determinadas a diferentes temperaturas e a 1000 W/m² de irradiância



Fonte: (COSTA, 2010)

Figura 8 – Curvas PxV determinadas a diferentes temperaturas e a 1000 W/m² de irradiância



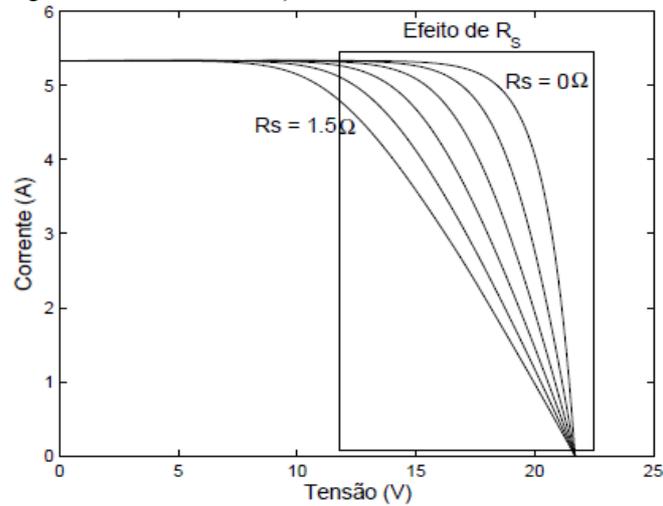
Fonte: Adaptado de (MATTOS, 2011)

2.4.3.1.3 Influência da Variação de Resistência Série

No circuito equivalente de uma célula FV está presente uma resistência em série que se origina dos contatos metálicos da célula e da junção metal-semicondutor. Valores elevados desta resistência acarretam um baixo FF e podem contribuir para um valor baixo também da corrente de curto-circuito, mas esta resistência não interfere de maneira significativa no valor da tensão de circuito aberto. Para valores muito elevados desta resistência a curva IxV característica da célula FV tende a possuir um formato retilíneo.

Na Figura 9 tem-se a variação da resistência série para condições constantes de irradiância solar e temperatura.

Figura 9 – Efeito da variação da resistência série na curva IxV



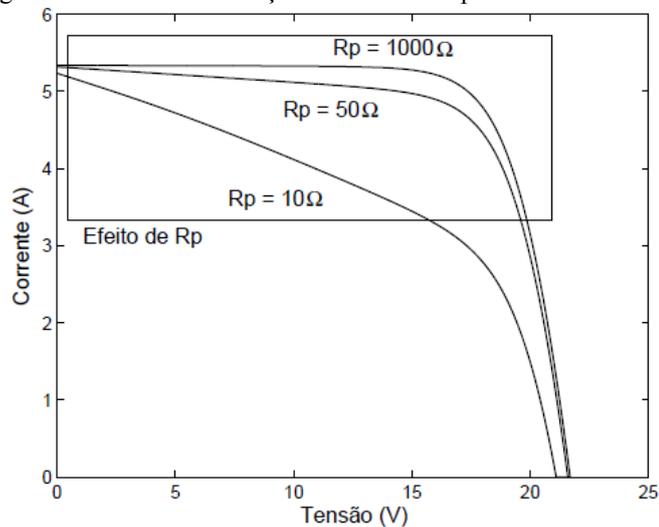
Fonte: (COSTA, 2010)

2.4.3.1.4 Influência da Variação de Resistência Paralela (ou Shunt)

Outra resistência que está presente no circuito equivalente de uma célula FV é a resistência em paralelo que se origina das impurezas e defeitos na estrutura do material semiconductor. Estes defeitos são acentuados nos locais próximos as bordas da célula e acarretam no surgimento de uma corrente de fuga que pode diminuir significativamente o valor da fotocorrente gerada. De forma oposta a resistência série, a resistência paralela deve possuir um valor elevado, pois valores pequenos podem acarretar valores menores de tensão de circuito aberto e baixo FF na curva IxV.

Na Figura 10 é mostrada a variação da resistência paralela para condições de irradiância solar e temperatura constantes.

Figura 10 – Efeito da variação da resistência paralela na curva IxV



Fonte: (COSTA, 2010)

2.4.3.2 Parâmetros Térmicos

Os parâmetros térmicos influenciam sobremaneira os parâmetros elétricos devido ao aumento da temperatura levar a um pequeno aumento na geração da fotocorrente. O *gap* de energia nos materiais semicondutores é dependente da temperatura e com aumento desta última ocorre um maior fluxo de carga da banda de valência para a de condução.

Os dois principais fatores térmicos presentes nas células FV são: o coeficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura e o coeficiente de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura. O primeiro expresso por α é mostrado na Eq. (2.3) de forma percentual, com valores típicos entre 0,06 %/°C e 1 %/°C numa relação entre a corrente de curto-circuito e a temperatura.

$$\alpha = \frac{\partial I_{SC}}{\partial T} \frac{1}{I_{SC}} \quad (2.3)$$

O segundo fator expresso por β na Eq. (2.4) irá influenciar principalmente a tensão de circuito aberto. A excitação térmica será elevada quando a temperatura aumentar acarretando o aumento da corrente de portadores minoritários (corrente de saturação) e conseqüentemente diminuindo o valor da tensão de circuito aberto.

Em (KING; KRATOCHVIL; BOYSON, 1997) são encontrados coeficientes β para vários módulos comerciais com valores variando entre -3,6 mV/°C e -4,6 mV/°C numa condição de irradiância solar igual a 1000 W/m² e AM igual a 1,5.

$$\beta = \frac{\partial V_{OC}}{\partial T} \quad (2.4)$$

Este parâmetro pode ser usado para cálculo da tensão de circuito aberto em temperaturas específicas a partir da Eq. (2.5).

$$V_{OC}(T) = V_{OC_{STC}}(1 + \beta \cdot (T - 25)) \quad (2.5)$$

É possível também expressar a corrente de curto circuito em uma temperatura específica da célula através do parâmetro α como é mostrado na Eq. (2.6).

$$I_{SC}(T) = I_{SC_{STC}}(1 + \alpha \cdot (T - 25)) \quad (2.6)$$

Outro parâmetro térmico importante que é utilizado para relacionar a potência máxima (potência de pico) com a temperatura da célula é o coeficiente γ mostrado na Eq. (2.7).

$$\gamma = \frac{\Delta P_{mpp}}{\Delta T} \quad (2.7)$$

Este coeficiente também é negativo com valores típicos da ordem de $-0,5 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ para módulos FV de silício cristalino e $-0,3 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ para módulos FV de silício amorfo.

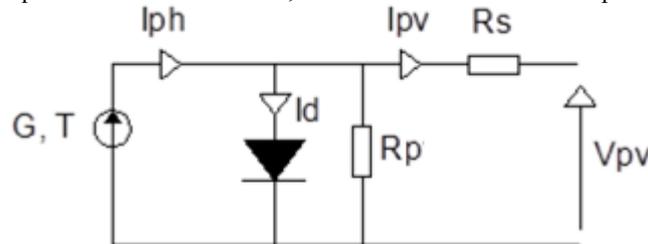
A tecnologia utilizada na fabricação dos módulos influencia diretamente os valores desses parâmetros. Módulos com pequenos valores de γ e β possuem menores perdas.

2.5 Circuito Equivalente de uma Célula Solar

Existem vários modelos de representação de uma célula FV, o mais utilizado é o modelo com um diodo, uma resistência série e uma resistência paralela.

Na Figura 11 o diodo está simbolizando a junção PN que é característica dos semicondutores. A fonte de corrente representa a fotocorrente gerada e as resistências representam as perdas da célula.

Figura 11 – Circuito equivalente com um diodo, uma resistência série e uma paralela de uma célula FV



Fonte: (LUNA, 2013)

A análise da Fig. 2.8 leva a Eq. (2.8) que representa a lei de Kirchhoff.

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d - I_{Rp} \quad (2.8)$$

Em (PIERRET, 1996) tem-se a Eq. (2.9) que expressa a corrente que flui pelo diodo em função da tensão aplicada na célula.

$$I_d = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{mk_b T} \right] - 1 \right\} \quad (2.9)$$

Substituindo-se a Eq. (2.9) na Eq. (2.8) e obtendo-se a queda de tensão na resistência paralela tem-se a Eq. (2.10) que expressa a corrente de saída de uma célula FV.

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{mk_b T} \right] - 1 \right\} - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (2.10)$$

A Eq. (2.10) não é linear sendo necessário um método iterativo para resolvê-la, em (REKIOUA; MATAGNE, 2012) é apontado o algoritmo de Levenberg-Marquardt como possível solução.

2.6 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foi explicado: o funcionamento das células FV através do efeito FV, os componentes de um módulo FV e os parâmetros elétricos/térmicos presentes nas células FV.

As curvas características IxV e PxV das células FV foram apresentadas e foi visto que as duas principais variáveis que alteram essas curvas são a irradiância solar e a temperatura. O aumento da irradiância tende a aumentar a corrente de curto circuito sendo um fator positivo para geração de energia elétrica. Já o aumento da temperatura tende a diminuir a tensão de circuito aberto sendo um fator negativo na geração de energia elétrica.

Além dessas variáveis foi visto que o circuito elétrico representativo da célula FV possui as resistências série e paralela que também interferem nas curvas IxV e PxV.

3 ANOMALIAS NAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE MÓDULOS FV

Neste capítulo são discutidos os principais fatores que causam distorções nas curvas IxV e PxV de módulos FV. O objetivo deste capítulo é mostrar a necessidade de uso dos traçadores de curva IxV para identificação destas anomalias através de uma inspeção visual qualitativa e de uma medição de desempenho quantitativa.

3.1 Tipos de Perdas em Módulos FV

As principais deficiências de desempenho em módulos FV abordam os seguintes pontos:

- Redução de corrente de curto circuito;
- Redução de tensão de circuito aberto;
- Perdas séries;
- Perdas paralelas;
- Perdas por desacoplamento.

As perdas séries são a principal causa de problemas de desempenho em módulos FV. Quando as conexões internas começam a se danificar ocorre um aumento da resistência série. Conexões corroídas ou mal realizadas são exemplos deste tipo de deficiência. (KIM et al., 2014)

As perdas paralelas se devem as imperfeições nos materiais que compõem as células FV e a falta de isolamento entre as bordas das células. A ocorrência de caminhos entre a parte superior e inferior da célula cria correntes de fuga que diminuem a resistência paralela. (VAN DYK; MEYER, 2004)

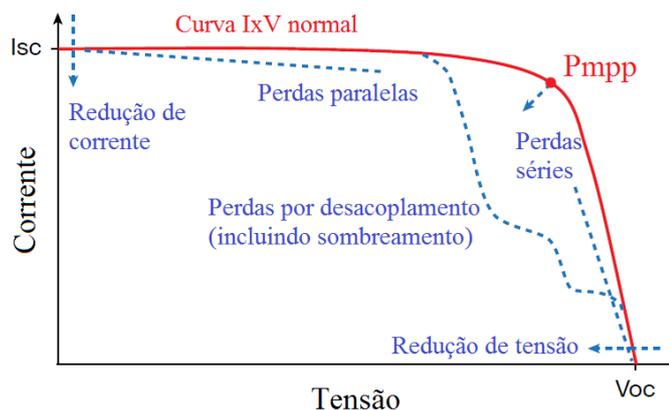
Perdas por redução de corrente de curto circuito se devem principalmente a sujidade nos módulos FV. Condições que diminuem a irradiância solar que chega ao plano coletor impactam diretamente na corrente de curto circuito. Condições climáticas e módulos degradados também são situações que levam a este tipo de perda. (JIANG; LU; SUN, 2011)

O aumento da temperatura é a maior causa das perdas por redução de tensão de circuito aberto. A baixa velocidade do vento pode aumentar a temperatura do módulo impactando nos valores de tensão de circuito aberto e tensão no ponto de máxima potência. Condições de sujidade não impactam intensamente este tipo de perda. (KALDELLIS; KAPSALI; KAVADIAS, 2014)

As perdas por desacoplamento são geradas principalmente por sombreamento. Este tipo de perda é visualmente identificado na curva IxV pela presença de nós ou dobras. Além do sombreamento, as causas de desacoplamento podem surgir por condições de sujidade, quebras nos módulos, diodos de *bypass* danificados, além de diferentes condições de envelhecimento das células ou módulos. Outra possibilidade de ocorrência é a junção de vários módulos FV de diferentes fabricantes com diferentes potências. (MANGANIELLO; BALATO; VITELLI, 2015)

Na Figura 12 são mostradas as formas de atuação de cada tipo de perda no formato da curva IxV. As perdas séries e paralelas impactam na eficiência dos módulos através da dissipação de potência em regiões localizadas. Nestas regiões podem surgir “*hot spots*” que se caracterizam por elevadas temperaturas e que podem danificar o módulo FV.

Figura 12 – Impacto das perdas na curva IxV de módulos FV



Fonte: Adaptado de (HERNDAY, 2011)

3.2 Sujidade

Módulos ou painéis FV expostos a condições severas de poeira ou areia podem ter sua geração de energia elétrica bastante comprometida. Em regiões desérticas ou semiáridas estas condições de sujidade podem ser ainda mais intensas.

O acúmulo de poeira depende de vários parâmetros como inclinação do módulo e humidade. As perdas por sujidade dependem do tipo de poeira na qual os módulos ficam expostos, além do tempo desde a última limpeza ou chuva. (KYMAKIS; KALYKAKIS; PAPAZOGLU, 2009)

Um estudo realizado por (NDIAYE et al., 2013) aponta para o impacto do acúmulo de poeira nas curvas IxV e PxV de módulos FV de silício m-Si e p-Si. Os parâmetros Pmpp, Impp, Isc e FF foram os mais impactados. Os módulos permaneceram um ano sem

limpeza e seus parâmetros elétricos foram comparados com módulos limpos do mesmo tipo e fabricante. Os resultados obtidos através de um traçador de curva IxV comercial mostraram uma redução no valor de P_{mpp} de 18% para o módulo p-Si e de 78% para o módulo m-Si. O valor de I_{mpp} teve uma redução de 23% para o módulo p-Si e 80% para o m-Si. Os valores de V_{mpp} não foram afetados pelo acúmulo de poeira. O FF teve uma redução de 2% para o módulo p-Si e de 17% para o m-Si.

Na Figura 13 é mostrado o uso do traçador IV-400, utilizado por (NDIAYE et al., 2013), para estudos de sujidade na universidade de Dakar no Senegal.

Figura 13 – Uso de um traçador de curva IxV comercial para estudos de sujidade



Fonte: (NDIAYE et al., 2013)

Em (SCHILL; BRACHMANN; KOEHL, 2015) é realizado outro estudo sobre sujidade em módulos FV. O desempenho de vários módulos foi monitorado durante 5 meses e durante este tempo os módulos não foram limpos. Após este tempo, os diferentes módulos sob teste mostraram eficiências da ordem de 13% a 27% dos valores registrados antes da exposição.

Decorridos os 5 meses os módulos foram expostos a condições de dias chuvosos que limpam parte da poeira acumulada fazendo com que os mesmos retornassem aos valores de eficiência registrados antes do período.

Na Figura 14 são mostrados os módulos, instalados na ilha Gran Canária, expostos a sujidade durante os 5 meses e um módulo limpado manualmente.

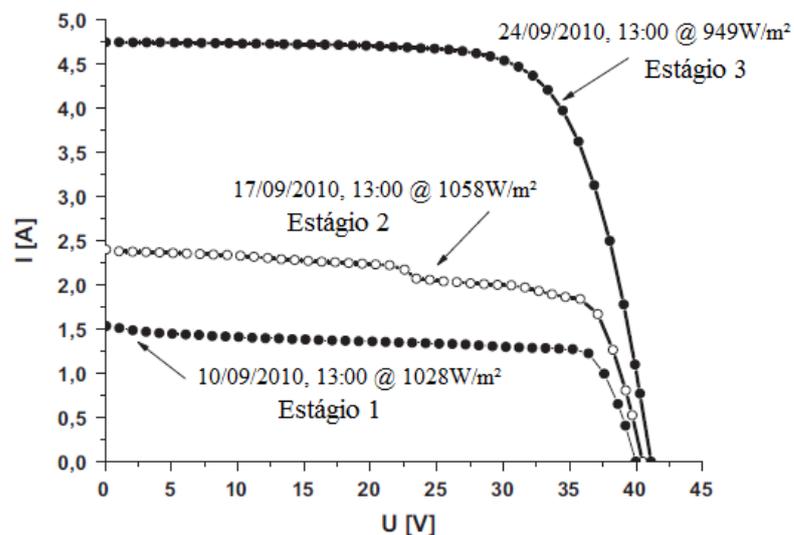
Figura 14 – Módulos FV expostos a sujidade intensa



Fonte: (SCHILL; BRACHMANN; KOEHL, 2015)

Na Figura 15 são mostradas as curvas IxV do conjunto de módulos identificados na Figura 14, medidas durante 3 estágios, para condições próximas de irradiância. As curvas foram medidas em dias diferentes, mas no mesmo horário. No estágio 1 o módulo estava exposto a condições severas de sujidade tendo grandes perdas por redução da corrente de curto circuito, além de perdas paralelas. No estágio 2 o módulo perde uma parte da sujidade a qual estava submetido no estágio 1 devido uma chuva fraca. Ainda se percebe perdas por redução da corrente de curto circuito além da formação de um nó devido à sujidade não uniforme pelo módulo. Já no estágio 3 o módulo foi exposto a uma chuva mais forte que retirou praticamente toda a sujidade eliminando as condições de perdas de potência.

Figura 15 – Diferentes estágios de sujidade a que foi submetido o módulo FV



Fonte: Adaptado de (SCHILL; BRACHMANN; KOEHL, 2015)

No estágio 2 da Figura 15, visualmente percebe-se a formação de um nó que pode dar origem a *hot spots*. Em países de clima frio outras condições de sujidade podem surgir pelo acúmulo de neve no módulo, ocorrendo nós com mais frequência.

Assim, o monitoramento da curva IxV é uma ferramenta essencial para a investigação do impacto da sujidade no desempenho dos módulos FV. (SCHILL; BRACHMANN; KOEHL, 2015)

3.3 Sombreamento

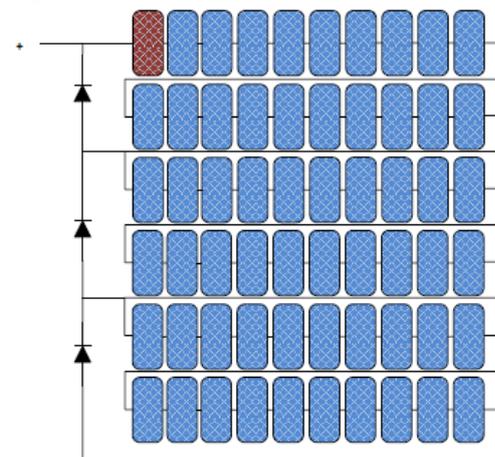
O sombreamento em módulos FV muitas vezes não é observado a ‘olho nu’ devido a condições de sombreamento parcial em determinadas células. Os principais objetos que podem causar essas condições são nuvens, árvores e construções.

O impacto do sombreamento na curva IxV de módulos FV pode gerar distorções variadas que são difíceis de estimar devido as configurações variadas das células nos módulos e da presença dos diodos *by-pass*. Estes possuem importância fundamental quando do sombreamento total de uma célula, pois provocam um curto circuito na célula protegendo-a dos efeitos prejudiciais dos *hot-spots*. Nas situações de sombreamento parcial de uma célula, o diodo *by-pass* não é acionado, ocorrendo possíveis danos à célula como envelhecimento precoce. (FARIA, 2014)

Em (BARBOSA, 2010) é realizado um estudo de monitoramento de 10 instalações FV existentes no norte e no centro de Portugal. Uma comparação dos valores medidos com os valores fornecidos por *softwares* de simulação foi realizada. Os resultados mostraram que o sombreamento foi o principal fator negativo de impacto na geração de energia elétrica. As perdas de rendimento de geração das instalações variaram de 7% a 18%.

Na Figura 16 é mostrada uma configuração de células de um módulo FV com 3 diodos *by-pass* e uma célula sombreada. São formados 3 *strings* com 20 células cada. A simulação de um traçador desenvolvida por (RILEY, 2014) caracteriza as curvas IxV e PxV para várias condições de sombreamento.

Figura 16 – Diagrama de células no módulo sob teste por (RILEY, 2014)



Fonte: (RILEY, 2014)

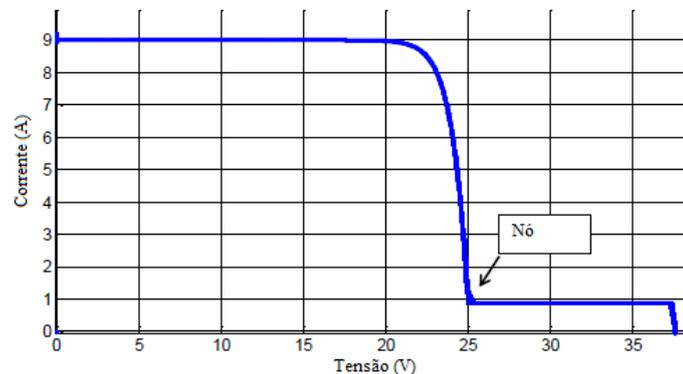
Nesta configuração o sombreamento total de uma célula faz com que toda a *string* permaneça prejudicada. A corrente de curto circuito permanece a mesma da condição sem sombreamento, mas a tensão de circuito aberto torna-se 2/3 do valor da condição sem sombreamento devido às células numa mesma *string* estarem em série sem o diodo *by-pass*.

Na Figura 17 e na Figura 18 são mostradas, respectivamente, as curvas IxV e PxV relativas a situação de sombreamento mostrada na Figura 16. Na curva IxV ocorre a presença

de um nó relativo a uma tensão de circuito aberto de aproximadamente 25 V, indicando o surgimento de um falso ponto de circuito aberto. Sem sombreamento a tensão de circuito aberto é de 38 V. A partir do sombreamento parcial ou total de várias células podem ser gerados diversos nós nas curvas IxV e PxV prejudicando o funcionamento do módulo.

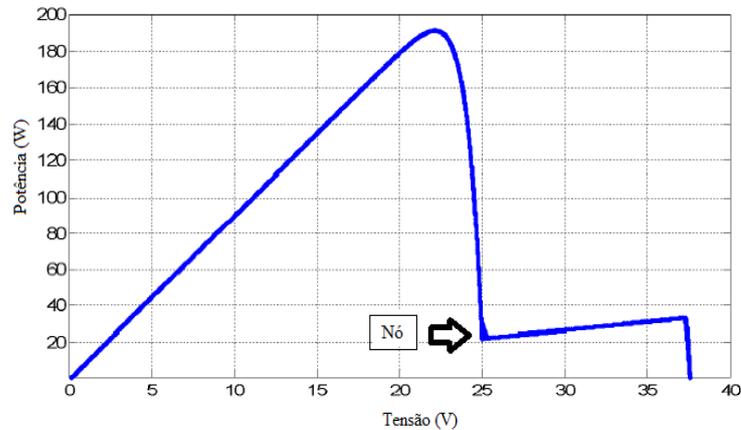
Na Figura 18 a presença do sombreamento diminui a potência máxima gerada pelo módulo de 252 W, na condição sem sombreamento, para 190 W.

Figura 17 – Curva IxV de um módulo FV com uma célula sombreada



Fonte: Adaptado de (RILEY, 2014)

Figura 18 – Curva PxV de um módulo FV com uma célula sombreada



Fonte: Adaptado de (RILEY, 2014)

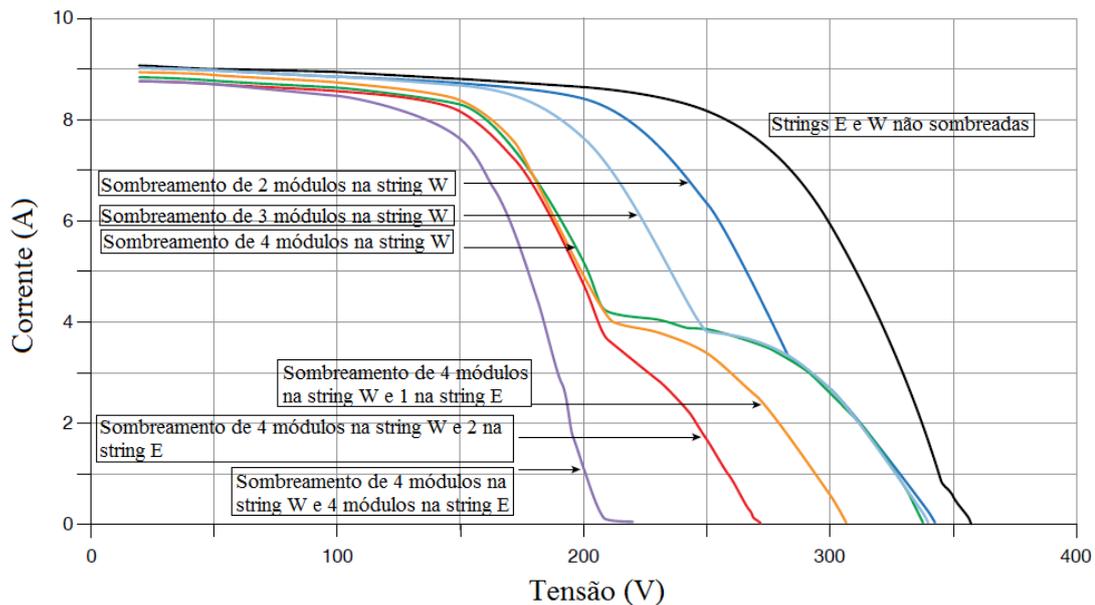
Além de ser uma solução para a identificação dos problemas de desempenho em módulos FV expostos, os traçadores de curva IxV também são utilizados para comissionamento de sistemas FV e para operações de manutenção de módulos ou painéis FV. A garantia de desempenho dos módulos FV propicia tanto uma aceitação maior por parte dos usuários quanto uma manutenção preventiva mais significativa para operadores de usinas solares.

No caso de grandes instalações FV um sombreamento pode ser mais facilmente identificado através de uma análise criteriosa das curvas IxV e PxV obtidas através de medições contínuas e periódicas.

Em (HERNDAY, 2011) é mostrada uma análise de sombreamento em um painel FV composto de 2 *strings* de módulos FV. Na Figura 19 são mostradas sete curvas IxV relativas a combinações de sombreamento em diversos módulos distribuídos em duas *strings* denominadas de E e W. A análise dos valores de corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto da Figura 19 leva a quatro conclusões:

- As *strings* estão posicionadas em paralelo;
- As *strings* possuem o mesmo número de módulos;
- Cada *string* possui 10 módulos FV cada um com tensão de circuito aberto de aproximadamente 35 V;
- Cada módulo FV possui corrente de curto circuito de aproximadamente 4,5 A.

Figura 19 – Curvas IxV relativas a condições de sombreamento de um painel FV

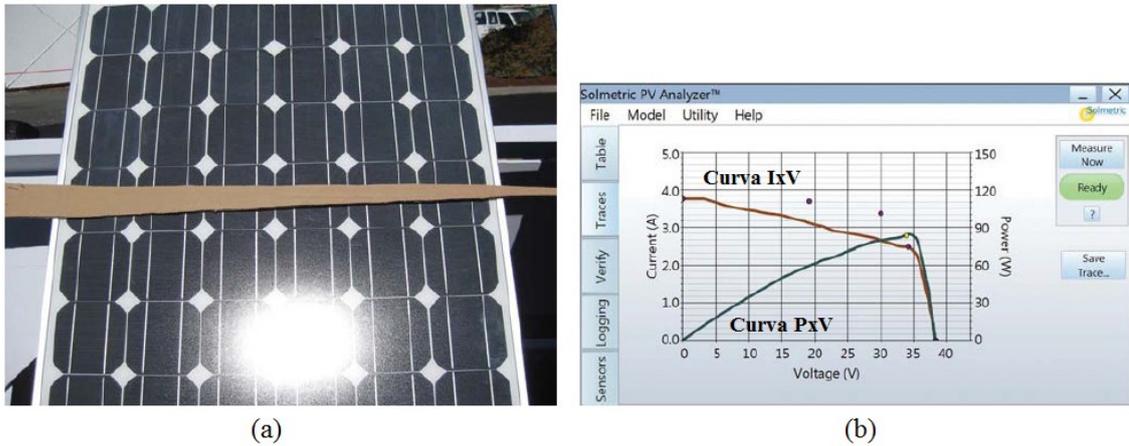


Fonte: Adaptado de (HERNDAY, 2011)

Em instalações FV nas grandes cidades é muito comum encontrar os módulos FV na parte superior de prédios ou telhados de casas. Nesses casos, é importante realizar uma análise de viabilidade preliminar da instalação através de uma identificação de problemas como sombreamento e humidade. Muitas construções próximas podem causar condições de sombreamento sem serem perceptíveis visualmente.

Na Figura 20 é mostrada uma dessas condições. Uma sombra no formato de um poste ou uma quina de parede é simulada em um módulo FV. Através de um traçador comercial são verificadas distorções tanto na curva IxV como na curva PxV. Como várias células não são sombreadas totalmente podem ocorrer os problemas de *hot spots*.

Figura 20 – (a) Simulação de uma condição de sombreamento numa instalação urbana; (b) Curvas IxV (em vermelho) e PxV (em verde)



Fonte: Adaptado de (HERNDAY, 2011)

3.4 Conclusões do Capítulo

Este capítulo mostrou as principais condições que causam anomalias nas curvas IxV e PxV de módulos ou painéis FV. Muitos projetos FV não consideram a análise dessas anomalias quando de sua implantação o que pode levar a prejuízos significativos.

As condições de sujidade e sombreamento são causas comuns de perdas em instalações FV que podem ser facilmente identificadas através de medições contínuas e periódicas das curvas IxV e PxV através dos traçadores de curva IxV.

Foi visto que a sujidade pode diminuir significativamente o valor da corrente de curto circuito e que tanto sujidade quanto sombreamento podem causar o envelhecimento precoce das células ou módulos FV.

4 ESTADO DA ARTE DE TRAÇADORES DE CURVA IxV PARA MÓDULOS FV

Neste capítulo serão apresentados trabalhos sobre caracterização elétrica de módulos FV. O principal objetivo destes trabalhos é obter a característica da curva IxV para condições de temperatura e irradiância diferentes das condições STC (irradiância igual a 1000 W/m², temperatura do módulo igual a 25 °C e AM igual a 1,5) que é fornecida pelos fabricantes.

A caracterização real de um módulo FV ou de vários módulos é importante para diagnosticar os possíveis problemas expostos no capítulo 3.

4.1 Métodos de Caracterização

Existem várias maneiras de caracterizar módulos FV, as principais abrangem 5 métodos distintos com variados graus de complexidade, fidelidade e custos. Além destes uma importante característica que deve ser considerada em um traçador de curva IxV é a flexibilidade de uso em campo, sendo capaz de ter autonomia na alimentação elétrica além de armazenamento de dados, conexão *wireless* e um baixo tempo de aquisição da curva.

Os principais métodos para caracterizar eletricamente o módulo FV são:

- a) Resistor variável;
- b) Capacitivo;
- c) Fonte de 4 quadrantes;
- d) Conversor dc-dc;
- e) Carga eletrônica.

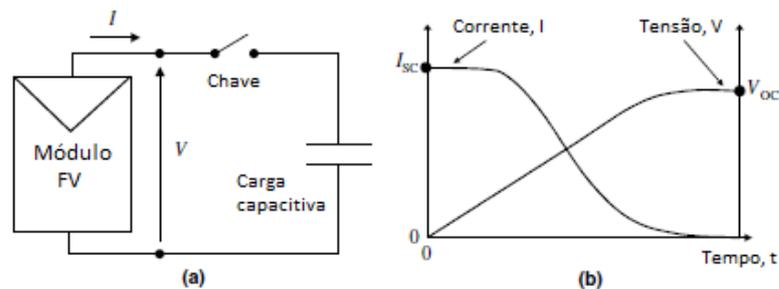
O método por resistor variável é o mais simples dos métodos citados, pois envolve apenas a conexão de um resistor (geralmente um reostato) como carga para o módulo. A variação da resistência de zero a um valor elevado tendendo a infinito é a forma como o método adquire os pontos do curto-circuito ao circuito aberto. As principais vantagens deste método são: um baixo custo de implementação e sua simplicidade. Devido à variação da resistência não ser automática pode ocorrer de a caracterização demorar um tempo elevado inviabilizando a medição em campo. A irradiância pode variar bruscamente num intervalo de tempo de alguns segundos. Pontos medidos em situações de irradiância solar e temperatura diferentes são considerados fora de uma mesma curva IxV. Assim, este método se limita a medições em laboratório sob condições controladas de irradiância e temperatura ou medições

em campo sob condições de irradiância e temperatura constantes. Outro fator negativo deste método é a limitação de potência, pois o resistor conectado ao módulo deve ser capaz de dissipar toda a potência fornecida pelo mesmo. Isso limita o método a aplicações com poucos módulos, pois não existem resistores com capacidade de dissipar grandes quantidades de potência referentes a grandes painéis.

Um dos principais métodos utilizados no mercado em traçadores de curva IxV é o capacitivo que consiste no uso de um conjunto de capacitores como carga para o módulo. A caracterização é realizada durante o transiente de carregamento dos capacitores, inicialmente os capacitores descarregados funcionam como um curto-circuito e após serem carregados funcionam como um circuito-aberto. A principal vantagem deste método é o pequeno tempo de aquisição de dados que segundo (MUÑOZ; LORENZO, 2006) pode durar algumas dezenas de milissegundos. Outra vantagem é a capacidade de caracterização de vários módulos com uma potência elevada, pois capacitores podem armazenar grandes quantidades de energia. A desvantagem é o custo alto devido aos sistemas de controle e proteção para carregamento e descarregamento dos capacitores.

Na Figura 21 é mostrado o esquemático de funcionamento do método.

Figura 21 – (a) Esquemático geral do método capacitivo, (b) transiente de carregamento do capacitor onde a curva IxV é caracterizada



Fonte: Adaptada de (MUÑOZ; LORENZO, 2006)

A fonte de 4 quadrantes é outro método que dentre os 5 citados é o mais sofisticado, pois consegue medir grandes quantidades de potência além de possuir a capacidade de caracterização de vários módulos em poucas dezenas de milissegundos. A fidelidade do método é elevada devido a este baixo tempo de caracterização. Outro fator importante do método é a complexidade na instrumentação devido ao uso de multímetros digitais que devem ser programados para medir centenas de pontos em milissegundos. O método utiliza uma fonte especial que pode ser utilizada tanto como fonte quanto como carga. Esta fonte polariza o módulo com um sinal de tensão programado em forma de rampa e os

valores de correntes e tensão são lidos em multímetros de disparo instantâneo. A característica marcante deste método que o faz preferido entre os fabricantes de módulos FV é a capacidade de medir a curva IxV tanto no primeiro quadrante quanto no segundo e no quarto. Esta característica muitas vezes é importante para obtenção de valores exatos de corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto. Essas características positivas fazem deste método um dos que possuem maiores custos, principalmente devido ao preço da fonte.

Na Figura 22 é mostrado um traçador de curva IxV construído a partir de uma fonte de 4 quadrantes.

Figura 22 – Traçador de curva IxV construído com fonte de 4 quadrantes

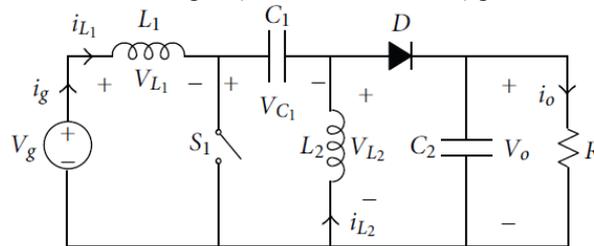


Fonte: (GASPARIN, 2009)

Conversores dc-dc é um método que tem sido utilizado mais frequentemente nos últimos anos com o avanço da eletrônica de potência. Consiste no uso de um conversor que é conectado entre o módulo e uma carga. A variação de *duty-cycle* do conversor é capaz de simular a variação da carga traçando a curva IxV em um intervalo pequeno de tempo da ordem de centenas de milissegundos. As principais vantagens deste método são: o custo razoável devido ao conversor não exigir equipamentos sofisticados e a modularidade proporcionada pelo mesmo. Um fator negativo deste método é a introdução de *ripple* na corrente medida devido ao chaveamento em alta frequência.

Na Figura 23 é mostrado o esquemático do conversor utilizado por (DURÁN et al., 2012).

Figura 23 – Conversor SEPIC utilizado por (DURÁN et al., 2012) para caracterização de módulos FV

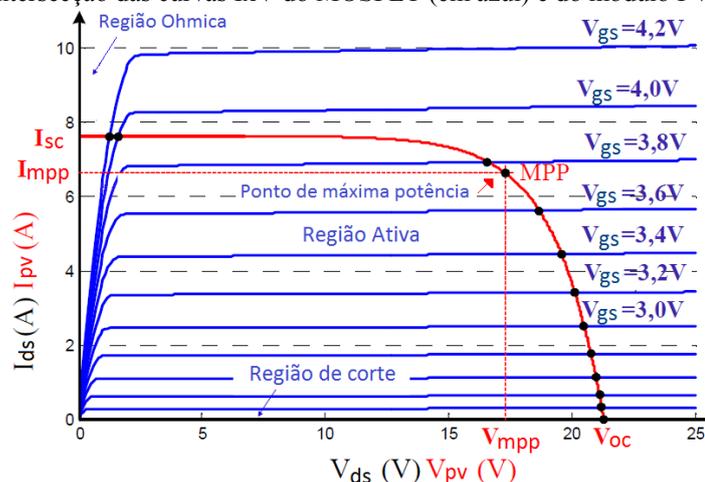


Fonte: (DURÁN et al., 2012)

O último método é o mais encontrado na literatura devido a sua simplicidade e custo razoável. Consiste na utilização de um transistor (geralmente um MOSFET) como carga para o módulo FV. A partir de uma variação adequada do sinal de *gate* é possível controlar a abertura ou o fechamento da chave fazendo-a trabalhar na região ativa. A caracterização é realizada com a intersecção das curvas características do módulo FV e do transistor. Uma desvantagem deste método é que a curva I_xV não pode ser caracterizada nas regiões de corte e ôhmica. Outro fator negativo é o fato que o método se limita a poucos módulos devido a não existirem transistores que dissipem grandes quantidades de potência num curto intervalo de tempo. Em (BELMILI et al., 2010) é mostrado um método de alocação de vários MOSFET's em paralelo para aumentar a capacidade de dissipação de potência.

Na Figura 24 é mostrada a intersecção das curvas características de um MOSFET e de um módulo FV, com a adequada variação do sinal de *gate* é possível adquirir todos os pontos da curva I_xV do módulo FV.

Figura 24 – Intersecção das curvas I_xV do MOSFET (em azul) e do módulo FV (em vermelho)



Fonte: Adaptado de (LEITE et al., 2012)

4.2 Revisão Bibliográfica

Neste tópico é realizada uma síntese de várias bibliografias abordando todos os métodos comentados no item 4.1.

Com o advento da microeletrônica as formas de caracterização dos módulos FV evoluíram consideravelmente. As primeiras formas tratam do método resistivo sendo utilizada luz artificial e condições ambientais de temperatura controladas. Posteriormente, o método capacitivo possibilitou a caracterização em campo. Os métodos de carga eletrônica e conversor dc-dc têm possibilitado várias pesquisas, recentemente, devido ao seu baixo custo e ao grande desenvolvimento do mercado de chaves semicondutoras.

Na Tabela 1 são mostrados os principais trabalhos pesquisados sobre traçadores de curva IxV para módulos FV. As principais características dos trabalhos são: o sistema de aquisição de dados, o tempo de aquisição da curva IxV e o *software* de interface que é utilizado para controlar o sistema.

Tabela 1 – Resumo dos trabalhos pesquisados

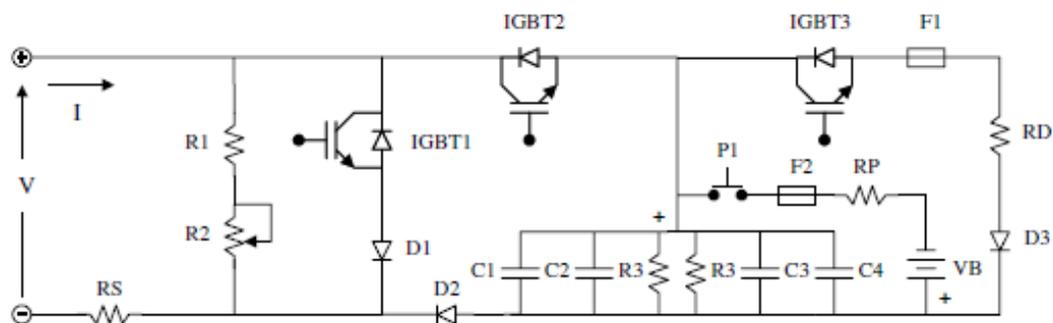
Trabalhos	Método utilizado	Sistema de aquisição de dados	Interface Gráfica	Tempo de aquisição
(MUÑOZ; LORENZO, 2006)	Capacitivo	Osciloscópio	-	0,1 s
(KUAI; YUVARAJAN, 2006)	Carga Eletrônica	Osciloscópio	-	-
(BENGHANEM, 2009)	Carga Eletrônica	PIC16F877	Matlab	-
(GASPARIN, 2009)	Fonte de 4 quadrantes	Multímetros	Visual Basic	0,1 s
(RODRIGUES, 2009)	Capacitivo	Placa de aquisição de dados picolog 1000	LabVIEW	1 s
(BELMILI et al., 2010)	Carga Eletrônica	PIC16F876	Visual Basic	-
(LEITE et al, 2010)	Carga Eletrônica	Osciloscópio	-	-
(VALENTE, 2011)	Carga Eletrônica	Placa de aquisição de dados NI USB 6008	Matlab	2 s
(PILIOUGINE et al., 2011)	Fonte de 4 quadrantes	Multímetros	Borland Delphi	1 s
(LEITE et al, 2012)	Carga Eletrônica	Placa de aquisição de dados NI USB 6008	LabVIEW	-
(SIMON; MEYER, 2006)	Carga Eletrônica	Placa de aquisição de dados NI PCI-6228	LabVIEW	2 s
(DURÁN et al., 2012)	Conversor DC-DC	PIC16F877 / Osciloscópio	LabVIEW	0,2 s
(ISAAC, 2013)	Resistor variável	Placa de aquisição de dados NI USB 6009	LabVIEW	-
(SAHBEL et al, 2013)	Carga Eletrônica	Placa de aquisição de dados NI USB 6008	LabVIEW	6 s

Fonte: Autoria própria

Em (MUÑOZ; LORENZO, 2006) é descrito um dispositivo capaz de medir correntes de curto-circuito de até 80 A e tensões de circuito aberto de até 800 V. Pela dimensão da potência a ser controlada são usados 4 capacitores eletrolíticos de 450 V / 4700 μ C e um módulo IGBT de 100 A / 1200 V. O método utilizado é o capacitivo onde são adquiridos os pontos durante o transiente de carregamento dos capacitores.

Na Figura 25 é mostrado o esquemático do circuito de potência montado, o chaveamento entre o módulo FV e os capacitores é realizado através do IGBT2.

Figura 25 – Esquemático do circuito de potência



Fonte: (MUÑOZ; LORENZO, 2006)

Na Figura 25 o IGBT3 é utilizado para descarga dos capacitores através do resistor RD após a varredura de tensão e corrente. Este processo de descarregamento tem duração de alguns segundos e termina quando a tensão nos capacitores diminui abaixo de 5 V.

O circuito formado pelo *push button* P1, fusível F2, resistor RP e fonte de tensão VB é utilizado para pré-carga dos capacitores com uma tensão negativa antes da medição da curva $I \times V$ devido a queda de tensão nos IGBT'S, diodos e enrolamentos; e também para garantir que as medições comecem no segundo quadrante ($V < 0$ e $I > 0$).

O fusível F2 protege o circuito de pré-carga caso P1 seja acionado sem que os capacitores tenham sido descarregados. O diodo D3 previne a descarga dos capacitores através de RD. O diodo D1 protege o IGBT1 contra uma conexão de polaridade errada do painel; e o diodo D2 previne a descarga dos capacitores através do IGBT1 e também protege o IGBT2 contra uma conexão de polaridade errada do painel.

Os resistores R1 e o potenciômetro R2 dividem a tensão do painel por 10 para uso nos sensores de tensão. RS é um resistor de precisão cuja resistência é muito pequena, o mesmo é utilizado por um sensor de corrente para medições da corrente do painel.

Em (MUÑOZ; LORENZO, 2006) é apontado que todos os circuitos elétricos tiveram um custo de 900 euros o que é um valor razoavelmente elevado considerando que o

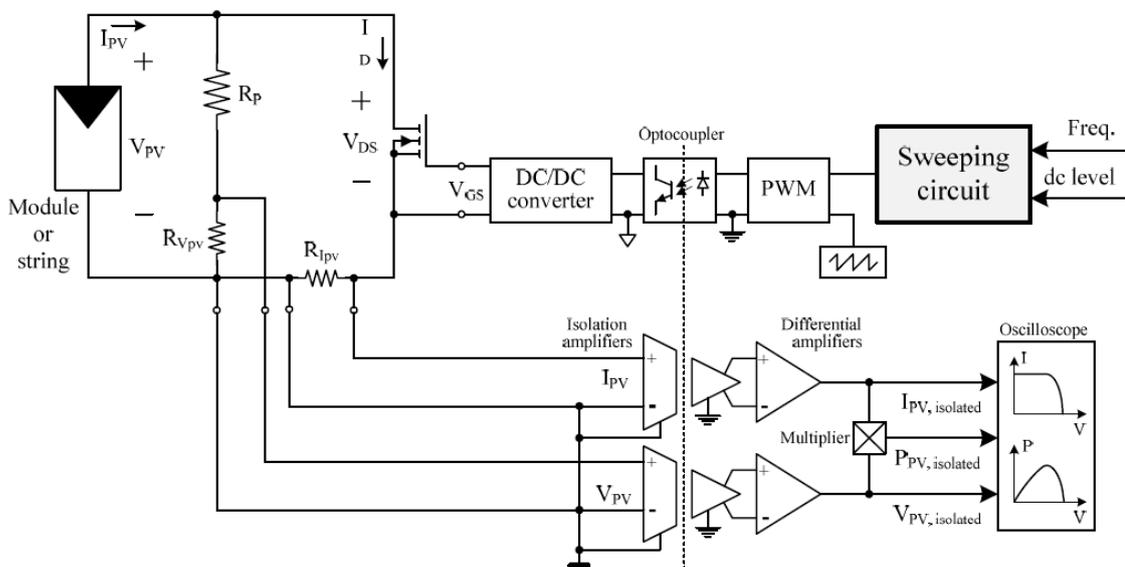
sistema de aquisição não foi contabilizado neste valor sendo utilizado um osciloscópio para o mesmo e que ainda devem ser considerados custos de sensores e computador. Para as medições de temperatura de irradiância solar foi utilizado um módulo FV calibrado.

Em (KUAI; YUVARAJAN, 2006) e em (LEITE; CHENLO, 2010) a caracterização é realizada pelo método de carga eletrônica onde um MOSFET de potência é utilizado como carga para o módulo FV. Ambos utilizam o osciloscópio como sistema de medição para corrente e tensão. Variáveis como irradiância e temperatura não são medidas nesses trabalhos.

Os sinais de controle das chaves são senoidais. Em (KUAI; YUVARAJAN, 2006) esse sinal de controle é senoidal variando de 0 V a 5,2 V e o MOSFET utilizado foi o APL501J. Já em (LEITE; CHENLO, 2010) é utilizado um sinal de controle em forma de senoide retificada em onda completa e o MOSFET utilizado foi o IRFP048N. O sinal de potência é obtido através da multiplicação do sinal de tensão pelo de corrente através do dispositivo MPY634.

Na Figura 26 é mostrado o esquema de funcionamento do dispositivo montado por (LEITE; CHENLO, 2010), o circuito é isolado eletricamente através de amplificadores isoladores, o sinal de controle do bloco de varrimento gera um sinal senoidal que é convertido num sinal digital em forma de PWM através da comparação com um sinal de dente serra. Após o isolamento do sinal de controle, o sinal digital é convertido novamente em senoidal através do bloco conversor cc-cc.

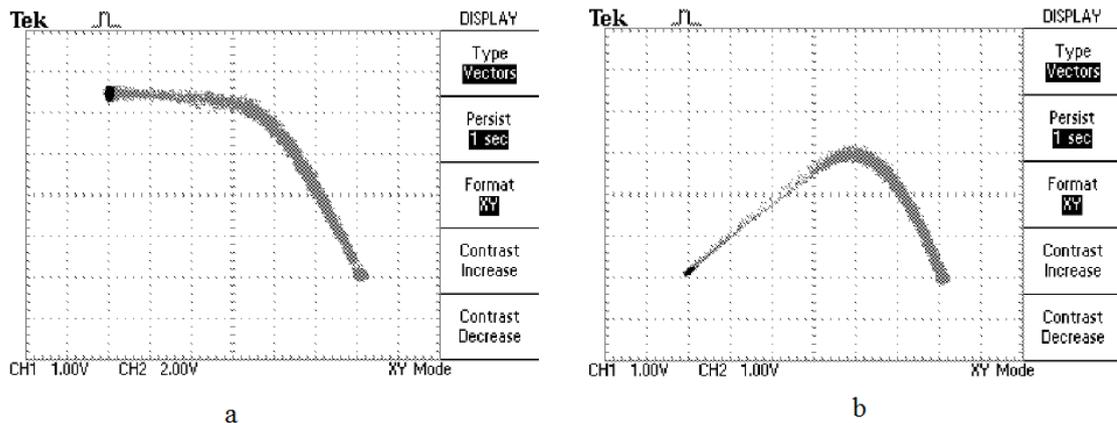
Figura 26 – Esquemático do circuito elétrico montado por (LEITE; CHENLO, 2010)



Fonte: (LEITE; CHENLO, 2010)

Na Figura 27 são mostradas as curvas IxV e PxV obtidas no osciloscópio por (LEITE; CHENLO, 2010) para o módulo FV EC115.

Figura 27 – (a) Curva IxV; (b) Curva PxV obtidas por (LEITE; CHENLO, 2010)



Fonte: (LEITE; CHENLO, 2010)

Em (BENGHANEM, 2009) é realizado um estudo sobre modelos elétricos que representam módulos FV. A curva IxV é medida através de um traçador desenvolvido pelo método de carga eletrônica e a mesma é comparada com curva IxV fornecida por diferentes modelos matemáticos. O sistema conta com um microcontrolador PIC16F877 para aquisição dos dados e transmissão para um PC onde os dados são armazenados e apresentados através de uma interface no *software* Matlab.

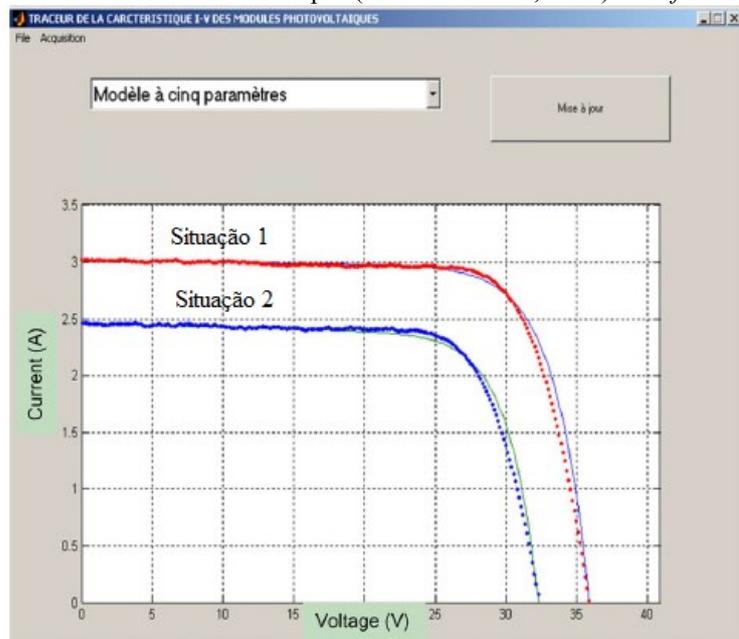
Foram desenvolvidos os seguintes modelos matemáticos para comparação com o traçador: explícito, de 2 parâmetros, de 5 parâmetros, de Akbaba e um modelo proposto. A comparação é realizada ponto a ponto na curva IxV e são calculados os erros médios quadráticos relativos a cada modelo para 2 situações específicas de irradiância solar e temperatura.

Os resultados mostram que o modelo que apresenta os menores erros é o proposto, erros de 3,04% e 1,21% enquanto que o de Akbaba apresenta os maiores, erros de 21,77% e 15,18%. Este último modelo apresenta os maiores erros, principalmente, devido à desconsideração das resistências no circuito elétrico representativo do módulo FV.

Na Figura 28 é mostrada a comparação das curvas IxV do traçador desenvolvido e do modelo de 5 parâmetros para duas situações. A situação 1 aborda as condições de irradiância solar igual a 1000 W/m² e temperatura do módulo FV igual a 25 °C, a situação 2 aborda as condições de irradiância solar igual a 800 W/m² e temperatura do módulo FV igual

a 45 °C. As curvas pontilhadas são referentes ao traçador e as curvas contínuas são referentes ao modelo.

Figura 28 – Interface desenvolvida por (BENGHANEM, 2009) no *software* Matlab

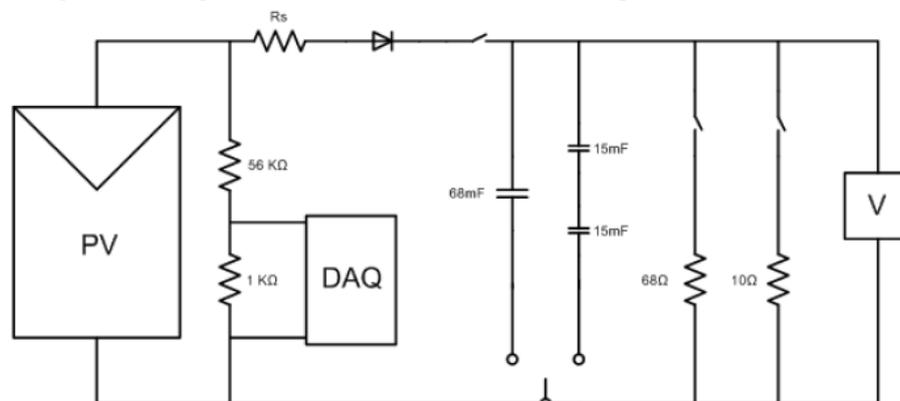


Fonte: Adaptado de (BENGHANEM, 2009)

Em (RODRIGUES, 2009) é apresentado um dispositivo utilizando o método capacitivo para caracterizar módulos FV. Os dados adquiridos por uma placa da aquisição são: tensão, corrente, temperatura do módulo FV e irradiância solar.

Na Figura 29 é apresentado o esquemático do circuito elétrico utilizado.

Figura 29 – Esquemático do circuito elétrico utilizado por (RODRIGUES, 2009)



Fonte: (RODRIGUES, 2009)

Em (GASPARIN, 2009) é construído um dispositivo capaz de caracterizar a curva IxV de módulos FV com até 2000 pontos. O método utilizado se baseia em uma fonte bipolar

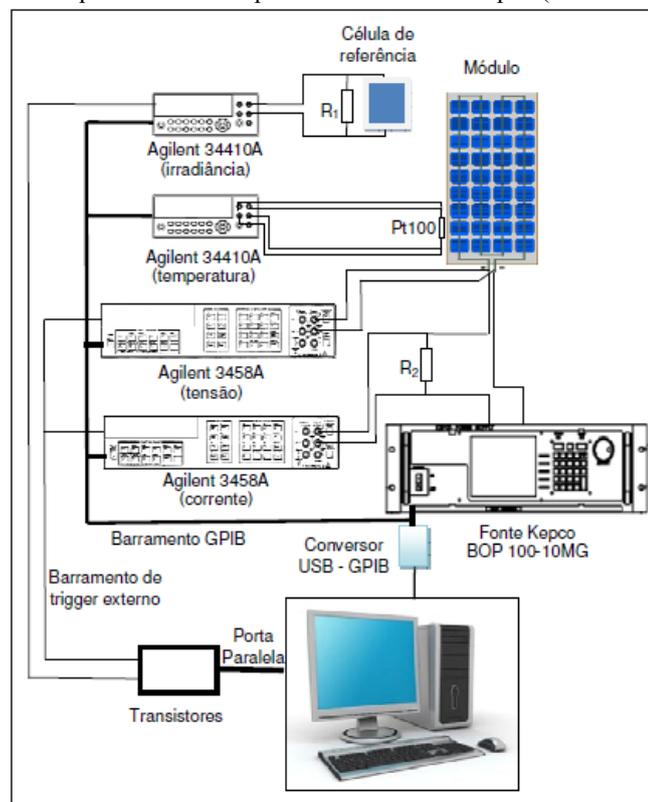
de 4 quadrantes KEPCO modelo BOP 100-10 MG. Inicialmente, o módulo é polarizado com uma tensão negativa para compensar as quedas de tensão associadas à resistência série, fios e conexões. Comandos enviados de um computador através de um *software* de gerenciamento programam a fonte com parâmetros de uma rampa de tensão para polarização do módulo.

No instante de polarização do módulo são medidos os pares de tensão e corrente. Ao mesmo tempo em que são medidos estes pares, os valores de irradiância solar e temperatura do módulo também são medidos. Multímetros digitais são utilizados para as medições das variáveis mencionadas e a transferência das leituras da memória desses multímetros para o computador é realizada via interface USB-GPIB.

Para validar o experimento foram realizadas medições próximas das condições STC e os valores obtidos foram comparados com os valores fornecidos nos catálogos dos fabricantes. Para o módulo HG-135P a maior diferença encontrada se situou na corrente de curto circuito sendo de 8,9%. Já para o módulo Kyocera KC 85 T esta diferença foi de 3,3%.

Na Figura 30 é mostrado o esquemático do dispositivo montado.

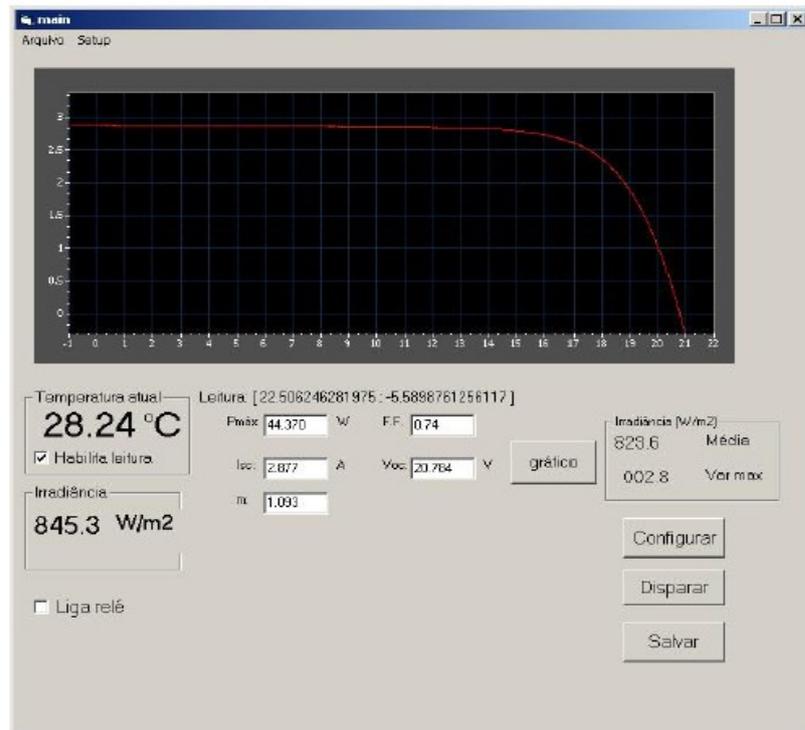
Figura 30 – Esquemático do dispositivo desenvolvido por (GASPARIN, 2009)



Fonte: (GASPARIN, 2009)

Na Figura 31 é mostrada a interface gráfica desenvolvida no *software* Visual Basic onde são mostradas vários parâmetros da curva IxV medida.

Figura 31 – Interface de gerenciamento desenvolvida por (GASPARIN, 2009)

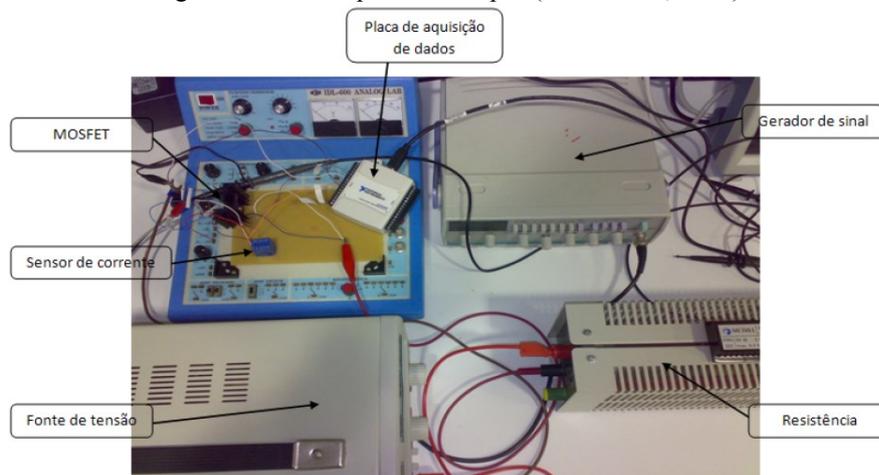


Fonte: (GASPARIN, 2009)

Em (VALENTE, 2011) foi construído um dispositivo composto de: uma fonte de tensão que substitui o módulo FV, um MOSFET, sensores de corrente e tensão, placa de aquisição de dados, gerador de sinal para o *gate* do MOSFET e uma resistência. No *software* Matlab foi desenvolvida uma plataforma de gerenciamento de dados e programado que cada curva tenha 1000 pontos sendo o tempo de aquisição total igual a 2 s. Através da plataforma ainda é possível armazenar os dados de corrente e tensão em arquivos de ficheiros isolados.

Na Figura 32 é mostrado o protótipo desenvolvido por (VALENTE, 2011).

Figura 32 – Protótipo montado por (VALENTE, 2011)



Fonte: (VALENTE, 2011)

Em (PILIOUGINE et al., 2011) é encontrado outro dispositivo montado através de uma fonte de 4 quadrantes sendo capaz de medir 100 pontos da curva IxV em 1 s. O diferencial do trabalho é a análise de incerteza minuciosa que é realizada em cada variável medida além da proposição de um método de sincronização de disparo dos multímetros para melhor adquirir os pares de tensão e corrente.

A tensão no módulo é medida numa configuração de quatro cabos (o par de cabos utilizado para polarização do módulo não é o mesmo utilizado para medir tensão nos seus terminais) para evitar erros devido à queda de tensão nos mesmos. Tensão e corrente são medidos através do uso dos multímetros digitais Agilent 34411A, ambos os multímetros são conectados ao computador via GPIB. Os multímetros possuem uma memória interna que armazena os dados durante o processo de medição e após o término transmitem os dados ao computador.

Ao contrário da literatura que utiliza o disparo dos multímetros via GPIB, é montado um sistema composto por um gerador de onda que utiliza um sinal quadrado. O método proposto garante o disparo sincronizado dos multímetros de forma mais precisa.

Os parâmetros climáticos (irradiância e temperatura) são medidos ao mesmo tempo em que é feita a medição da curva IxV. A temperatura do módulo é medida através do sensor RTD PT100 acoplado em baixo do módulo e a irradiância é medida na superfície de cima do módulo através de um piranômetro Kipp & Zonen CPM21.

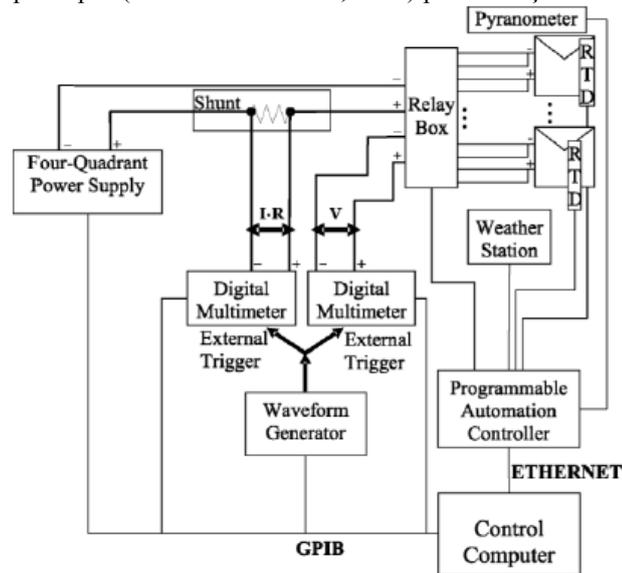
O sistema desenvolvido possui uma caixa de relés que multiplexa até 8 módulos FV. Cada módulo pode ser selecionado automaticamente ou um conjunto de módulos pode ser selecionado sequencialmente. Assim, vários módulos podem ser selecionados e suas curvas medidas sucessivamente num curto intervalo de tempo.

A linguagem de programação utilizada para controle no computador é Borland Delphi que permite ao usuário configurar a duração da varredura de tensão, os limites de corrente para proteção do módulo, o número de pontos das curvas IxV e outros parâmetros. Os valores de tensão e corrente adquiridos são utilizados para determinar a tensão de circuito aberto; a corrente de curto circuito; tensão, corrente e potência no ponto de máxima potência bem como o fator de forma do módulo.

Foi realizado um estudo estatístico para várias medições da curva IxV com as mesmas condições de temperatura e irradiância. O objetivo foi provar que as variações nos resultados experimentais eram insignificantes e medir a precisão do sistema proposto. Os resultados mostraram que estatisticamente as curvas medidas podiam ser consideradas iguais.

O esquemático do processo de medição da curva IxV é mostrado na Figura 33.

Figura 33 - Esquema proposto por (PILIOUGINE et al., 2011) para medição da curva IxV de módulos FV

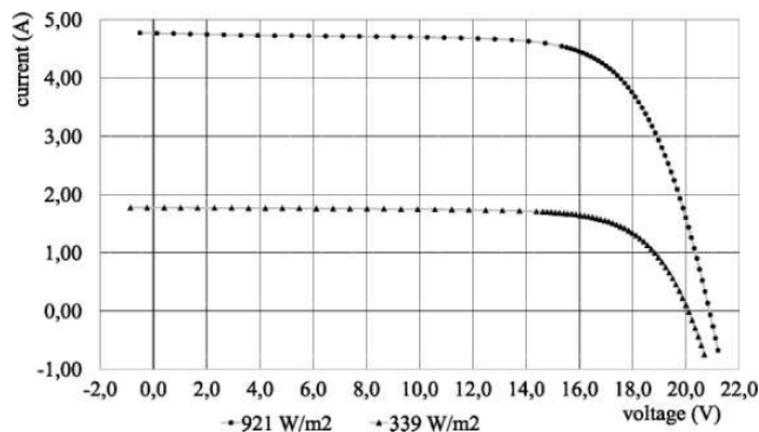


Fonte: (PILIOUGINE et al., 2011)

Para medição da curva IxV com maior qualidade possível e no menor tempo o módulo FV é polarizado com duas rampas de tensão. Na primeira com maior número de pontos o módulo é polarizado do ponto de circuito aberto até o joelho da curva, pois nessa parte da curva existe a maior variação entre tensão e corrente. Já para a parte da curva do joelho ao ponto de curto-circuito o módulo é polarizado com uma rampa de tensão com menos pontos.

Na Figura 34 são apresentados os resultados obtidos por (PILIOUGINE et al., 2011) para duas condições diferentes de temperatura e irradiância solar. Percebe-se que os pontos entre o joelho da curva IxV e o curto circuito estão mais espaçados enquanto que entre o joelho e o circuito aberto estão mais próximos.

Figura 34 – Medições experimentais para um módulo FV sob diferentes irradiâncias. Curva superior (921 W/m² e 40,7 °C) e curva inferior (339 W/m² e 39 °C)



Fonte: (PILIOUGINE et al., 2011)

Uma análise minuciosa do dispositivo desenvolvido por (BELMILI et al., 2010) mostra como gerar um sinal de controle para uma carga eletrônica. É abordado um traçador de curva IxV usando o método de carga eletrônica sendo que a mesma é composta por 2 estágios: de comando e de potência. No estágio de potência são acoplados 4 MOSFET's IRFP150N em paralelo como carga para o módulo FV. Esta configuração diminui a resistência entre *drain* e *source* para maior fidelidade no ponto de curto circuito.

No estágio de comando um capacitor é colocado em paralelo ao *gate* dos MOSFET's para gerar o sinal de abertura e fechamento das chaves. Através do *driver* ULN2003A, o sinal gerado por um PIC16F876 consegue carregar e descarregar o capacitor com 15 V. No transiente de abertura da chave são capturados os pontos de tensão e corrente no módulo FV; e traçada a curva IxV. Valores de irradiância solar são medidos através de uma célula de referência calibrada e os valores de temperatura são medidos através de um sensor de temperatura DS18B20. O *software* Visual Basic gerencia todo o sistema através de um computador. A comunicação entre o PIC16F876 e o computador é realizada através de um *driver* EIA 232.

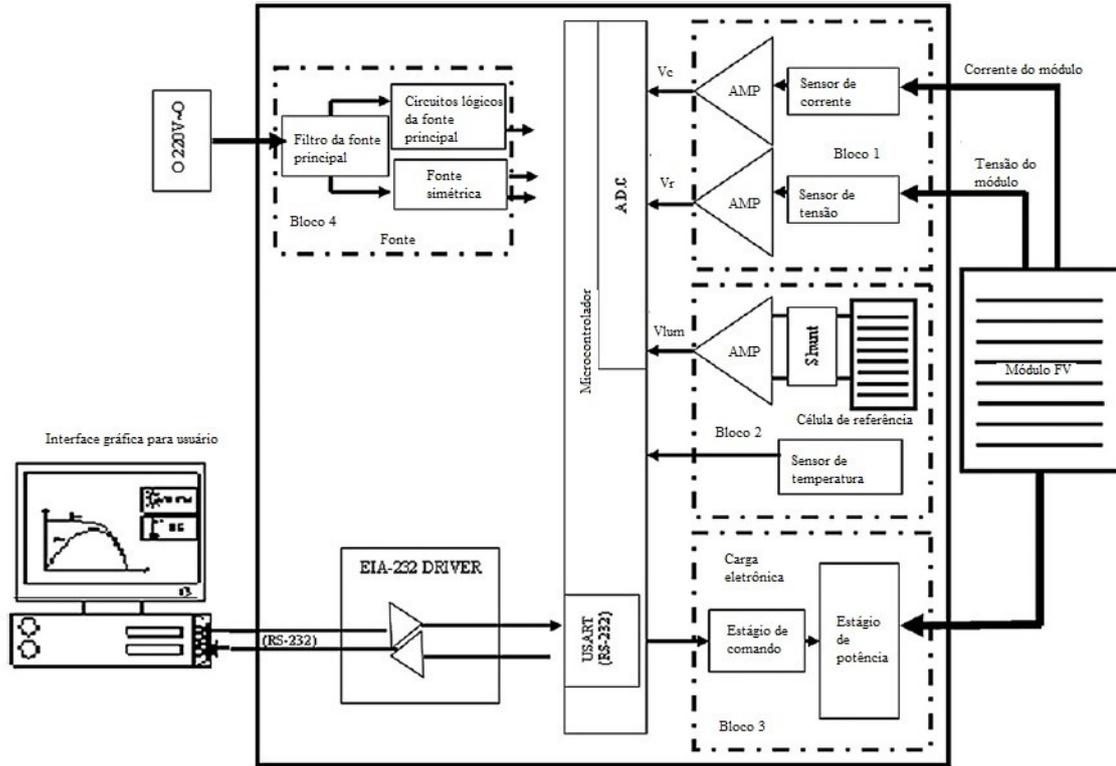
A medição de corrente é realizada através do sensor LA55P devido a seu excelente desempenho em termos de linearidade e de variação de temperatura. A corrente entregue pelo painel é convertida numa tensão que passa para um estágio de amplificação e então é transmitida ao PIC. O valor máximo definido para medição foi de 10 A.

A medição de tensão é realizada através de um divisor resistivo que diminui a tensão entregue pelo módulo, igualmente como a medição de corrente existe um estágio de amplificação antes do PIC. O valor máximo definido para esta medição foi de 50 V.

O PIC16F876 possui um conversor AD de 10 bits de resolução. Assim, os passos de corrente e tensão medidos foram, respectivamente, de 9,78 mA e 48,87 mV. Estes passos são um importante parâmetro para definição do número de pontos da curva IxV.

Na Figura 35 é mostrado o diagrama de blocos para o dispositivo montado por (BELMILI et al., 2010). O bloco 1 aborda as medições de corrente e tensão no módulo no momento do transiente de descarregamento do capacitor que se situa estágio de comando. Este é utilizado para abrir e fechar as chaves do estágio de potência. Após as medições o sinal é devidamente amplificado e lido pelo PIC. No bloco 2 são lidos os valores de irradiância solar e temperatura. No bloco 3 estão os estágios de comando e de potência, este último é responsável pelo controle da corrente que flui pelo módulo FV. O bloco 4 é um conjunto de fontes para alimentação dos diversos circuitos e componentes como sensores, amplificadores, *drivers* e microcontrolador. A fonte geral de tensão é a rede elétrica (220 VAC).

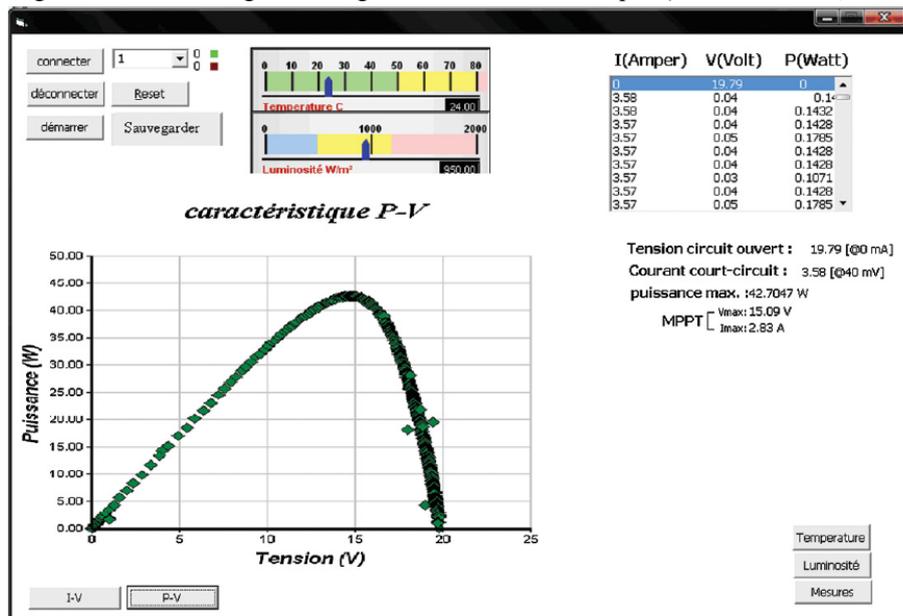
Figura 35 – Diagrama do dispositivo montado por (BELMILI et al., 2010)



Fonte: Adaptada de (BELMILI et al., 2010)

Na Figura 36 é mostrado a interface gráfica para usuário montada por (BELMILI et al., 2010) com a curva IxV para o módulo FV TE500CR+ nas condições de irradiância solar igual a 900 W/m² e temperatura do módulo igual a 22 °C.

Figura 36 – Interface gráfica de gerenciamento montada por (BELMILI et al., 2010)

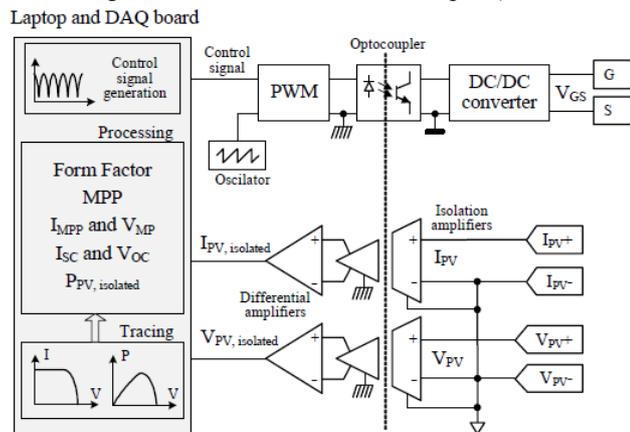


Fonte: (BELMILI et al., 2010)

Uma descrição minuciosa dos dispositivos eletrônicos utilizados no traçador de curva I_xV desenvolvido por (LEITE et al., 2012) é realizada. Neste também é utilizado o método de carga eletrônica sendo utilizado um MOSFET IRFP260N como carga para o módulo FV. É utilizada uma placa de aquisição para os dados de tensão e corrente. O sistema é gerenciado através de um computador com uma interface construída no *software* LabVIEW.

Na Figura 37 é mostrado o diagrama do sistema desenvolvido por (LEITE et al., 2012).

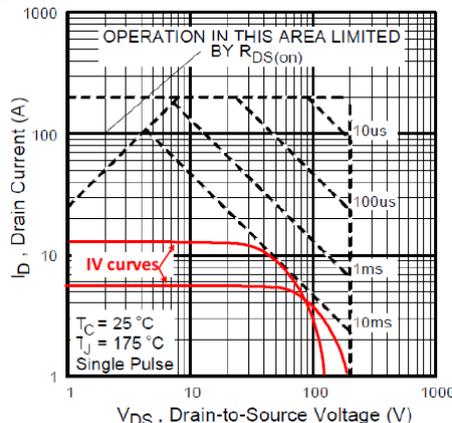
Figura 37 – Diagrama do sistema desenvolvido por (LEITE et al., 2012)



Fonte: (LEITE et al., 2012)

Um dos pontos fundamentais do trabalho de (LEITE et al., 2012) é o gráfico que aparece na Figura 38. Este é utilizado como critério para escolha de qual chave deve ser utilizada. A curva I_xV deve se situar dentro da área de operação segura, pois a mesma expressa o tempo máximo no qual a chave pode ficar submetida a determinados níveis de tensão e corrente. Passados esses limites a chave pode se danificar devido ao excesso de potência.

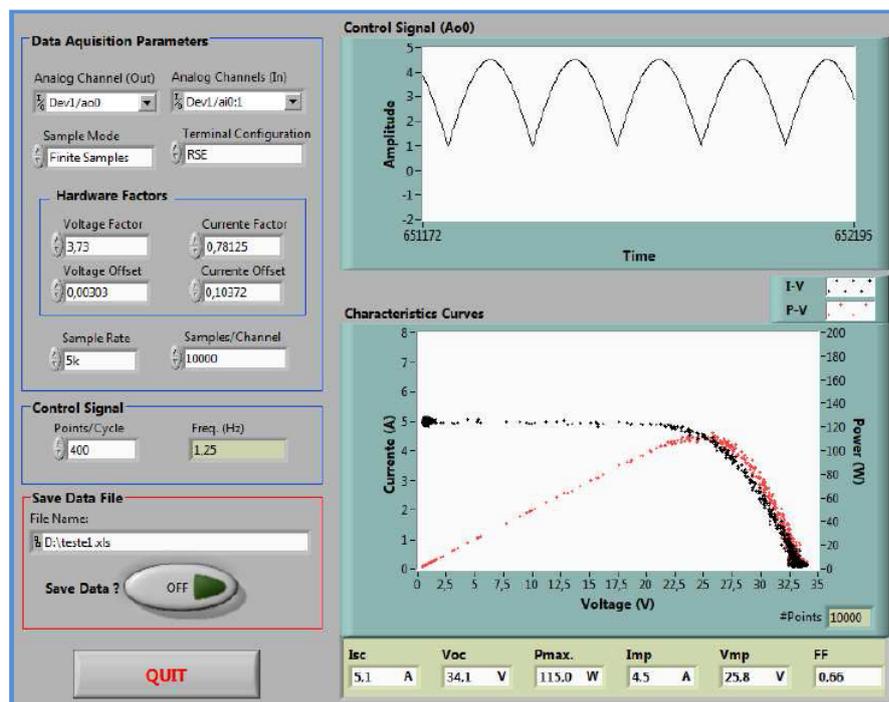
Figura 38 – Área de operação segura para o MOSFET IRFP260N mostrando onde devem estar as curvas I_xV



Fonte: (LEITE et al., 2012)

Na Figura 39 é mostrada a interface construída por (LEITE et al., 2012) no *software* LabVIEW, na parte superior é mostrado a forma de onda do sinal de *gate* da chave utilizada e na parte inferior são mostradas as curvas IxV e PxV com 10000 pontos cada uma. Vários parâmetros das curvas podem ser visualizados como: corrente de curto circuito, tensão de circuito aberto e fator de forma. Variáveis como irradiância solar e temperatura não são medidas nesse trabalho.

Figura 39 – Interface gráfica de gerenciamento desenvolvida por (LEITE et al., 2012)

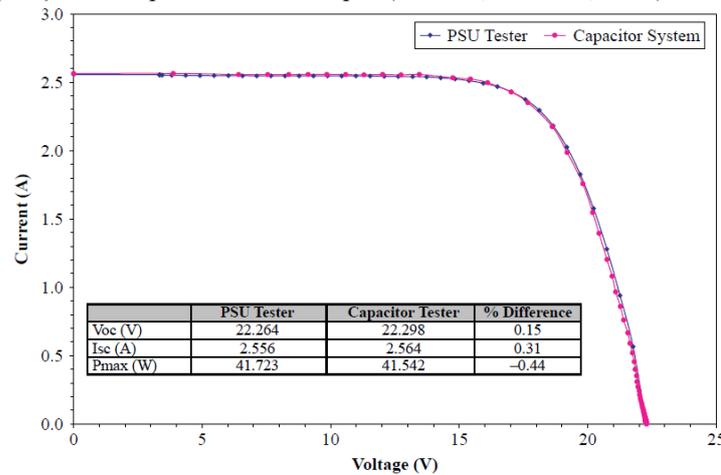


Fonte: (LEITE et al., 2012)

Em (SIMON; MEYER, 2006) é construído um traçador de curva IxV pelo método de carga eletrônica. O diferencial deste artigo encontra-se na comparação dos resultados obtidos do traçador desenvolvido com resultados obtidos através de um traçador comercial no mesmo instante de tempo. A curva IxV adquirida não passa por nenhum processo de ajuste, sendo apenas a representação real.

Na Figura 40 são mostradas duas curvas IxV, a curva relativa a *PSU tester* é resultado do traçador desenvolvido e a relativa a *capacitor tester* é relativa ao traçador comercial utilizado para validação. Ambas as curvas são relativas ao mesmo módulo FV nas condições de irradiância solar igual a 1047 W/m² e temperatura da parte traseira do módulo FV igual a 61 °C. A análise da Figura 40 mostra que a diferença percentual dos valores de tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito foram inferiores a 1% mostrando, assim, a exatidão do dispositivo desenvolvido.

Figura 40 – Comparação do dispositivo montado por (SIMON; MEYER, 2006) e um traçador comercial



Fonte: (SIMON; MEYER, 2006)

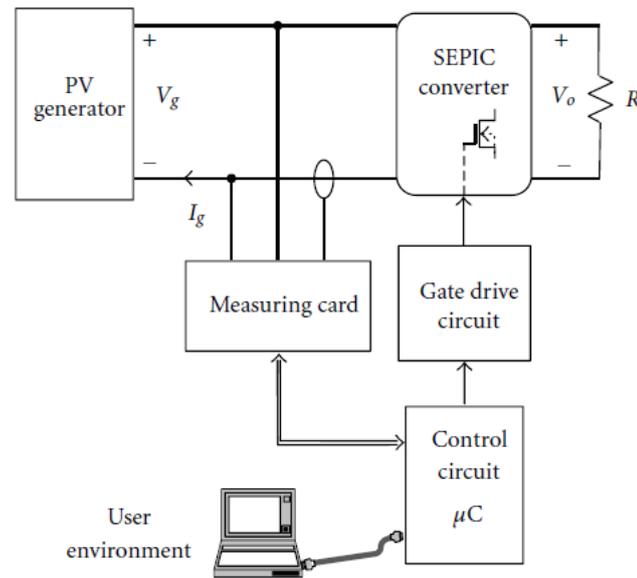
Em (DURÁN et al., 2012) o dispositivo montado para traçar a curva IxV de módulos FV utiliza um conversor cc-cc SEPIC. Este conversor é do tipo *buck-boost* podendo a relação entre tensão de saída e tensão de entrada ser maior ou menor que 1. A relação de transformação pode ser controlada através do *duty-cycle* do sinal de chaveamento.

Dentre várias topologias com a mesma razão de conversão e resistência de entrada, apenas duas são apontadas como ideais para a caracterização do módulo FV: CUK e SEPIC. Ambas apresentam corrente de entrada não pulsada; poucos problemas com ruído; possuem o mesmo número de componentes; as chaves se submetem ao mesmo *stress* além de fornecerem valores de eficiências próximos. A escolha do conversor SEPIC se deve ao capacitor *link* ser menor em relação ao do conversor CUK.

Uma das características importantes deste método é a possibilidade, através do chaveamento adequado, de caracterização da curva IxV apenas para determinadas regiões. O tempo total de aquisição da curva IxV completa é de 0,2 s, para traçar apenas parte da curva esse tempo pode ser menor. Outra implementação diferenciada é a aproximação dos pontos obtidos por uma equação polinomial para a curva se tornar melhor ajustada.

Na Figura 41 é mostrado o diagrama montado para realizar a caracterização da curva IxV. Através de uma interface construída no *software* LabVIEW um comando é capaz de gerar um PWM a partir de um PIC para a chave do conversor, ao mesmo tempo o PIC lê os dados dos sensores de corrente e tensão. Posteriormente, esses dados são repassados para a interface. O dispositivo possui dois modos de operação: modo traçador e modo gerador. No primeiro modo, os sensores recolhem dados de tensão e corrente; e as curvas são mostradas na interface construída. No segundo modo, um osciloscópio é utilizado para leitura dos dados de tensão e corrente.

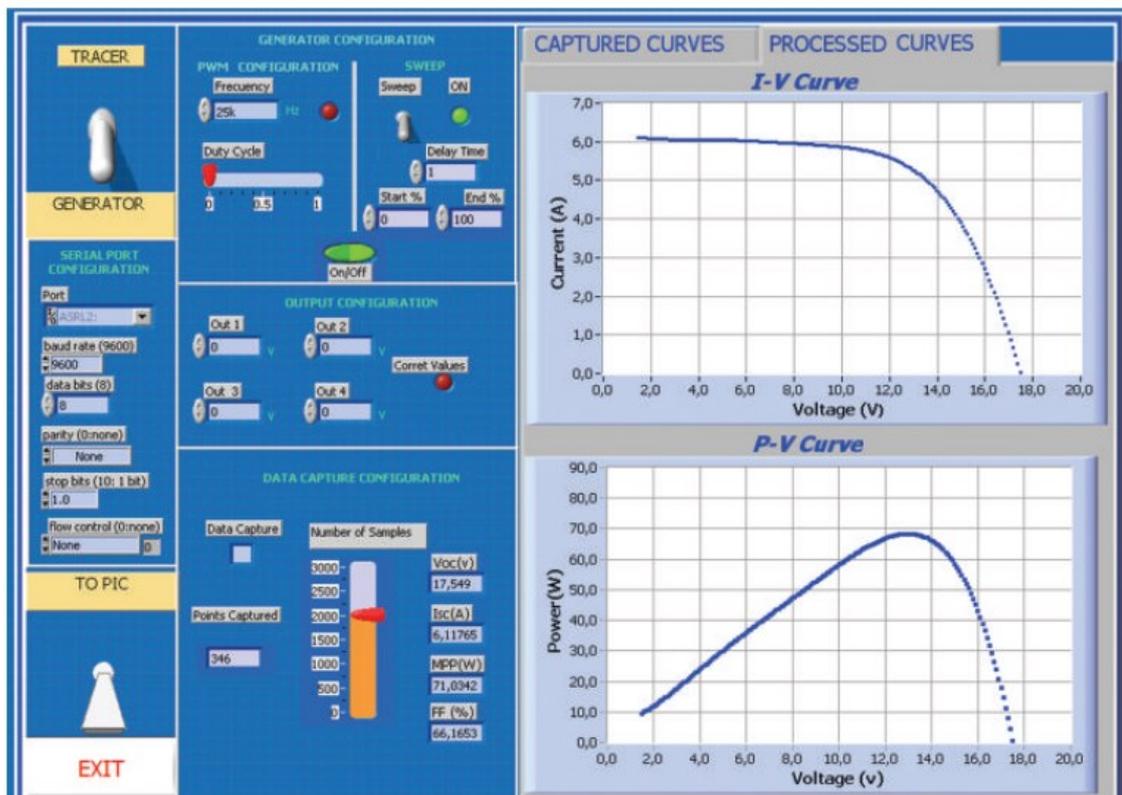
Figura 41 – Diagrama esquemático do dispositivo montado por (DURÁN et al., 2012)



Fonte: (DURÁN et al., 2012)

Na Figura 42 é mostrada a interface gráfica desenvolvida onde curvas $I \times V$ e $P \times V$ são mostradas. Vários parâmetros dessas curvas podem ser visualizados. As curvas são medidas nas condições de teste padrão (STC) para o módulo FV Isofoton I-94/12.

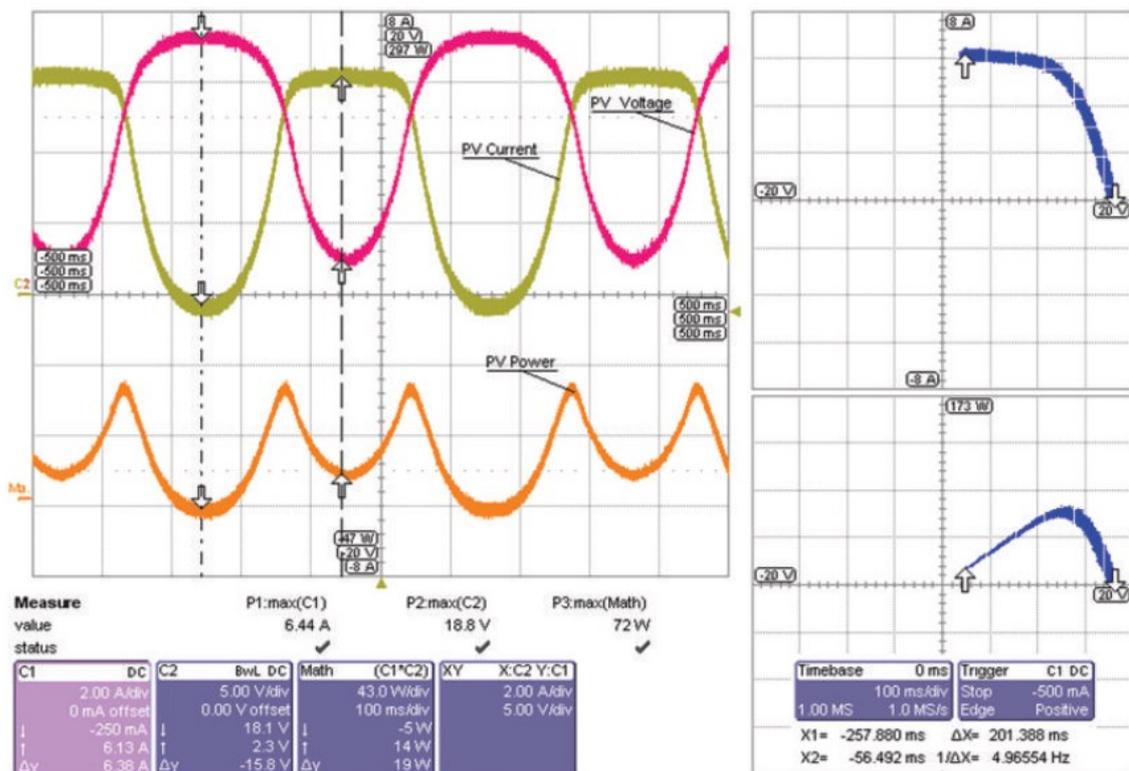
Figura 42 – Interface gráfica desenvolvida no *software* LabVIEW por (DURÁN et al., 2012)



Fonte: (DURÁN et al., 2012)

Na Figura 43 são mostradas as curvas $I \times V$ e $P \times V$ obtidas por (DURÁN et al., 2012) a partir do osciloscópio, no modo gerador, com ponteiros de corrente e tensão. Estas curvas não apresentam ajustes a partir de uma aproximação polinomial o que visualmente as deixa distorcidas parcialmente. Ainda neste modo, diversos parâmetros do PWM que são gerados pelo PIC são ajustados a partir da interface como: frequência, *duty cycle* e tempo de varredura.

Figura 43 – Curvas obtidas a partir do osciloscópio por (DURÁN et al., 2012)



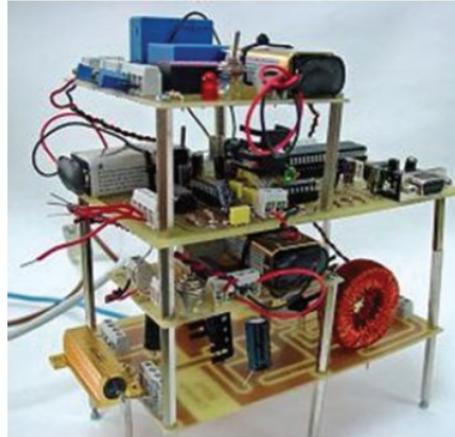
Fonte: (DURÁN et al., 2012)

Em (DURÁN et al., 2012) é apontado que seu sistema é modular, pois a partir de vários conversores idênticos é possível traçar a curva $I \times V$ para diversos módulos FV. Outra característica apontada para o sistema é a flexibilidade, pois devido ao tamanho compacto do circuito o mesmo pode ser levado para medições mais próximas dos painéis em lugares isolados onde geralmente os módulos FV ficam implantados. Esta é uma boa vantagem em relação a outros métodos que possuem um sistema com vários equipamentos.

Os métodos apontados com melhores características em relação à fidelidade e tempo de aquisição da curva $I \times V$ são: conversor cc-cc e fonte de 4 quadrantes. Sendo esta última apontada com alto custo, pouca flexibilização de uso e baixa modularidade.

Na Figura 44 é mostrado o circuito elétrico desenvolvido por (DURÁN et al., 2012). O mesmo possui autonomia em relação à rede elétrica sendo alimentado por baterias.

Figura 44 – Circuito elétrico montado por (DURÁN et al., 2012)

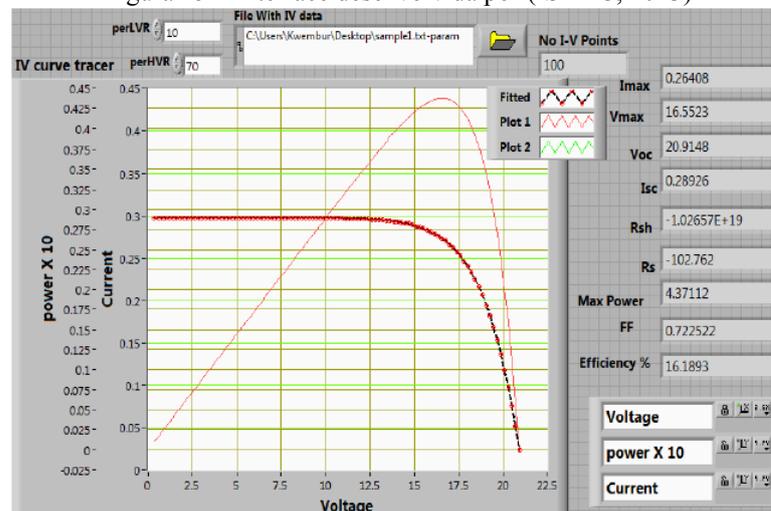


Fonte: (DURÁN et al., 2012)

Em (ISAAC, 2013) é montado um dispositivo utilizando o método de resistor variável. Uma aplicação no *software* LabVIEW é desenvolvida para comunicação do PC com a placa de aquisição 6009 do fabricante *National Instruments*. O experimento contou com um reostato de 10 k Ω como carga sendo seu valor variado do máximo ao mínimo. O sensor de corrente utilizado foi resistor shunt de 2,5 m Ω e o sensor de tensão foi um divisor resistivo com resistores de 10 k Ω e 68 k Ω .

Na Figura 45 é mostrada a interface gráfica desenvolvida por (ISAAC, 2013), vários parâmetros são mostrados relativos as curva IxV e PxV incluindo o número total de pontos das curvas.

Figura 45 – Interface desenvolvida por (ISAAC, 2013)



Fonte: (ISAAC, 2013)

Em (SAHBEL et al., 2013) é apresentado um circuito elétrico para traçar a curva IxV de módulos FV utilizando uma carga eletrônica com MOSFET IRFP260N. Uma placa de aquisição NI USB 6008 é responsável por gerar um sinal para o *gate* da chave (3,4 V a 5,5 V) além de receber os dados de tensão e corrente dos sensores. Uma interface no *software* LabVIEW é desenvolvida para gerenciar o sistema, cada curva possui 1000 pontos e o tempo total de aquisição é de 6 s.

4.3 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foi visto que os principais métodos de caracterização elétrica de módulos FV são: resistor variável, capacitivo, fonte de 4 quadrantes, conversores dc-dc e carga eletrônica. Cada um destes métodos caracteriza os módulos FV do instante de curto circuito ao instante de circuito aberto. Alguns métodos são capazes de caracterização da curva IxV no segundo e quarto quadrantes.

Os principais parâmetros que devem ser observados quando da escolha do método são: custo, número de pontos da curva e tempo de caracterização. Quanto maior o número de pontos e menor o tempo de aquisição da curva mais definida ela será, pois todos os pontos serão medidos numa mesma condição de irradiância solar e temperatura do módulo.

5 PROTÓTIPO DESENVOLVIDO DE TRAÇADOR DE CURVA IxV

Neste capítulo é apresentado o dispositivo desenvolvido no Laboratório de Energias Alternativas (LEA) da Universidade Federal do Ceará (UFC) para caracterização de módulos FV de até 160 Wp. O dispositivo montado visou robustez e pequeno tempo de caracterização. Antes da montagem, foram realizadas simulações no *software* Proteus para comprovar o funcionamento do circuito elétrico proposto.

Visando à melhor compreensão do processo de funcionamento do dispositivo é exposta, inicialmente, a parte experimental e posteriormente as simulações realizadas.

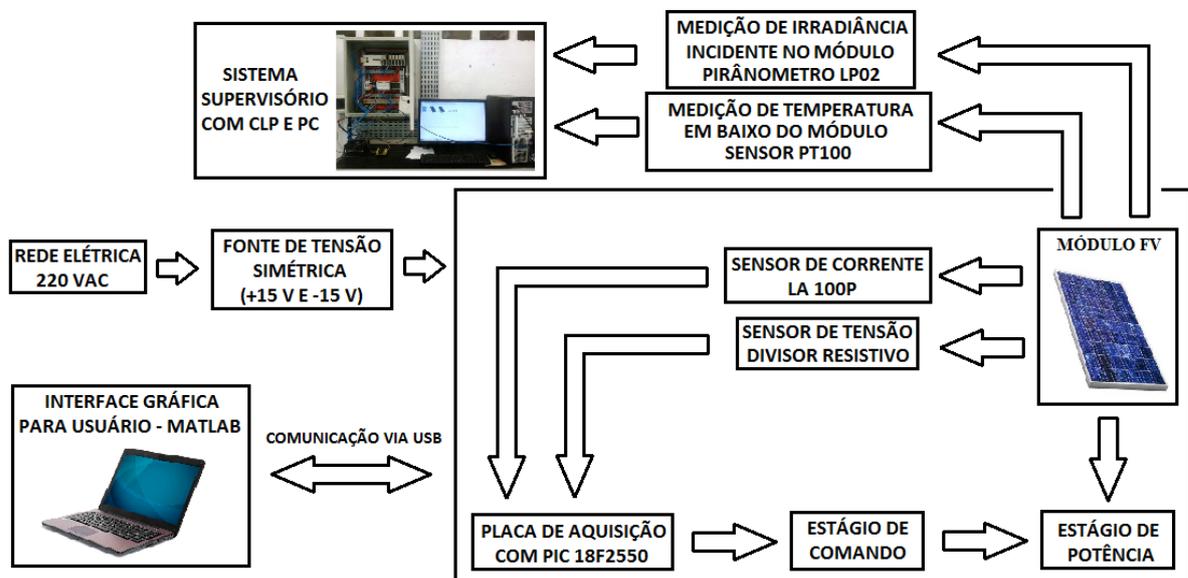
5.1 Descrição Experimental

O método de carga eletrônica foi escolhido para o desenvolvimento do dispositivo devido à necessidade do uso do mesmo apenas em módulos FV com potências de pico de até 160 W e ao baixo custo associado ao método.

O sistema de medição conta com sensores de tensão, corrente, irradiância solar e temperatura. Uma interface de gerenciamento para usuário foi desenvolvida no *software* Matlab para mostrar os parâmetros das curvas IxV e PxV e para conexão com a placa de aquisição.

Na Figura 46 é mostrado o diagrama de funcionamento do traçador de curva IxV desenvolvido.

Figura 46 – Diagrama geral do traçador desenvolvido



Fonte: Autoria própria

Para medição das curvas no dispositivo os seguintes passos devem ser iniciados sequencialmente:

- a) Acionamento por um usuário do botão MEDIR na interface no computador;
- b) A interface passa a se comunicar via USB com a placa de aquisição;
- c) A placa de aquisição aciona o estágio de comando;
- d) O estágio de comando controla o estágio de potência que por sua vez é responsável por controlar a passagem de corrente do curto circuito ao circuito aberto do módulo FV;
- e) Durante o transiente de curto circuito ao circuito aberto os sensores de tensão e corrente enviam dados para a placa de aquisição e esta os envia para a interface que os armazena em vetores;
- f) Após recolher 800 pares de tensão e corrente, a interface encerra a comunicação com a placa de aquisição e traça as curvas $I \times V$, $P \times V$, das variações de tensão e corrente durante o transiente de curto circuito ao circuito aberto; além de expor os parâmetros elétricos dessas curvas.

Os sensores de temperatura e de irradiância solar são conectados a um sistema supervisão através da conexão de um CLP (Controlador Lógico Programável) e um computador. A rede elétrica (220 VAC) através de uma fonte simétrica de 15 V alimenta o sensor de corrente utilizado e o estágio de comando.

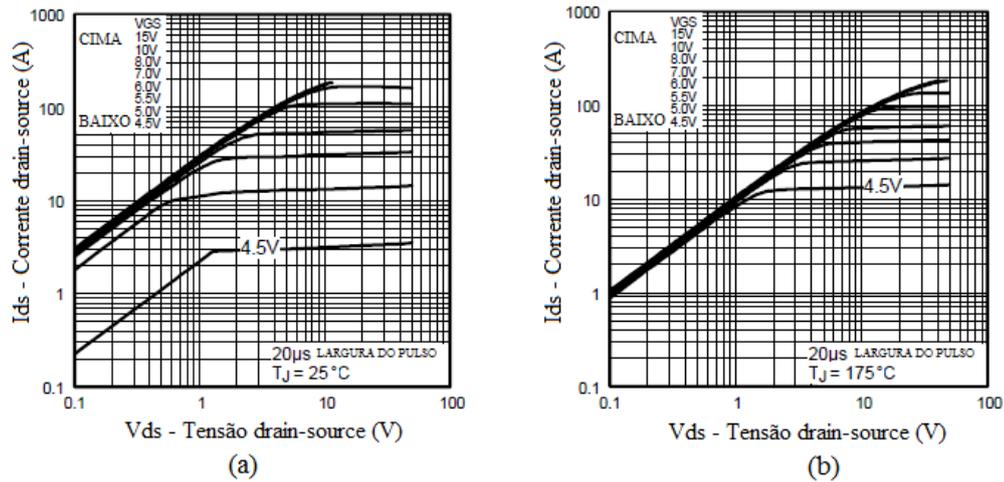
5.1.1 Descrição da Carga Eletrônica Utilizada

O estágio de potência da carga eletrônica utilizada é representado pelo MOSFET IRFP260N devido ao mesmo possuir as seguintes características elétricas:

- Resistência entre *drain* e *source* igual a 40 m Ω ; o que é ideal para evitar quedas de tensão elevadas devido à corrente do módulo FV. Por exemplo, com esta resistência e uma corrente de 5 A sendo fornecida pelo módulo FV, uma queda de tensão de aproximadamente 0,2 V seria gerada;
- Suportar correntes de *drain* até 50 A;
- Dissipar potências de até 300 W; a carga eletrônica deve ser capaz de dissipar a potência máxima fornecida pelo módulo FV, assim é ideal que consiga dissipar valores elevados de potência.

Na Figura 47 são mostradas as curvas características referentes ao MOSFET IRFP260N para as condições de temperatura de 25 °C e 175 °C. Para uma tensão de *gate-source* de 5 V esta chave já consegue conduzir mais de 10 A.

Figura 47 – Curvas características para o MOSFET IRFP260N para as temperaturas de junção: (a) 25 °C; (b) 175 °C



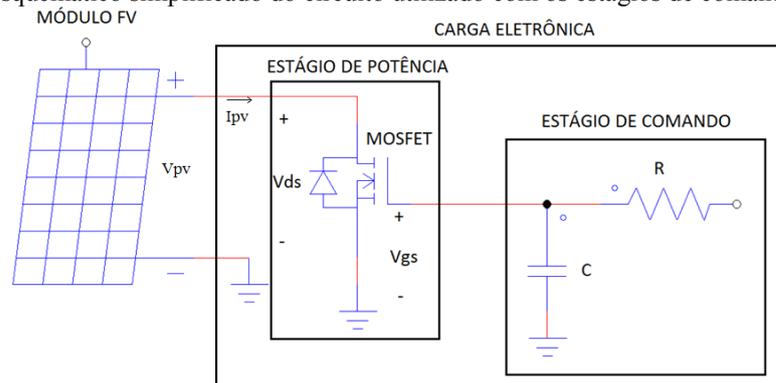
Fonte: Adaptado do Catálogo MOSFET IRFP260N

5.1.2 Estágio de Potência

No estágio de potência, o MOSFET estará funcionando na região de saturação sendo controlado pela tensão de *gate-source*. Com um adequado sinal de controle para a chave é possível armazenar os pontos de encontro entre as curvas características da chave e do módulo FV para as mesmas condições de temperatura e irradiância.

Na Figura 48 é mostrado o esquemático simplificado do circuito utilizado. Um capacitor é colocado em paralelo com o *gate* da chave para gerar uma variação de tensão adequada. No processo de descarregamento deste capacitor, o módulo é caracterizado.

Figura 48 – Esquemático simplificado do circuito utilizado com os estágios de comando e de potência



Fonte: Adaptado de (BELMILI et al., 2010)

As Eq. (5.1) e (5.2) representam o princípio básico de operação da carga eletrônica com MOSFET.

$$I_{pv} = I_{ds} \quad (5.1)$$

$$V_{pv} = V_{ds} \quad (5.2)$$

Onde I_{pv} e V_{pv} são respectivamente corrente e tensão de saída do módulo FV; I_{ds} e V_{ds} são respectivamente corrente e tensão entre *drain* e *source* do MOSFET.

Na região de saturação, o MOSFET irá funcionar como uma fonte de corrente controlada pela tensão de *gate-source*. Nesta região, a corrente de *drain* pode ser expressa pela Eq. (5.3).

$$I_{ds} = K_n (V_{gs} - V_{th})^2 \quad (5.3)$$

Onde K_n é uma constante específica da construção do MOSFET; V_{th} é a tensão de *threshold* do MOSFET e V_{gs} é a tensão entre *gate* e *source* do MOSFET.

Quando o MOSFET estiver na região ôhmica satisfazendo a condição exposta na Eq. (5.4) terá o comportamento de uma resistência variável controlada também pela tensão entre *gate* e *source*. A corrente de *drain* para esta região é expressa na Eq. (5.5).

$$V_{gs} < V_{th} - V_{ds} \quad (5.4)$$

$$I_{ds} = K_n [2(V_{gs} - V_{th})V_{ds} - V_{ds}^2] \quad (5.5)$$

5.1.3 Estágio de Comando

No estágio de comando foi utilizado o *driver* ULN2003A composto por sete transistores Darlington. O circuito elétrico detalhado do estágio de comando utilizado com os sensores de corrente e tensão é mostrado na Figura 49.

Os pinos RB6 e RB5 na Figura 49 possuem origem no microcontrolador PIC18F2550 utilizado na placa de aquisição. O princípio de funcionamento do estágio de comando segue as seguintes lógicas:

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

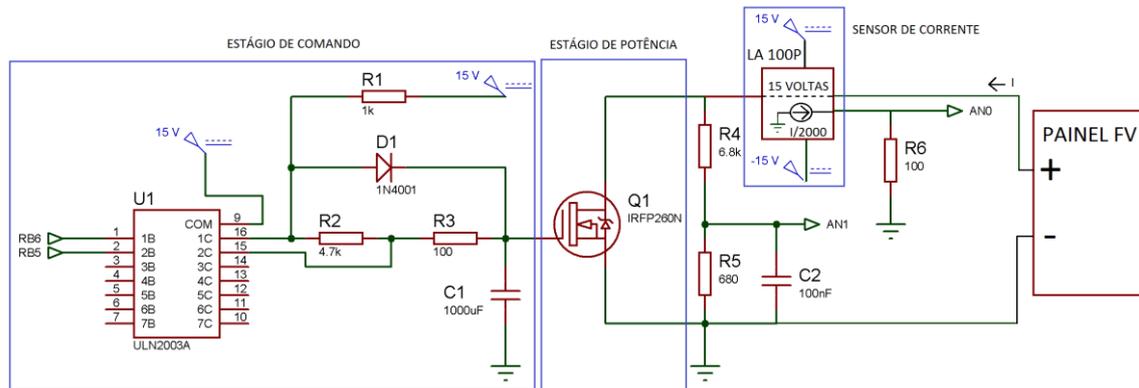
Para aquisição da curva IxV do módulo FV, inicialmente, o capacitor é carregado, rapidamente, com 15 V colocando-se os pinos RB5 e RB6 em nível lógico baixo. Em seguida o capacitor é descarregado colocando-se RB5 ou RB6 em nível lógico alto.

Optou-se pelo capacitor se descarregar pelos resistores R2 e R3 devido à compatibilidade com a velocidade de aquisição do PIC18F2550 e o tempo de transmissão de dados entre PIC-PC. Com sistemas de aquisição de dados mais velozes é possível uma caracterização mais rápida através do descarregamento do capacitor 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 curto circuito e o 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 traçados na interface de usuário desenvolvida.

Para diminuir o tempo de caracterização e evitar que o capacitor se carregue até 15 V desnecessariamente (com 5 V de tensão entre *gate* e *source* a chave já é capaz de curto-circuitar o módulo) foi alocado um *delay* de tempo de aproximadamente 0,4 s no código do microcontrolador após o envio do comando para colocar RB5 e RB6 em nível lógico baixo e antes do envio do comando para descarregar o capacitor.

Figura 49 – Circuito elétrico utilizado para caracterização de módulos FV



Fonte: Autoria própria

O sensor de tensão utilizado foi um divisor resistivo com resistores de 680 Ω (R4) e 6,8 k Ω (R5), a tensão adquirida no resistor de 680 Ω é lida pela placa de aquisição no pino AN1 do microcontrolador, o capacitor C2 de 100 nF foi utilizado para filtrar distorções desta tensão. O sensor de corrente utilizado foi o LA 100P cujo funcionamento se baseia no efeito Hall para medição da corrente. Devido a este sensor possui uma corrente nominal de 100 A fornecendo 5 V de saída para esta corrente e ao fato de que foi definido como 5,8 A a corrente máxima a ser medida, foram enroladas 15 voltas para aumentar a sensibilidade de aquisição da corrente. Assim, quando o módulo fornecer 5,8 A, o sensor irá perceber uma corrente de 87 A, fornecendo 4,35 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.

5.1.4 Instrumentação

5.1.4.1 Medições de Corrente

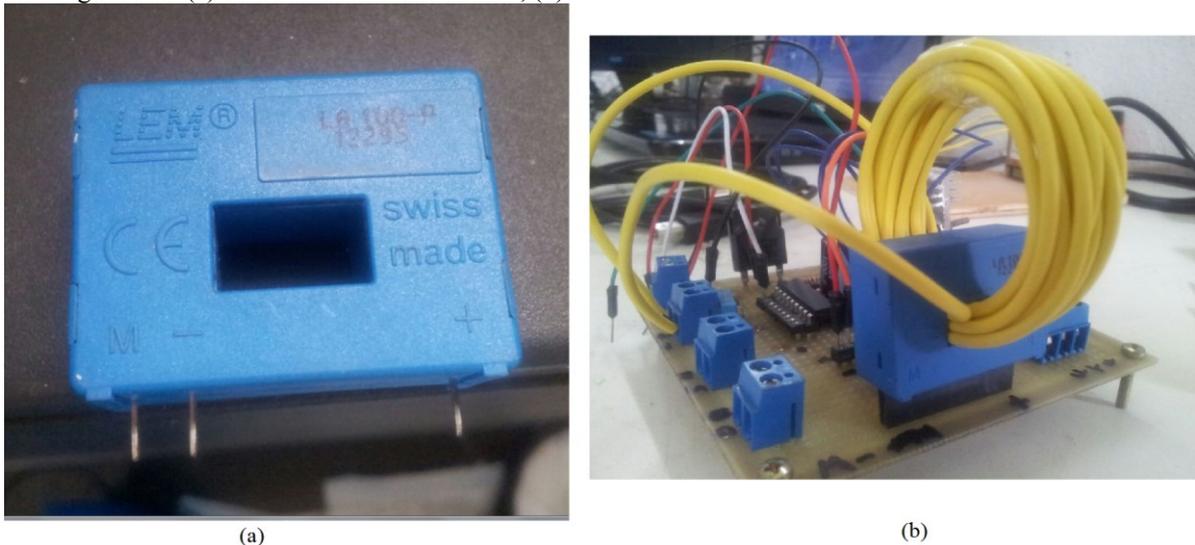
Na Figura 50 é mostrado o sensor de corrente LA 100P utilizado. Este é um sensor de efeito Hall com as seguintes características:

- Corrente nominal *rms* (do inglês, *root mean square*) primária igual a 100 A;
- Razão de conversão 1:2000;
- Tensão de alimentação igual a $\pm 12, \dots, \pm 15$ V;

- Para uma tensão de alimentação de ± 15 V possui um consumo de corrente de, aproximadamente, 60 mA;
- Corrente de *offset* máxima para uma temperatura ambiente de 25 °C igual a 0,1 mA;
- Precisão para uma temperatura ambiente de 25 °C igual a $\pm 0,45\%$.

A escolha do sensor se deve a sua boa sensibilidade comparada a outros sensores de corrente, ao seu baixo *offset* de tensão, a sua rápida resposta além de seu baixo consumo de corrente. Para gerar um sinal de tensão para o PIC, a saída do sensor foi conectada a um resistor de 100 Ω . Para aumentar a sensibilidade, foram enroladas 15 voltas ao redor do eixo do sensor. O cabo utilizado foi de 1 mm² devido ao espaço disponível no sensor e ao mesmo ter capacidade de suportar correntes maiores do que 10 A.

Figura 50 – (a) Sensor de corrente LA100P; (b) Sensor utilizado com as 15 voltas de um cabo de 1 mm²



Fonte: Autoria própria

Para uma corrente no primário de 0,1 mA, este sensor dará como resposta uma tensão de aproximadamente 75 mV no resistor de 100 Ω . Este valor de tensão está dentro da faixa de leitura do PIC de 10 bits utilizado.

Através da Eq. (5.6), que expressa a resolução para leitura de um PIC de 10 bits, chega-se um valor de 4,2 mV como a resolução máxima que pode ser lida devido a uma alimentação do PIC com 4,3 V. Esta resolução de leitura torna o sistema de aquisição capaz de medir variações de corrente do módulo FV da ordem de 0,37 mA.

$$Resolução = \frac{V_{alim}}{2^{10} - 1} \quad (5.6)$$

Devido ao PIC ser alimentado com 4,33 V, o valor máximo de corrente do módulo FV que pode ser lido é de aproximadamente 5,75 A. Este valor é um fator de escolha do módulo FV a ser utilizado, pois as correntes de curto circuito dos mesmos devem possuir valores inferiores a 5,75 A, caso contrário o PIC poderá ser danificado.

Os valores de tensão, fornecidos pelo sensor de corrente, lidos pelo PIC são convertidos em valores de corrente apenas quando da passagem para interface no *software* Matlab, pois caso esses valores fossem convertidos no próprio PIC um tempo maior de conversão seria gasto inviabilizando a aquisição de muitos pontos.

5.1.4.2 Medições de Tensão

Para medição de tensão foram utilizados resistores de 680 Ω (R5) e 6,8 k Ω (R4) com precisão de $\pm 1\%$. Foi utilizado um capacitor (C2) de poliéster com valor de 100 nF / 50 V em paralelo com o resistor de 680 Ω para diminuir o ruído do sinal medido devido às diferenças de impedâncias do resistor e do AD do PIC.

Os valores dos resistores foram escolhidos partindo-se da definição do valor máximo de tensão de circuito aberto a ser lida. Esse valor máximo foi estabelecido em 48 V devido à maioria dos módulos FV possuírem tensão de circuito aberto abaixo deste valor. Com a relação de medição de aproximadamente 9,1%, uma tensão de circuito aberto de 48 V pode ser convertida e lida pelo PIC numa tensão de 4,37 V que está bem próxima da tensão máxima que pode ser lida pelo PIC.

5.1.4.3 Medições de Temperatura

As medições de temperatura utilizaram sensores do tipo termo resistência PT100 devidamente calibrados com um padrão de temperatura. Os mesmos foram acoplados a transmissores de temperatura para calibração adequada e estes foram conectados a um CLP.

O CLP fica conectado a um computador e o *software* Elipse Scada é utilizado como interface de gerenciamento. As medições são atualizadas a cada segundo.

O princípio de medição de temperatura utilizando termômetros de resistência se baseia na variação do valor da resistência elétrica de um condutor metálico em função da temperatura.

Foram utilizados 3 módulos FV (20 Wp, 87 Wp e 160 Wp) nos experimentos, sendo medidas as temperaturas na parte central da superfície traseira dos módulos. A escolha da localização do ponto de medição de temperatura se deve à maior temperatura ser encontrada no centro do módulo e a temperatura da junção ser mais próxima da temperatura da parte traseira. Outro sensor de temperatura foi utilizado para medição da temperatura ambiente.

A escolha do sensor PT100 se deve principalmente a sua:

- Boa estabilidade de medição;
- Grande precisão de leitura ($\pm 3\%$);
- Pouca influência de ruídos;
- Medição numa faixa de temperatura variando entre $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $150\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Alta resistividade que possibilita uma boa sensibilidade.

Na Figura 51 é mostrado o detalhe do encapsulamento metálico no sensor PT100 utilizado na parte traseira dos módulos FV escolhidos para testes.

Figura 51 – Sensor PT100 utilizado



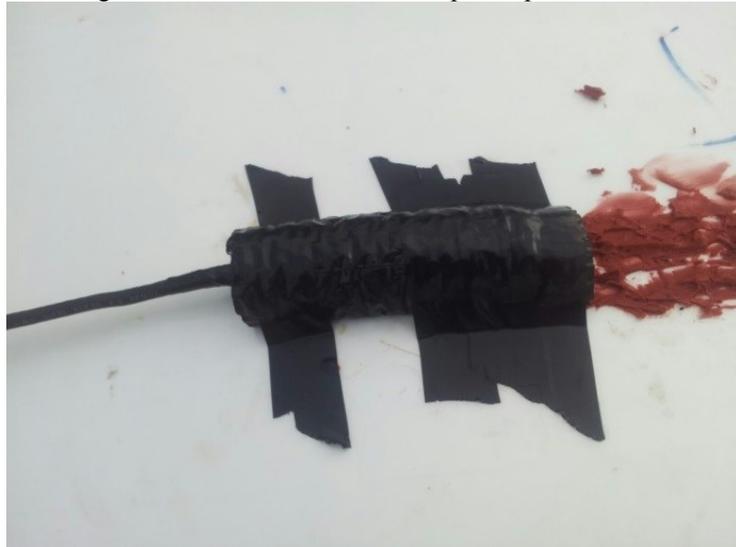
Fonte: Autoria própria

Para garantir a isolamento térmica adequada do PT100 no módulo foi utilizada uma espuma de poliuretano cobrindo o sensor bem como silicone vermelho, este último também foi utilizado para fixação do sensor ao módulo. Após sua vulcanização o silicone adquire

consistência de borracha e evita que o sensor perca contato com a superfície traseira do módulo.

Na Figura 52 é mostrado o sensor coberto pela espuma e na Figura 53 é mostrada a espuma coberta com silicone vulcanizado.

Figura 52 – Sensor PT100 coberto pela espuma isolante



Fonte: Autoria própria

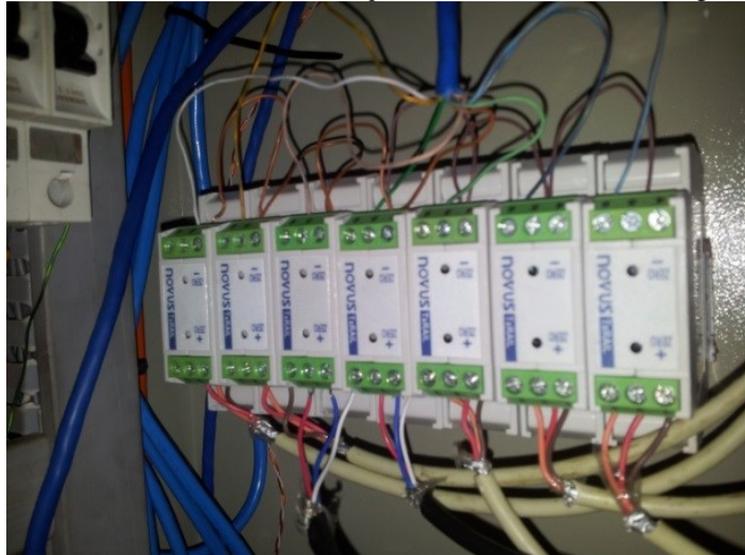
Figura 53 – Sensor e espuma acoplados ao módulo através do silicone



Fonte: Autoria própria

Na Figura 54 são mostrados os transmissores de temperatura utilizados. O uso desses transmissores tem como objetivo a isolamento do sinal entre entrada e saída e o ajuste de *offset* para as medições de temperatura ambiente e do módulo.

Figura 54 – Detalhe dos transmissores de temperatura utilizados numa configuração de 3 fios



Fonte: Autoria própria

5.1.4.4 Medições de Irradiância Solar

A irradiância solar foi medida através de um piranômetro (modelo LP02) instalado no teto do LEA e próximo ao local onde foram realizados os testes com os módulos FV.

Na Figura 55 é mostrado o sensor de irradiância solar utilizado.

Figura 55 – Piranômetro utilizado



Fonte: Autoria própria

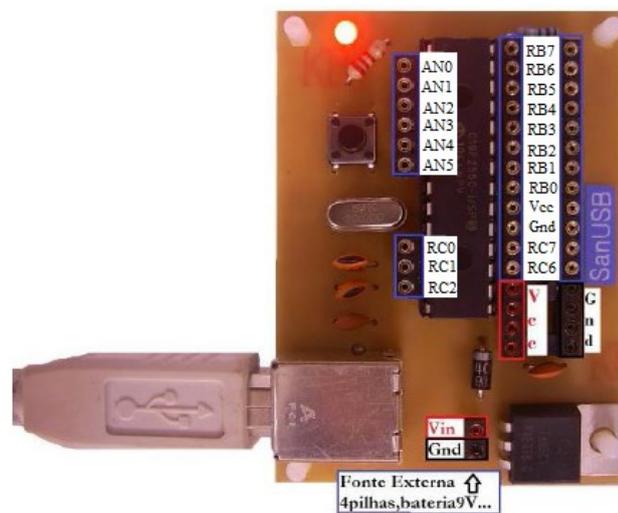
O pirômetro utilizado foi calibrado em 24 de abril de 2014 e possui um erro máximo de medição de aproximadamente 5%. A faixa de operação varia de 0 a 1600 W/m² e a espectral de 285 a 3000 nm. (HUKSEFLUX)

5.1.5 Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de tensão e corrente utilizado contou com uma placa de aquisição SanUSB com PIC18F2550. A linguagem de programação do PIC foi .C com compilador CCS utilizando o *software*, de uso liberado, PCWH COMPILER.

Na Figura 56 é mostrado o tipo de placa de aquisição utilizado com a indicação dos principais pinos.

Figura 56 – Placa SanUSB com PIC18F2550



Fonte: Adaptado de (SanUSB TUTORIAL)

O código escrito no PIC possui os seguintes objetivos:

- Conexão com a interface no *software* Matlab;
- Indicação de conexão correta com o PC através do LED em RB7 piscando com frequência de 2 Hz;
- Indicação do período de medição dos pontos da curva IxV através do LED em RB7 apagado;
- Recepção do número de pontos a ser medido da curva IxV através de um valor pré-definido dentro do código no *software* Matlab. Este número foi definido como 800 devido a vários testes mostrarem que este número é suficiente para caracterizar de forma completa a curva IxV dos módulos FV testados. Testes de tempo com osciloscópio mostraram que cada par de pontos (tensão e corrente) consome aproximadamente 3,8 ms para ser medido devido ao tempo de compilação das linhas de código dentro do laço de medição. Desta forma,

esta parte de aquisição dos pontos da curva $I \times V$ possui um tempo de aproximadamente 3 s.;

- Acionamento do estágio de comando através dos pinos RB6 e RB5 conectados ao *driver* ULN2003A.
- Leitura das tensões fornecidas pelos sensores (AN0 – conectado ao sensor de corrente e AN1- conectado ao sensor de tensão);
- Envio dos dados lidos para o PC, após cada medição.

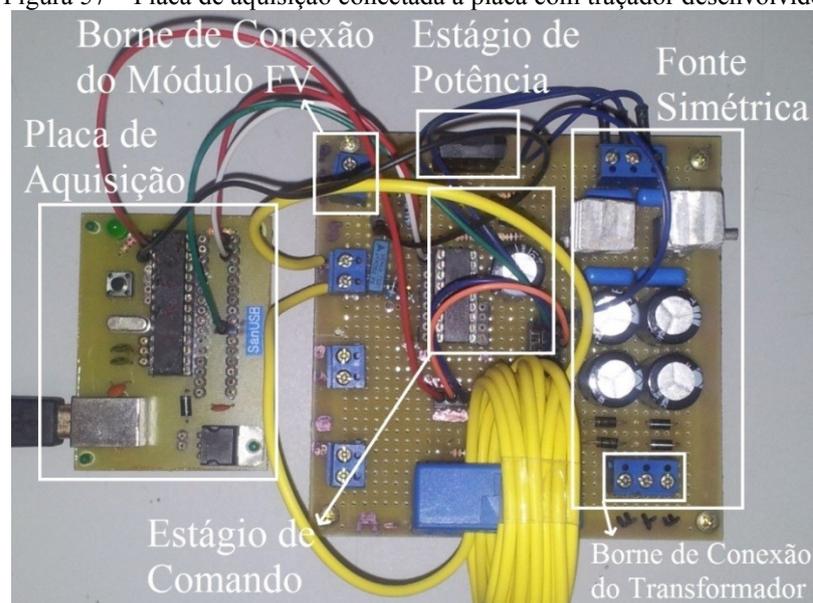
As principais características funcionais observadas que foram utilizadas na placa SanUSB são:

- Sistema de conversão AD de 10 bits;
- 13 canais independentes de conversão AD;
- 32 KBytes de memória flash e 2048 bytes de memória SRAM.

Estes valores de memória inviabilizaram um armazenamento dos dados medidos no PIC. Seriam necessários 2 vetores com no mínimo 800 dados de 32 bits. Desta forma, foi necessário realizar o armazenamento no *software* Matlab. Outra possibilidade de armazenamento seria na memória EEPROM, mas esta consome um tempo excessivo de escrita e leitura inviabilizando a aplicação.

Na Figura 57 é mostrada a placa de aquisição utilizada conectada à placa com sensores de tensão e corrente, fonte simétrica e estágios de potência e comando.

Figura 57 – Placa de aquisição conectada a placa com traçador desenvolvido



Fonte: Autoria própria

Alguns laptops e computadores, atualmente, não possuem interface de comunicação paralela nem serial EIA/RS 232, somente USB. Assim, o uso dessa placa de aquisição flexibiliza o uso do traçador desenvolvido em computadores mais baratos.

Outra vantagem é a dispensa do uso de uma fonte externa para alimentação do PIC, pois o mesmo é alimentado através da porta USB do PC. Além disso, com o uso da plataforma de gravação SANUSB, o conversor TTL – RS-232 que geralmente é utilizado para comunicação serial bidirecional é suprimido, sendo emulado via USB pelo protocolo CDC, que permite também a depuração do programa através da impressão via USB das variáveis do *firmware*.

Diversos compiladores estão disponíveis para transformar o código de .C em linguagem de máquina hexadecimal para gravação no microcontrolador: SDCC, C18, Hi-Tech e CCS. Foi utilizado o CCS na versão 3.245 devido versões superiores apresentarem *bugs* em algumas funções.

Na Figura 58 é mostrado o diagrama básico de gravação do código no PIC. Após a escrita em .C e compilação em CCS, um arquivo .hex é gerado e gravado no microcontrolador via USB. A comunicação serial é feita através de uma das portas COM virtuais do PC.

Figura 58 – Diagrama de gravação do código no microcontrolador



Fonte: Tutorial SanUSB

O sistema de aquisição de temperatura e irradiância solar foi o supervisório mostrado na Figura 59. Os sensores PT100 são conectados aos transmissores de temperatura e estes ao CLP. O piranômetro é conectado também ao CLP. Todos os dados são medidos e gerenciados através do *software* Eclipse Scada instalado no PC. Os dados são armazenados em planilhas no *software* Microsoft Excel com intervalos de 1 minuto.

Figura 59 – Supervisório de medição de temperatura e irradiância solar



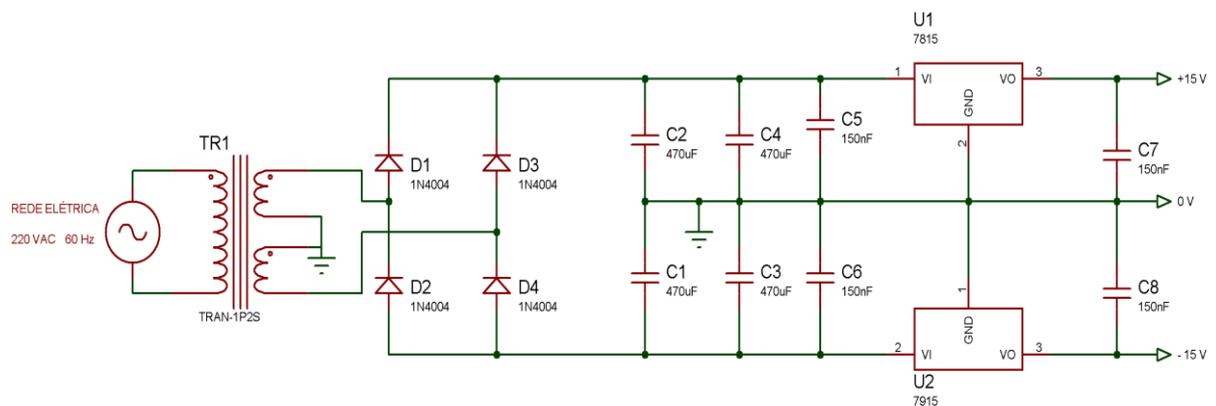
Fonte: Autoria própria

5.1.6 Fonte de Alimentação

Foi construída uma fonte de tensão simétrica de 15 V, mostrada na Figura 60, para alimentação do estágio de comando bem como para alimentação do sensor de corrente.

A fonte utiliza um transformador 220 VAC / 15 V com capacidade de 1 A. Quatro diodos retificadores 1N4004 são utilizados. Para amortizar distorções de tensão são utilizados 4 capacitores eletrolíticos de 470 μ F / 50 V, 4 capacitores cerâmicos de 150 nF / 100 V além dos reguladores de tensão 7815 e 7915. Estes regulam a tensão de saída para, respectivamente, +15 V e -15 V.

Figura 60 – Circuito elétrico da fonte simétrica construída



Fonte: Autoria própria

5.1.7 Interface Gráfica para Usuário

Uma interface de gerenciamento para usuário foi projetada e construída no *software* Matlab para garantir maior funcionalidade ao dispositivo desenvolvido além de garantir um tempo menor de cálculo de dados e construção de gráficos. Outro importante fator é o custo que pode ser economizado com esta interface em prol de displays gráficos que geralmente são utilizados em traçadores comerciais de pequeno porte.

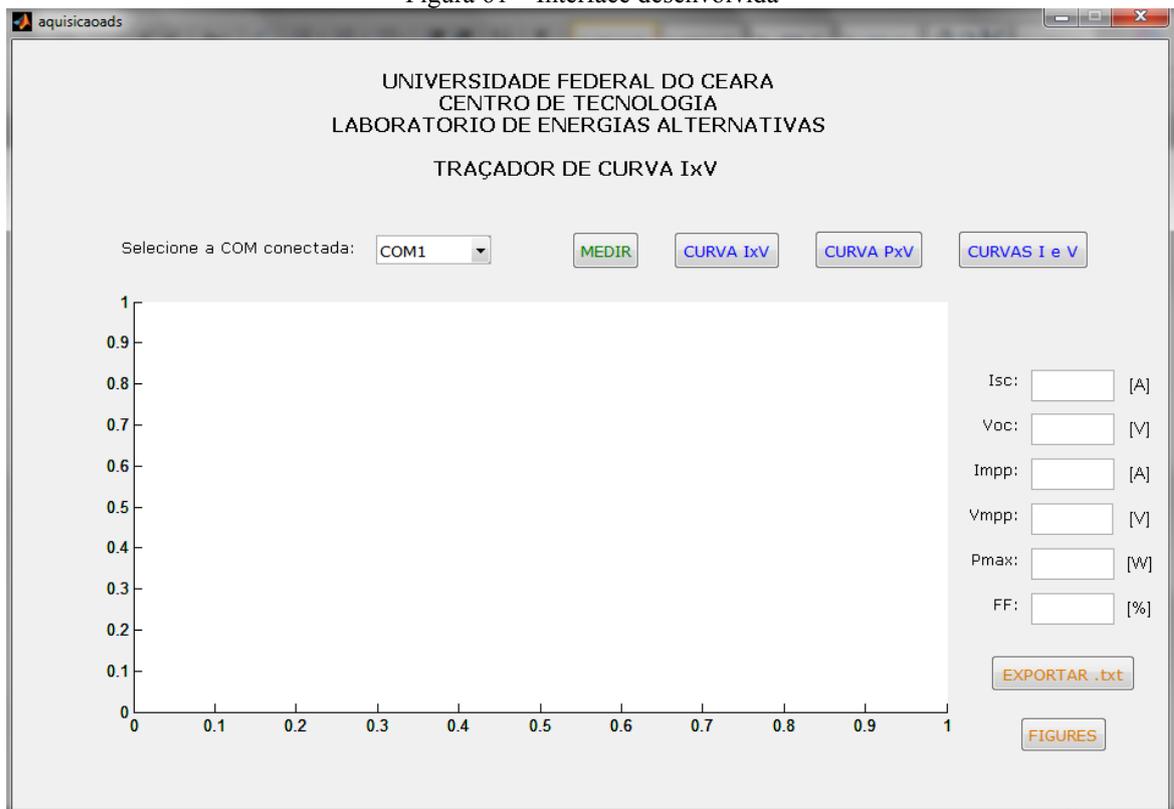
Os principais objetivos desta interface são mostrar o comportamento da curva IxV, PxV e do transiente de chaveamento, além de cálculo dos principais parâmetros elétricos do módulo FV.

No desenvolvimento inicial da plataforma as entradas eram: o número de pontos da curva IxV e a porta COM na qual a placa de aquisição fica conectada ao PC. Com o uso e análise do dispositivo, optou-se por definir o número de pontos medidos em 800, pois este número é suficiente para garantir toda a caracterização da curva IxV dentro dos limites de tensão e corrente pré-definidos. Desta forma, a única entrada na interface que o usuário deve alocar é a porta COM na qual a placa de aquisição foi conectada ao PC.

Na Figura 61 é mostrada a interface desenvolvida antes de seu acionamento. Foram alocados 6 botões na interface com as seguintes funções:

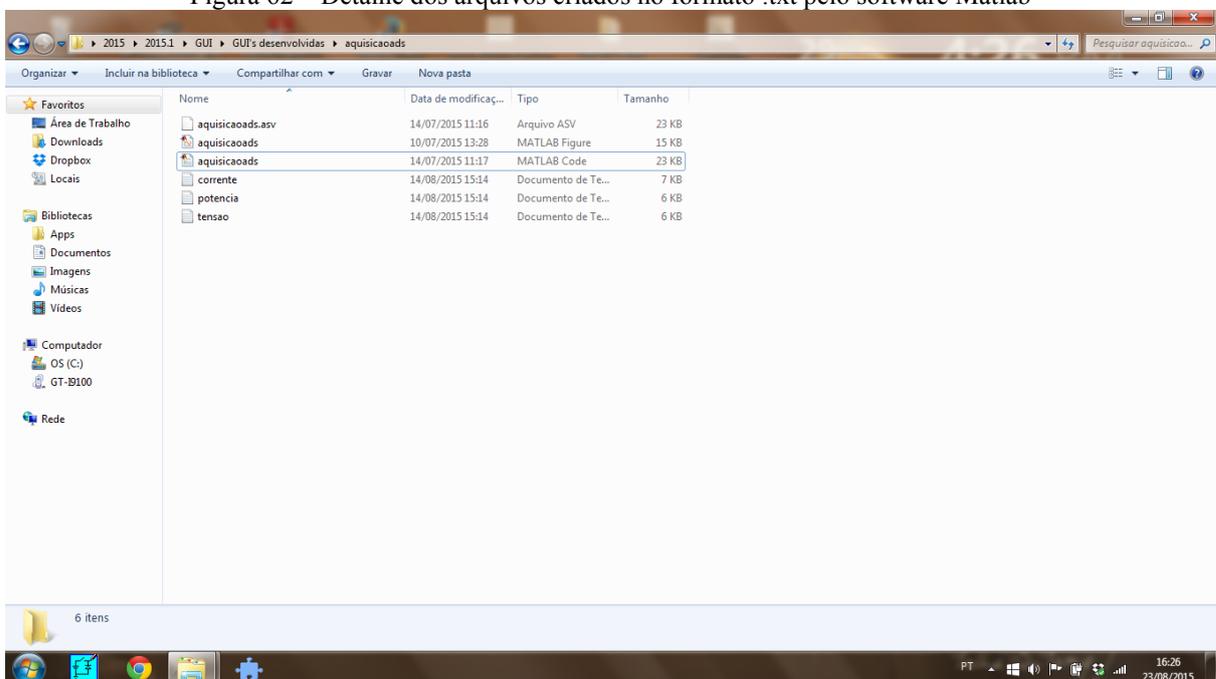
- Botão (MEDIR): Conecta o PC com a placa de aquisição, envia o número de pontos da curva IxV para o PIC; possibilita que a interface receba os dados de tensão e corrente armazenando em 2 vetores; possibilita que a interface calcule os parâmetros elétricos do módulo FV através dos vetores armazenados;
- Botão (Curva IxV): Mostra a curva IxV do curto circuito ao circuito aberto;
- Botão (Curva PxV): Mostra a curva PxV do curto circuito ao circuito aberto;
- Botão (Curvas I e V): Expõe o comportamento da tensão e da corrente durante o transiente do curto circuito ao circuito aberto no qual o módulo é submetido;
- Botão (EXPORTAR .txt): Cria 3 arquivos .txt com os dados de tensão, corrente e potência, estes arquivos são criados na pasta onde o código da interface é salvo como é mostrado na Figura 62. O uso desses arquivos é importante para traçar as curvas em outros programas;
- Botão (FIGURES): Mostra as curvas IxV, PxV e das curvas de tensão e corrente, no modo *figures* do *software* Matlab, durante a caracterização. O objetivo deste botão é exportar as curvas do Matlab com melhor qualidade.

Figura 61 – Interface desenvolvida



Fonte: Autoria própria

Figura 62 – Detalhe dos arquivos criados no formato .txt pelo software Matlab



Fonte: Autoria própria

O cálculo da corrente de curto circuito é feito através do vetor dos dados medidos de corrente. O maior valor deste vetor é mostrado na interface. O mesmo procedimento se repete para o valor de tensão de circuito aberto.

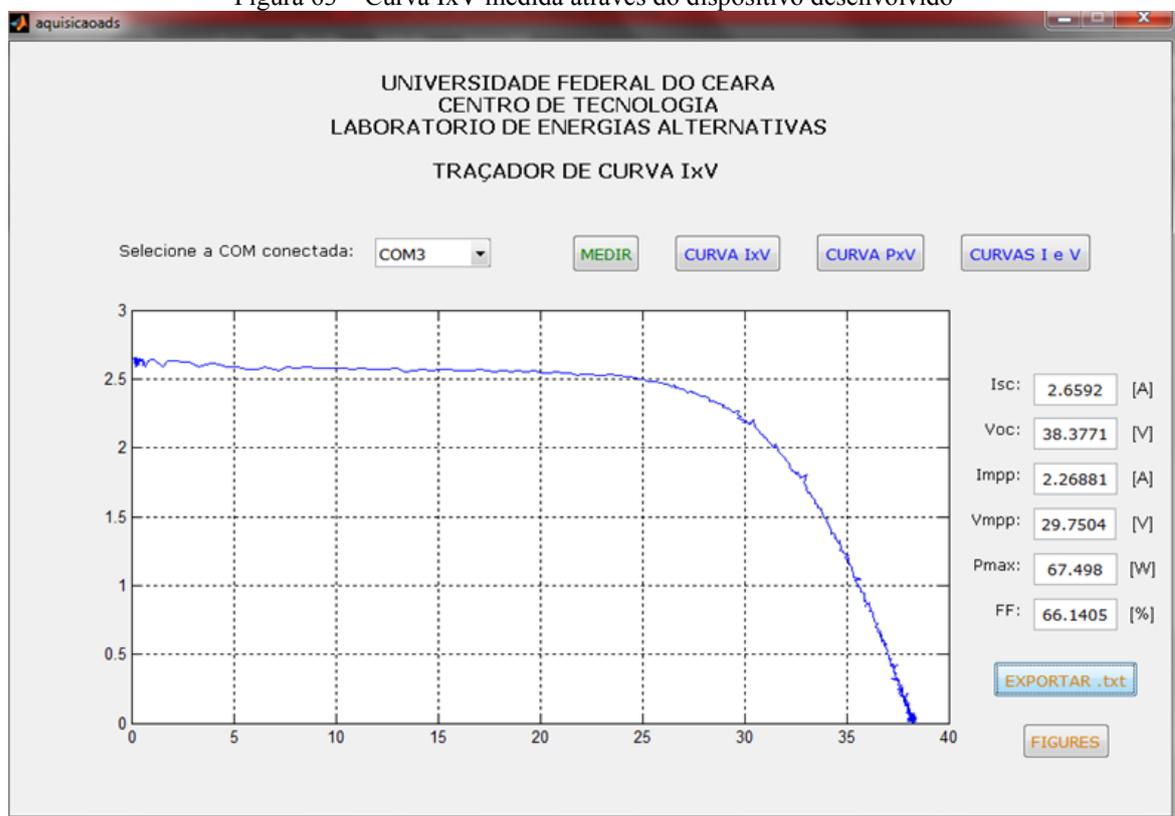
O valor da potência máxima é calculado de forma semelhante, a diferença está no maior valor de potência que é retirado de um vetor de potência. Este é igual à multiplicação dos vetores com os valores de corrente e tensão medidos. O índice, correspondente ao local no vetor de potência onde o maior valor de potência é encontrado, é guardado e usado para encontrar os valores correspondentes de corrente e tensão. Desta forma, são calculados os valores de corrente e tensão no ponto de potência máxima.

O fator de forma é calculado a partir dos valores obtidos de corrente de curto circuito, tensão de circuito aberto e dados do ponto potência máxima.

Sempre que o botão (MEDIR) for acionado os valores na interface serão atualizados sendo referentes a uma nova curva IxV. Para salvar os dados a partir do botão (EXPORTAR .txt) é necessário, após a criação dos arquivos, salvá-los numa pasta diferente de onde os arquivos são criados, pois toda vez que este botão for acionado, após uma nova medição, os dados nesses arquivos são sobrepostos relativos a esta nova medição.

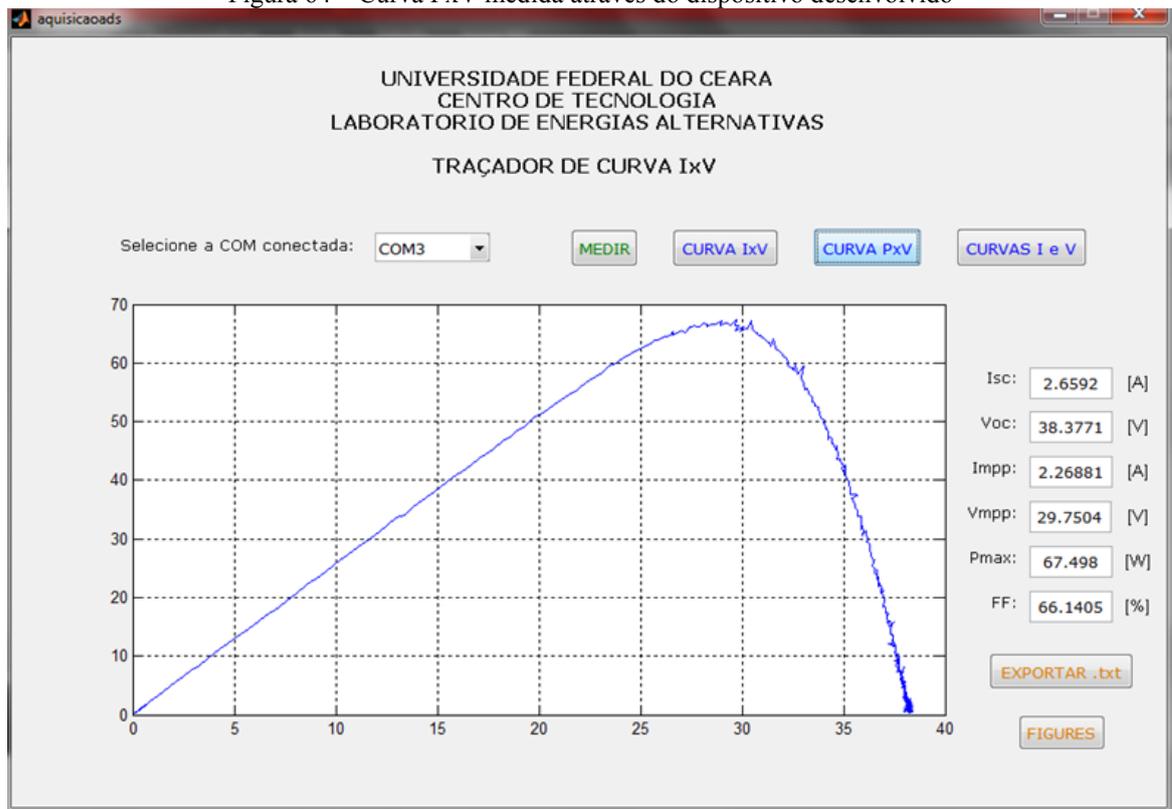
Nas Figura 63, Figura 64 e Figura 65 são mostradas, respectivamente as curvas IxV, PxV e de corrente/tensão durante o transiente de caracterização para o módulo TSM 160 do fabricante AZUR. Os valores de tensão são mostrados em Volts e de corrente em Amperes.

Figura 63 – Curva IxV medida através do dispositivo desenvolvido



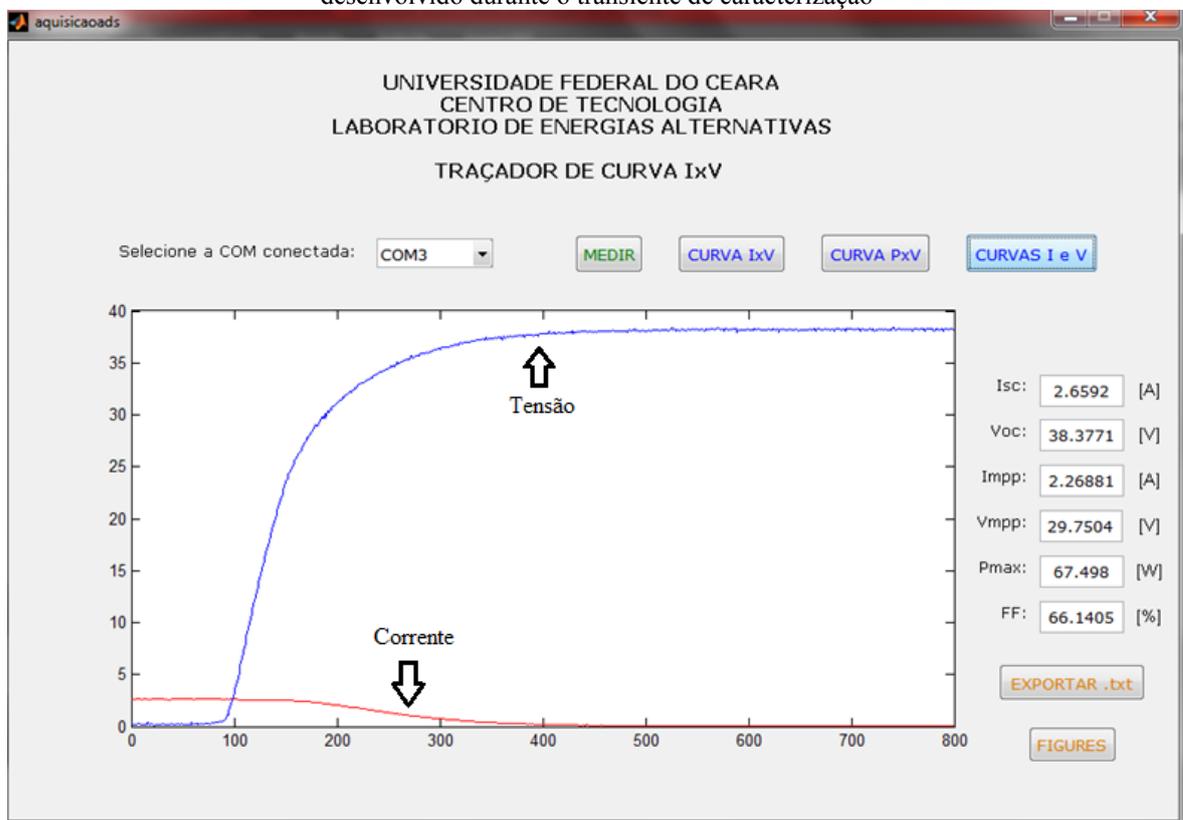
Fonte: Autoria própria

Figura 64 – Curva PxV medida através do dispositivo desenvolvido



Fonte: Autoria própria

Figura 65 – Curvas de tensão (em azul) e de corrente (em vermelho) medidas através do dispositivo desenvolvido durante o transiente de caracterização



Fonte: Autoria própria

5.2 Simulação no *Software* Proteus

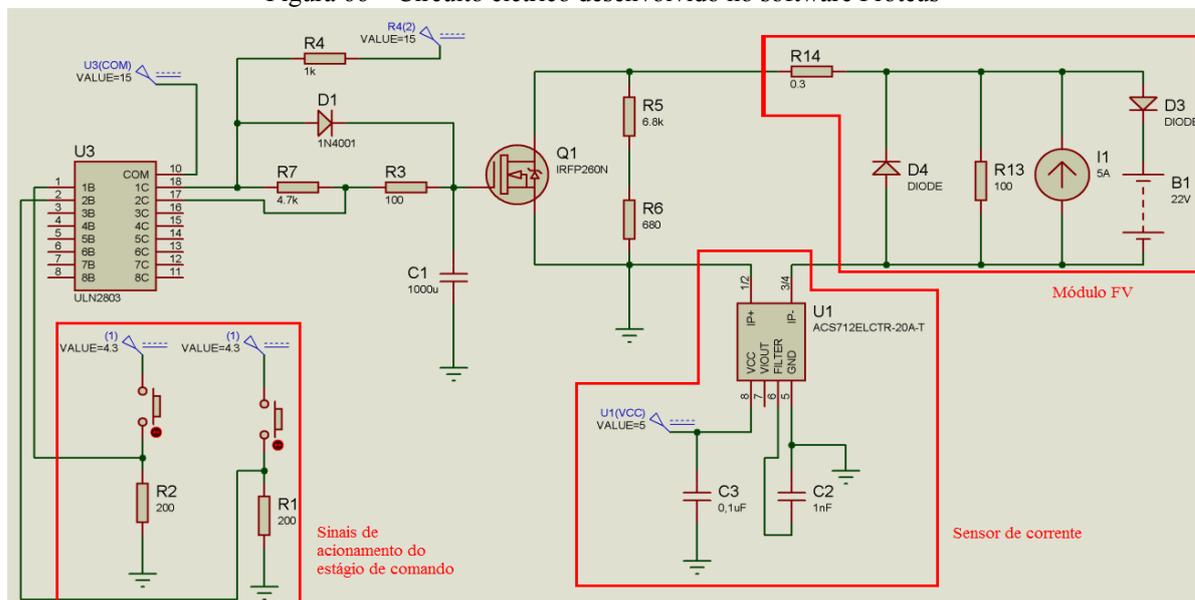
Anteriormente ao desenvolvimento experimental, foram realizadas simulações no *software* Proteus. O objetivo deste é simular esquemáticos de circuitos elétricos ou eletrônicos. Uma de suas vantagens é a possibilidade de obtenção de características reais dos dispositivos eletrônicos, pois alguns *softwares* de simulação de circuitos elétricos tratam esses dispositivos como ideias. Isto inviabiliza a simulação de circuitos eletrônicos com chaves operando na região de saturação.

Para simulação foi utilizado o MOSFET IRFP260N como estágio de potência da carga eletrônica. O estágio de comando foi implementado com os mesmos componentes do circuito elétrico real montado. A diferença está no seu acionamento, pois foram incorporados botões manuais ao invés do microcontrolador visando maior controle manual ao circuito.

Na Figura 66 é mostrado o esquemático do circuito elétrico desenvolvido para simulação. O sensor de corrente utilizado na parte experimental foi o LA100P, mas o mesmo não foi encontrado na biblioteca do *software* Proteus. Por isso, foi utilizado o sensor ACS712-20A que mede correntes com precisão até 20 A.

Este sensor possui um *offset* de tensão de saída de aproximadamente 2,5 V e uma sensibilidade de 100 mV/A. Assim, para uma corrente de 2 A, este sensor fornece como resposta uma tensão de 2,7 V. Este sensor é mais utilizado comercialmente do que o LA100P, mas possui um *offset* muito alto o que inviabilizaria seu uso prático na aplicação desenvolvida devido ao PIC18F2550 utilizado fazer leituras de 0 V a 4,33 V.

Figura 66 – Circuito elétrico desenvolvido no *software* Proteus



Fonte: Autoria própria

Caso o sensor ACS712-20A tivesse sido utilizado na parte experimental, o PIC iria ler tensões de 2,5 V a aproximadamente 3,1 V (considerando corrente de curto-circuito máximas de 6 A nos módulos FV). Com um conversor de 10 bits e uma tensão de referência de 4,33 V seria possível medir apenas 140 pontos distintos de corrente. Isto tornaria inviável a medição da curva $I \times V$ de módulos FV com correntes de curto circuito pequenas.

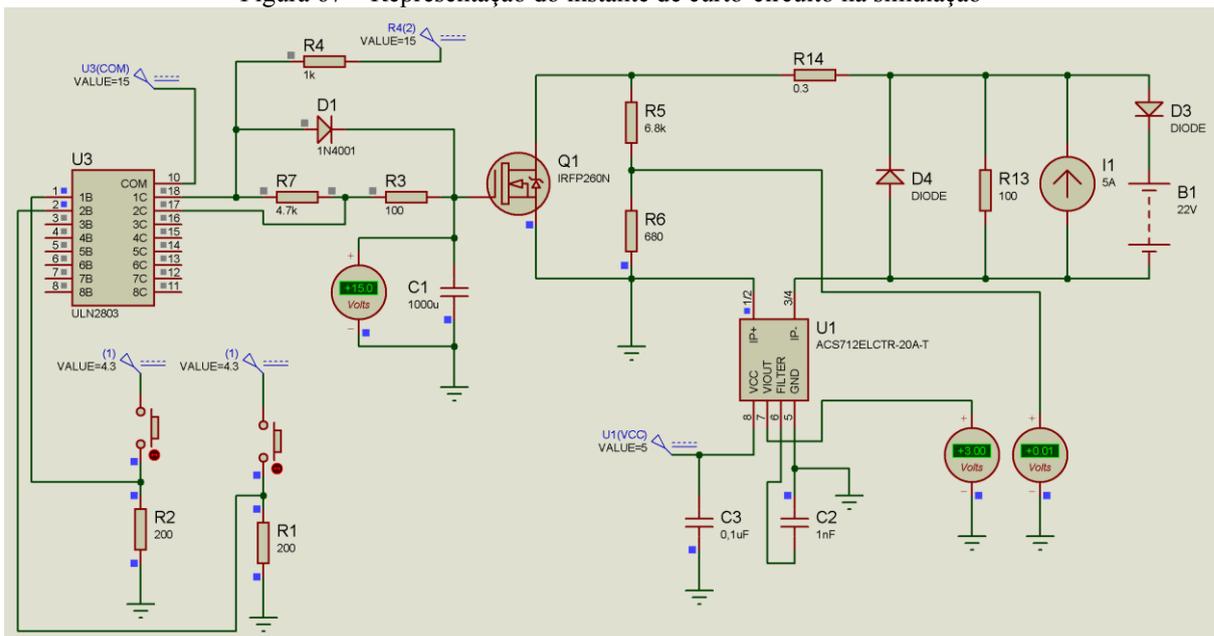
O módulo FV também não foi encontrado nas bibliotecas de componentes do *software* Proteus. Para sua representação foi utilizado o modelo elétrico representativo de 5 parâmetros onde o circuito elétrico é composto por um diodo em paralelo com uma fonte de corrente, uma resistência série e uma paralela.

Nesta representação, foram utilizadas uma resistência série de $0,3 \Omega$ e uma paralela de 100Ω . A corrente de curto circuito foi estabelecida em 5 A e a tensão de circuito aberto em aproximadamente 22 V.

5.2.1 Simulação do Instante de Curto Circuito

Na Figura 67 é mostrada a situação onde o módulo se encontra em curto circuito. Os valores dos pinos de 1B e 2B do *driver* ULN2803 (substituto do *driver* ULN 2003 utilizado na parte experimental) são colocados em nível lógico baixo. O capacitor C1 carrega até 15 V através do resistor R4 (1 k Ω) e do diodo D1 (1N4001).

Figura 67 – Representação do instante de curto-circuito na simulação



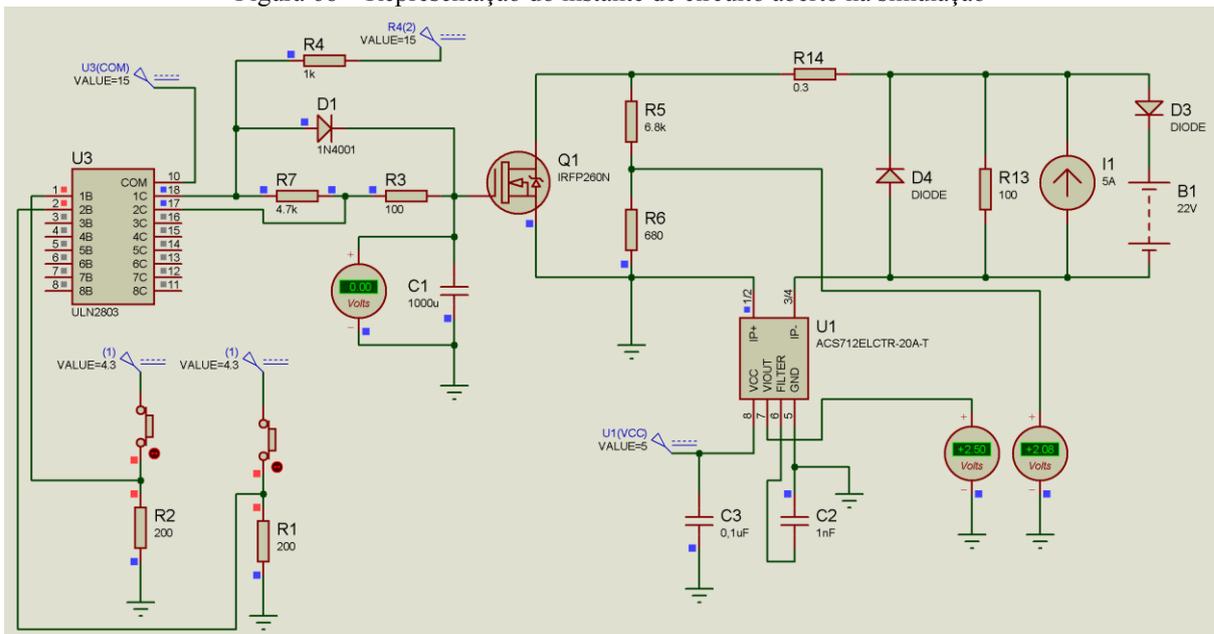
Fonte: Autoria própria

A saída do sensor de corrente (V_{out}) fornece 3 V, que é relativo à corrente de 5 A. Já o sensor de tensão representado pelos resistores de 680Ω e $6,8 \text{ k}\Omega$ fornece aproximadamente 0 V. A tensão de *gate* para o MOSFET é aproximadamente 15 V, indicando sua abertura.

5.2.2 Simulação do Instante de Circuito Aberto

Na Figura 68 é mostrada a situação na qual o módulo encontra-se em circuito aberto com o sensor de corrente fornecendo 2,5 V como resposta e o divisor resistivo mostrando 2,08 V o que equivale a uma tensão nos terminais do módulo de aproximadamente 23 V.

Figura 68 – Representação do instante de circuito aberto na simulação



Fonte: Autoria própria

5.2.3 Simulações do Acionamento do Estágio de Comando

Para testar as 2 hipóteses de acionamento do estágio de comando e escolher a mais adequada foi utilizado o osciloscópio na simulação mostrada na Figura 69.

5.2.3.1 Simulação da Primeira Forma de Acionamento do Estágio de Comando

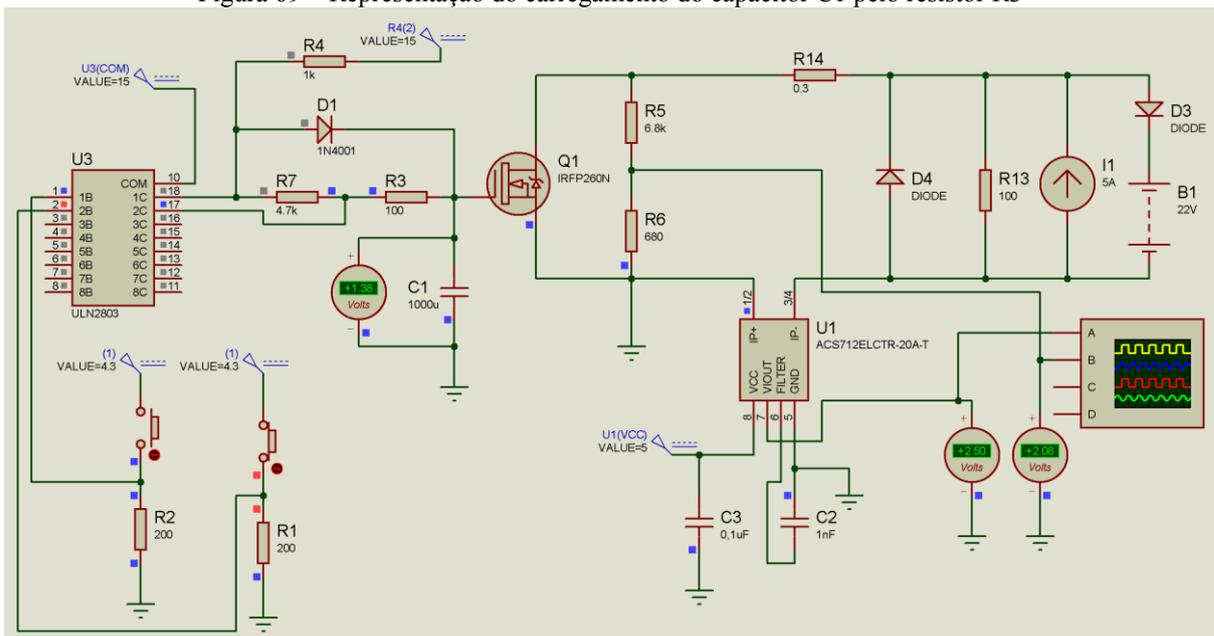
A primeira situação de acionamento aborda o pino 1B em nível lógico baixo e o pino 2B em nível lógico alto. Este acionamento faz com que o capacitor C1 se descarregue pelo resistor R3 de forma mais rápida. Neste caso, o pino 1C permanece desconectado fazendo com que a corrente elétrica no resistor R7 se torne nula.

Na Figura 70 é mostrado o resultado fornecido pelo osciloscópio para situação mencionada da Figura 69. A saída do sensor de corrente foi conectada ao canal A (vermelho) do osciloscópio enquanto que a saída do sensor de tensão foi conectada ao canal B (azul).

O intervalo de tempo correspondente ao transiente de curto circuito ao circuito aberto foi medido, sendo aproximadamente igual a 13,32 ms. Este intervalo é muito pequeno para ser utilizado pelo sistema de aquisição proposto, pois cada par tensão-corrente demora um tempo próximo de 3,8 ms para ser lido. Desta forma, utilizando esta configuração de acionamento a curva IxV teria no máximo 4 pares tensão-corrente o que não seria viável.

Ressalta-se que este tempo, aproximado, de 3,8 ms se deve ao envio dos dados do PIC para o PC. Este valor foi encontrado por testes de aquisição de dados através de um gerador de ondas. Várias formas de ondas com frequência definida foram amostradas na interface desenvolvida com número de pontos de aquisição também definidos. Por exemplo, amostrava-se 200 pontos de uma senoide com frequência definida.

Figura 69 – Representação do carregamento do capacitor C1 pelo resistor R3



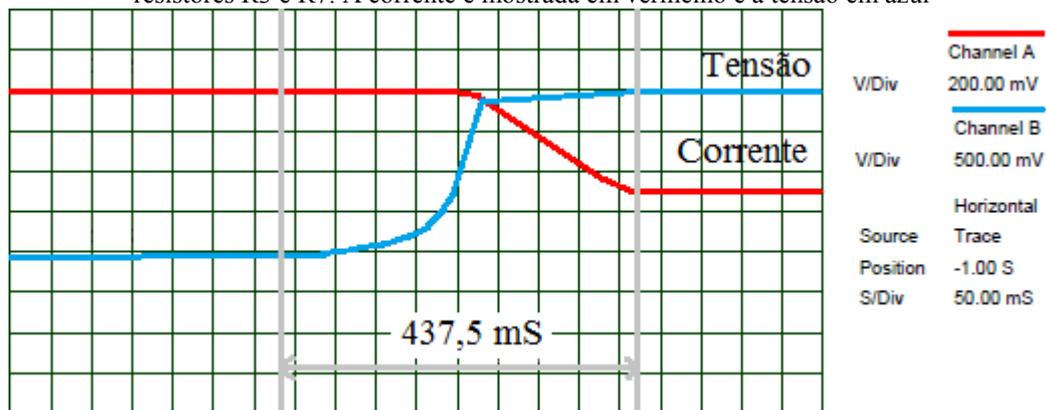
Fonte: Autoria própria

aproximadamente 437,6 ms. Este tempo é suficiente para o sistema de aquisição ler no máximo 140 pares de corrente-tensão (IxV).

Experimentalmente, este tempo de transiente se mostrou maior do que o simulado. Em alguns testes, constatou-se que para alguns módulos eram necessários no mínimo 650 pares de tensão-corrente para completa caracterização da curva IxV. Isto significa que o tempo de transiente entre o curto-circuito e o circuito aberto podia chegar a aproximadamente 2,5 s. Devido a este fator, optou-se por configurar um valor fixo de 800 como sendo o número de pares de tensão-corrente a serem medidos. A possível causa da diferença entre valores experimentais e simulados encontra-se nas idealidades intrínsecas do circuito montado no *software* Proteus e ao modelo adotado para representação do módulo FV.

A quantidade de pontos necessária para caracterizar de forma completa a curva IxV variou significativamente em função dos níveis de corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto dos módulos FV sob testes. Para módulos com potências de 20 Wp foi observado que o transiente era caracterizado por no mínimo 300 pares de tensão-corrente, enquanto que para módulos com potência de 160 Wp este número poderia chegar a 650. Os pontos em excesso, que são medidos antes e depois do transiente de caracterização da curva IxV, permanecem nas localizações de curto circuito e circuito aberto.

Figura 72 – Transiente de caracterização do módulo FV pelo descarregamento do capacitor C1 através dos resistores R3 e R7. A corrente é mostrada em vermelho e a tensão em azul



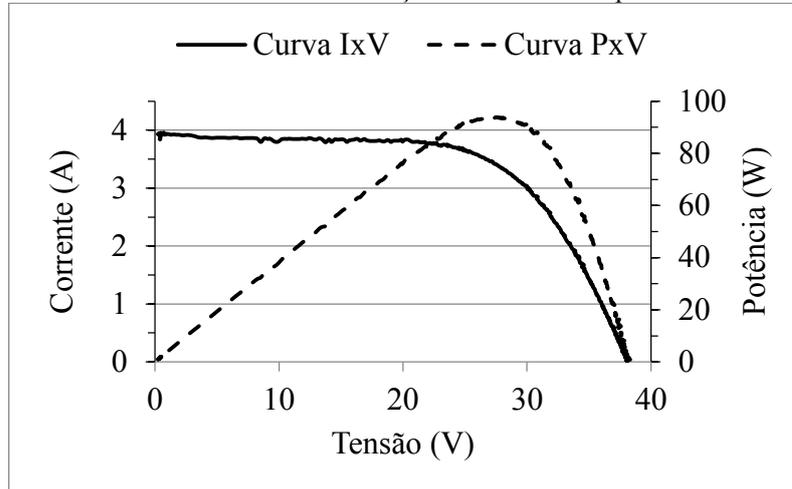
Fonte: Autoria própria

5.3 Medições com Osciloscópio

Na verificação do comportamento do dispositivo proposto foram realizados testes com o osciloscópio visando averiguar os níveis de tensão e corrente medidos além do tempo do transiente de curto circuito ao circuito aberto.

Na Figura 73 são mostradas as curvas IxV e PxV do módulo FV TSM 160 do fabricante AZUR numa condição de irradiância solar igual a 846 W/m^2 e temperatura do módulo igual a $66,5 \text{ }^\circ\text{C}$, medidas através do traçador desenvolvido.

Figura 73 – Curvas IxV e PxV medidas com o traçador desenvolvido para $G=846 \text{ W/m}^2$ e $T=66,5 \text{ }^\circ\text{C}$



Fonte: Autoria própria

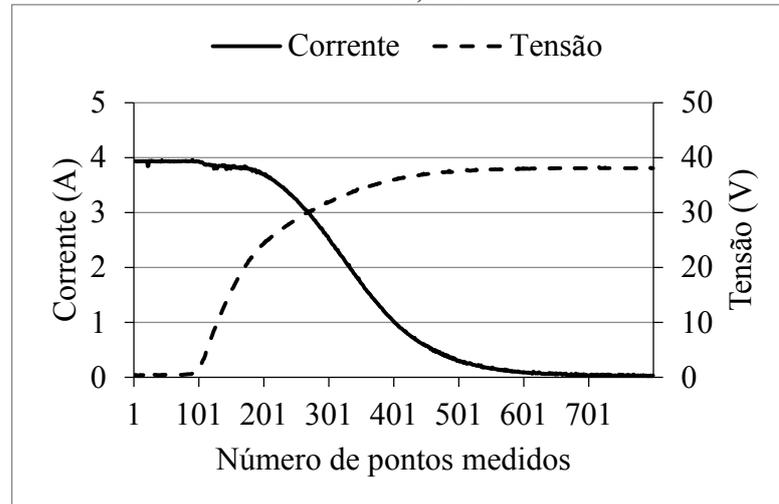
O transiente de corrente e tensão em relação ao tempo de medição respectivo na qual as curvas da Figura 73 foram medidas é mostrado na Figura 74. Percebe-se que para este módulo nestas condições de irradiância e temperatura a curva pode ser caracterizada com aproximadamente 600 pontos (pares IxV). Outra observação é o formato exponencial das curvas de tensão e corrente que se diferencia do formato das curvas obtidas via simulação (Figura 70 e Figura 72).

Na Figura 75 são mostrados os comportamentos das curvas de tensão entre *drain* e *source* e entre *gate* e *source* medidas através do osciloscópio. Estas tensões são relativas às situações de irradiância e temperatura nas quais as curvas da Figura 73 e da Figura 74 foram medidas. Antes de iniciar o processo de aquisição dos pontos, o dispositivo faz com que o módulo permaneça em circuito aberto, o mesmo ocorre após a aquisição de todos os pontos do transiente.

Através da análise da Figura 75 percebe-se que o módulo inicialmente em circuito aberto é levado ao curto circuito rapidamente através do carregamento do capacitor que foi colocado em paralelo com o *gate* da chave. Após aproximadamente 0,4 s do início do carregamento o capacitor passa a se descarregar lentamente aquisitando os 800 pontos relativos ao transiente de curto circuito a circuito aberto do módulo. Finalmente após a aquisição dos 800 pontos o capacitor se descarrega rapidamente através do resistor de $100 \ \Omega$.

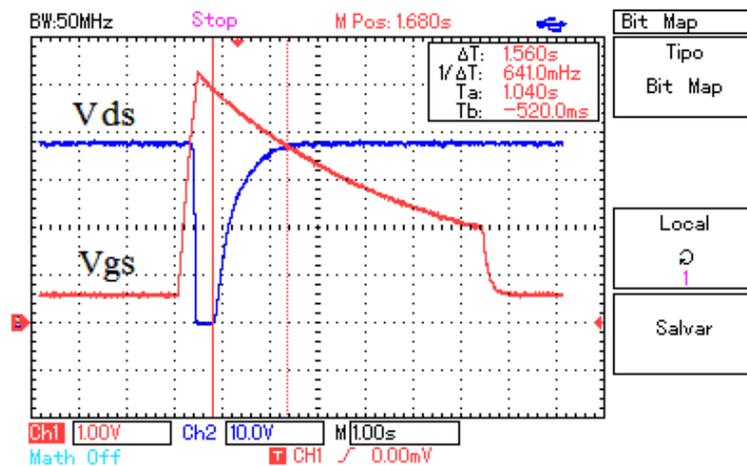
O intervalo de tempo medido no osciloscópio de 1,56 s se refere ao tempo de medição do ponto 101 até aproximadamente o ponto 501 na Figura 74.

Figura 74 – Transiente de curto circuito a circuito aberto medido com o traçador desenvolvido para $G=846 \text{ W/m}^2$ e $T=66,5 \text{ }^\circ\text{C}$



Fonte: Autoria própria

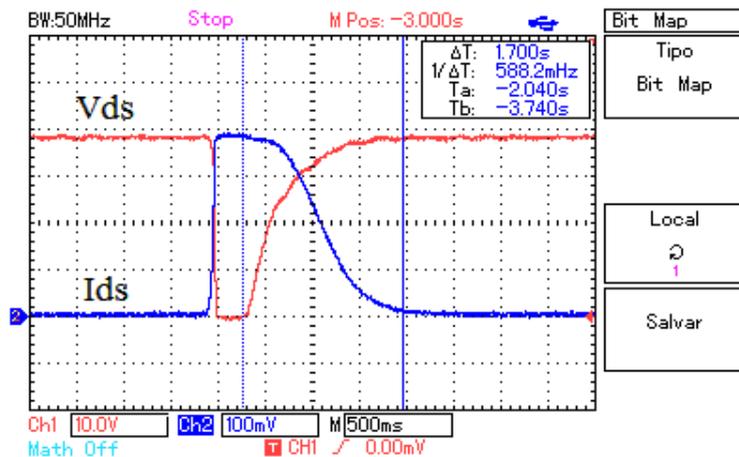
Figura 75 – Tensões entre *drain* e *source* e entre *gate* e *source* medidas com o osciloscópio para $G=846 \text{ W/m}^2$ e $T=66,5 \text{ }^\circ\text{C}$



Fonte: Autoria própria

Na Figura 76 é mostrado o comportamento da tensão e corrente medidos, durante o transiente de caracterização, com o osciloscópio para o módulo TSM 160 numa condição de irradiância igual a 775 W/m^2 e temperatura do módulo igual a $66,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Figura 76 – Tensão e corrente entre drain e source medidas com o osciloscópio para $G=775 \text{ W/m}^2$ e $T=66,5 \text{ }^\circ\text{C}$

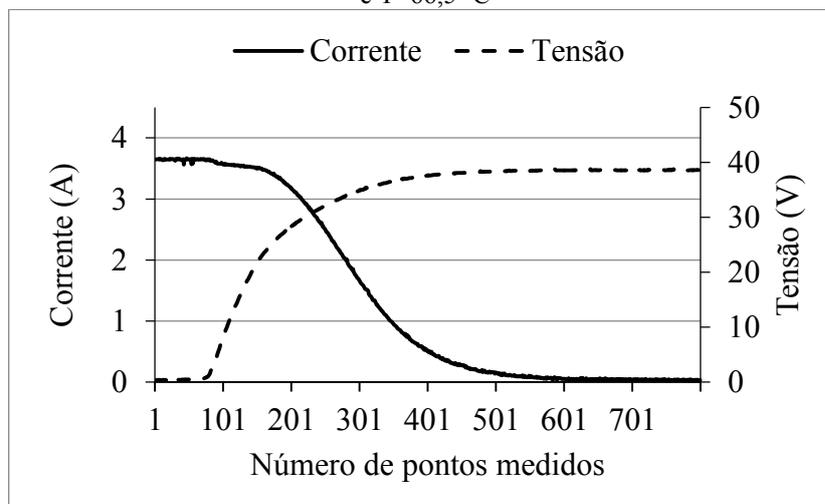


Fonte: Autoria própria

Para as mesmas condições de irradiância e temperatura da Figura 76 foi realizada a medição com o dispositivo desenvolvido. As curvas medidas de tensão e corrente são mostradas na Figura 77. O tempo de caracterização medido com o osciloscópio (aproximadamente 1,7 s) mostrado na Figura 76 se aproxima do tempo encontrado com o dispositivo desenvolvido, pois o tempo decorrido do ponto 90 ao ponto 540, na Figura 77, é de aproximadamente 1,71 s.

Além do tempo de caracterização do módulo, medido entre o curto circuito e o circuito aberto, percebe-se, na Figura 76, o rápido transiente do circuito aberto ao curto-circuito que ocorre antes da caracterização da curva I_xV .

Figura 77 – Transiente de curto circuito a circuito aberto medido com o traçador desenvolvido para $G=775 \text{ W/m}^2$ e $T=66,5 \text{ }^\circ\text{C}$



Fonte: Autoria própria

5.4 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foram mostrados a simulação e o desenvolvimento do traçador de curva IxV que foi proposto. O método escolhido de carga eletrônica utilizou um estágio de potência composto de um MOSFET IRFP260N e um estágio de comando composto por um circuito específico para o controle de carregamento e descarregamento de um capacitor em paralelo com o *gate* da chave utilizada. Através deste método foi possível a caracterização dos módulos FV através da medição de tensão e corrente durante o transiente entre curto circuito e circuito aberto.

O sistema de aquisição de dados foi uma placa de aquisição de dados composta por um PIC18F2550. As curvas IxV medidas foram caracterizadas para condições de irradiância solar medida através de piranômetro e temperatura da parte central traseira dos módulos medidas através de um sensor PT100.

Todo o dimensionamento do circuito e o método escolhido visaram à robustez do dispositivo desenvolvido para medições de módulos FV com correntes de curto circuito de até 5,8 A e tensões de circuito aberto de até 48 V.

6 RESULTADOS E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através de medições realizadas com 3 módulos FV de diferentes características elétricas. O processo de validação do traçador proposto se baseou na comparação com um traçador comercial de mesmo porte (limites de medição de tensão e corrente próximos). Os dois traçadores foram comparados para as mesmas condições de irradiância solar e temperatura do módulo, os valores dos principais parâmetros elétricos fornecidos pelos dois traçadores foram comparados.

Além da comparação das curvas IxV sob condições normais de operação dos módulos FV, foi realizada também uma comparação dessas curvas para condições de sombreamento dos módulos com intuito de comprovar o funcionamento do traçador desenvolvido para estas condições.

6.1 Procedimentos para Validação Experimental

Para realizar a validação experimental foi utilizado o traçador comercial MINI-KLA do fabricante INGENIEURBÜRO mostrado na Figura 78. Este traçador é utilizado para módulos com correntes de curto-circuito de até 8 A e tensões de circuito aberto de até 120 V.

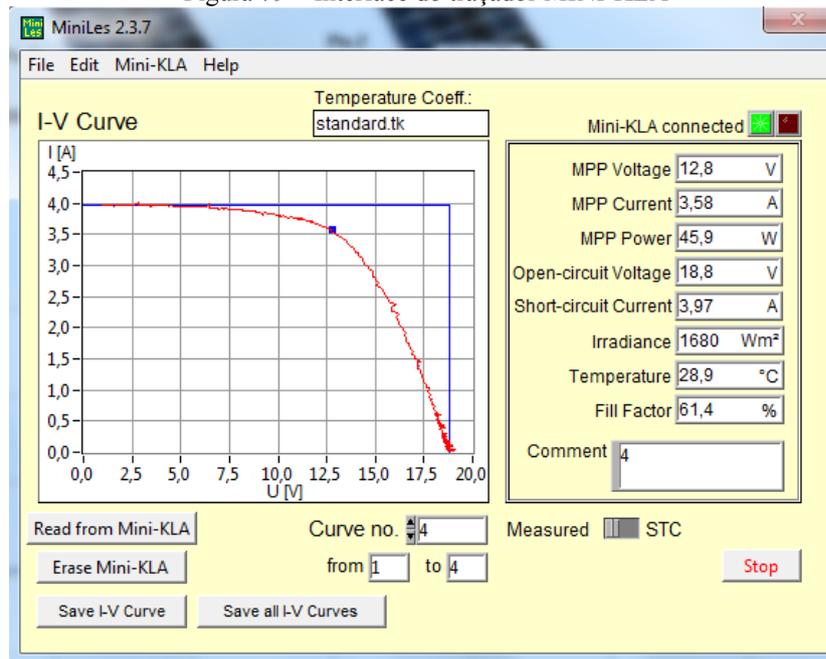
Figura 78 – Traçador MINI-KLA



Fonte: Autoria Própria

O MINI-KLA possui uma precisão de 0,4% em suas medições de tensão e corrente além de possuir um conversor analógico-digital de 12 bits. Apesar de possuir uma memória interna que armazena os dados das curvas medidas o MINI-KLA possui uma interface de comunicação com usuário, mostrada na Figura 79, para mostrar as curvas medidas e passá-las para a memória do PC. Além dessas funções a interface mostra os valores relativos aos pontos de curto-circuito, de circuito aberto e de potência máxima.

Figura 79 – Interface do traçador MINI-KLA



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 80 é mostrado o experimento montado para validação com os 2 traçadores e 2 interruptores duplos para chavear os dois traçadores com o módulo. A utilização destes interruptores visou diminuir o tempo de chaveamento entre os dois traçadores permitindo que as curvas medidas estivessem nas mesmas condições de irradiância e temperatura.

Figura 80 – Experimento montado para validação do traçador desenvolvido



Fonte: Autoria Própria

6.2 Medições com o Módulo KS 20 T

O primeiro módulo FV a ser utilizado para medições foi o KS 20 T do fabricante Kyocera Solar. Este módulo possui as características elétricas mostradas na Tabela 2.

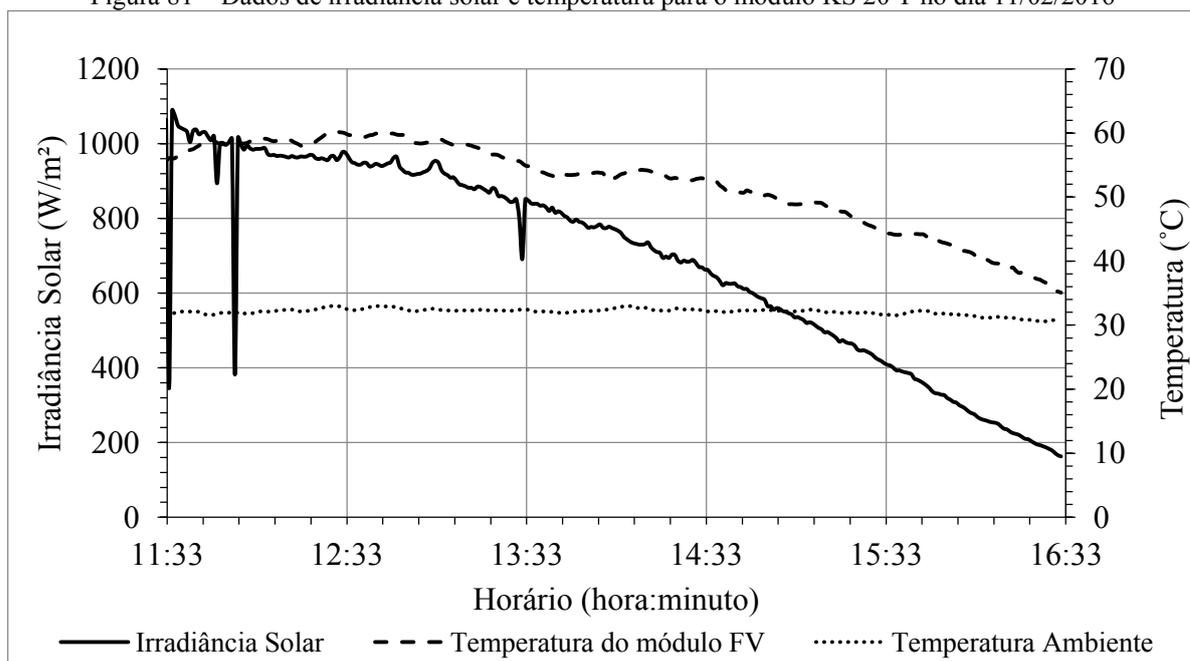
Tabela 2 – Parâmetros elétricos em STC para o módulo FV KS 20T

Corrente de curto circuito (I_{sc}):	1,24 A
Tensão de circuito aberto (V_{oc}):	21,7 V
Corrente no ponto de potência máxima (I_{mpp}):	1,16 A
Tensão no ponto de potência máxima (V_{mpp}):	17,4 V
Potência máxima (P_{mpp}):	20 W

Fonte: KYOCERA

Os experimentos com este módulo foram realizados no dia 11 de fevereiro de 2016 no período da tarde devido a maior estabilidade da irradiância solar. Na Figura 81 são mostradas as curvas de temperatura ambiente e do módulo; e irradiância solar durante o período do experimento. As medições foram realizadas em condições de irradiância solar entre 238 e 1025 W/m^2 e temperatura do módulo entre 39,2 e 58,5 $^{\circ}C$. Durante o experimento a temperatura ambiente variou entre 30,5 e 33 $^{\circ}C$. Para realização dos experimentos de validação a condição de irradiância solar constante é essencial para os dois traçadores detectarem o módulo nas mesmas condições de irradiância, por isso foram escolhidos dias ensolarados com pouca nebulosidade.

Figura 81 – Dados de irradiância solar e temperatura para o módulo KS 20 T no dia 11/02/2016



Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 3 são mostradas as 13 situações nas quais foram traçadas as curvas IxV e PxV do módulo FV KS 20T com os dois traçadores. A temperatura mostrada é referente à temperatura do módulo FV.

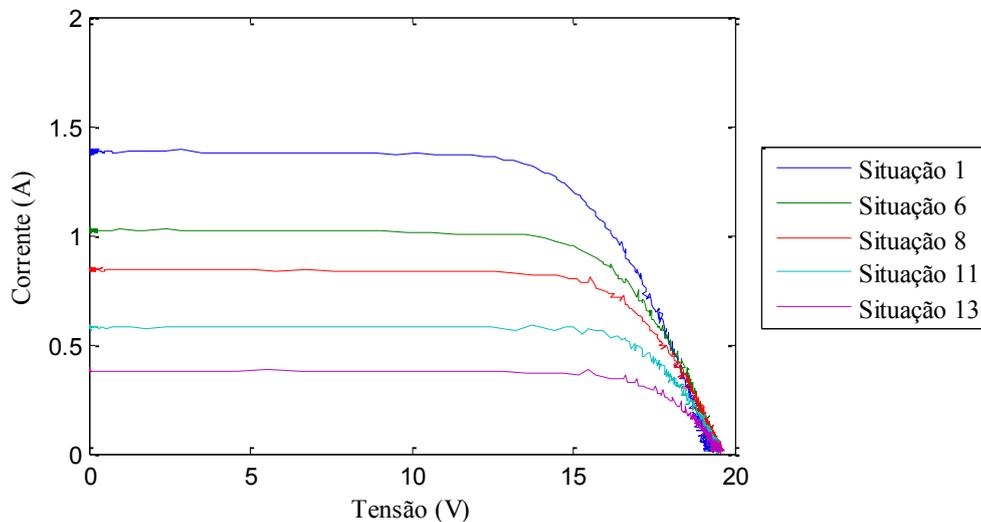
Tabela 3 – Situações de teste e validação do traçador desenvolvido para o módulo KS 20 T

Situação	Horário	G (W/m ²)	T (°C)
1	11:53	1025	58,5
2	12:27	966	58,1
3	12:57	957	59,9
4	13:56	795	53,4
5	14:15	746	53,9
6	14:28	694	53,1
7	14:47	623	51,3
8	15:03	562	50,2
9	15:15	521	49,1
10	15:32	448	46,3
11	15:51	371	44,3
12	16:03	309	42,5
13	16:20	238	39,2

Fonte: Autoria Própria

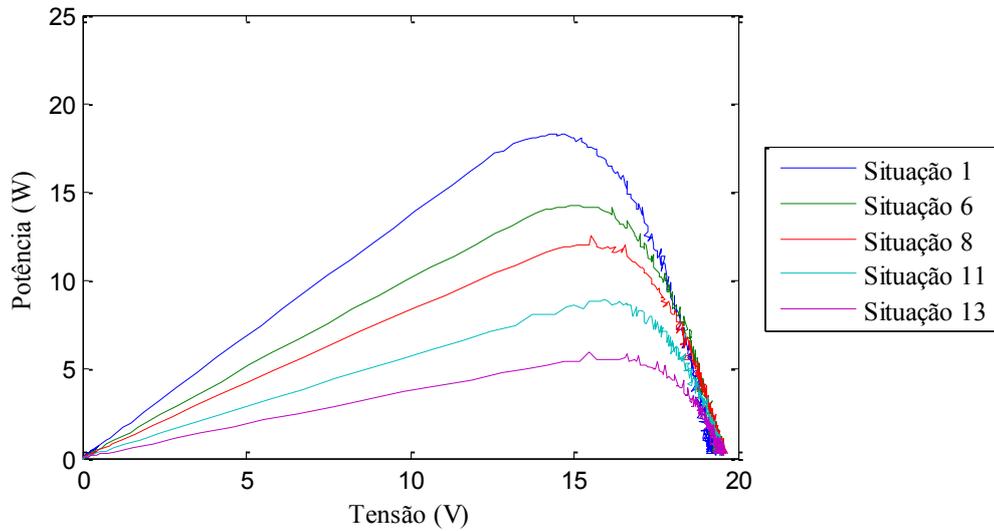
Na Figura 82 e na Figura 83 são mostradas, como exemplo, as curvas IxV e PxV para 6 condições distintas de irradiância solar e temperatura do módulo mostradas na Tabela 3. A variação de irradiância solar é bem mais perceptível na corrente de curto circuito do que a variação de temperatura é na tensão de circuito aberto.

Figura 82 – Curvas IxV medidas com o traçador desenvolvido para as situações 1, 6, 8, 11 e 13 descritas na Tabela 3



Fonte: Autoria Própria

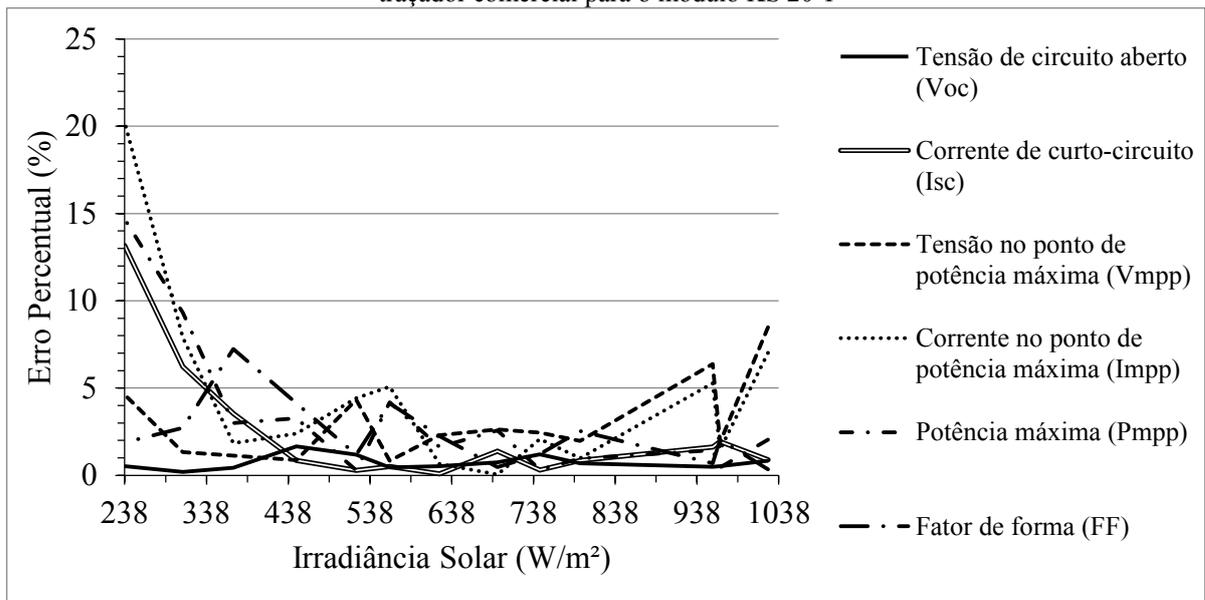
Figura 83 – Curvas PxV medidas com o traçador desenvolvido para as situações 1, 6, 8, 11 e 13 descritas na Tabela 3



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 84 são mostrados os erros percentuais relativos aos parâmetros elétricos medidos com o traçador desenvolvido em relação ao traçador comercial (MINI-KLA). Para baixos valores de irradiância solar percebe-se que os erros nas medições de corrente são elevados superando 15% para corrente no ponto de potência máxima. Este fato se deve a perda de precisão do sensor utilizado para medições de corrente abaixo de 0,5 A.

Figura 84 – Erros percentuais dos parâmetros elétricos medidos com o traçador desenvolvido em relação ao traçador comercial para o módulo KS 20 T



Fonte: Autoria Própria

Para medições com irradiância solar acima de 400 W/m^2 percebem-se erros menores que 10% em todos os parâmetros medidos. Nas situações 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 foram observados erros menores do que 5% em todos os parâmetros medidos.

Na Tabela 4 é mostrado o resumo dos erros das medições realizadas com o módulo KS 20 T para as situações mostradas na Tabela 3. Os erros médios mostram valores menores que 5% em todos os parâmetros sendo que a corrente no ponto de potência máxima foi o parâmetro que mais apresentou diferença devido à imprecisão do sensor de corrente utilizado para baixas irradiâncias. A causa dos erros é encontrada nos resistores de medição utilizados com precisão de $\pm 5\%$ além do fato das medições com os dois traçadores serem realizadas com alguns segundos de diferença (devido ao chaveamento dos interruptores) o que pode alterar a irradiância solar observada por cada traçador.

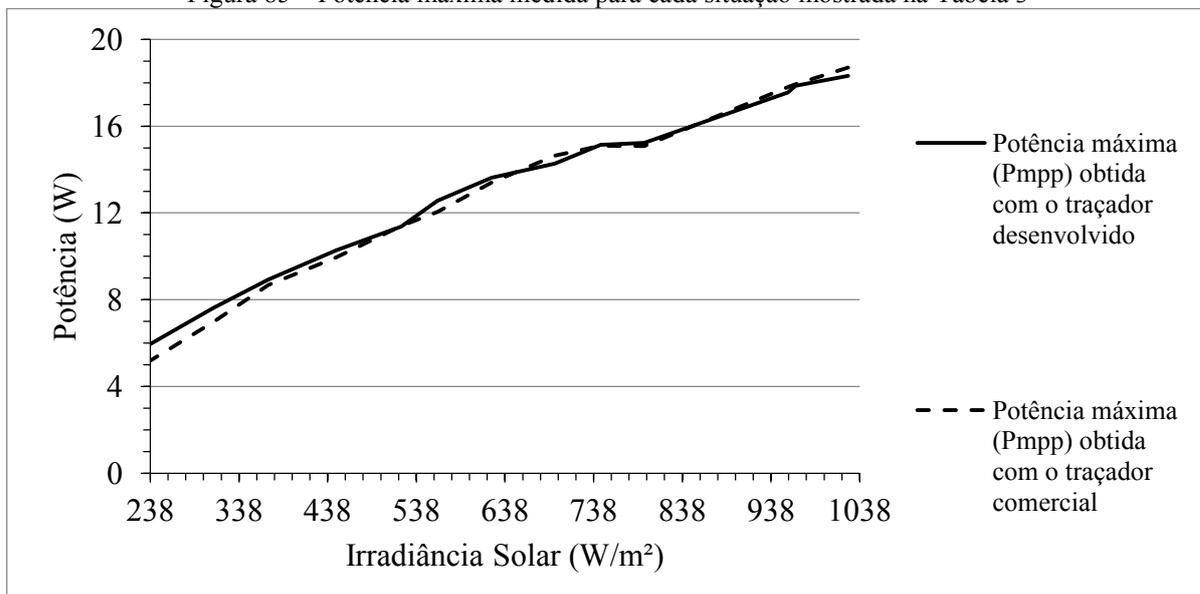
Tabela 4 – Erros máximos, mínimos e médios para cada parâmetro medido (módulo KS 20 T)

	Voc	Isc	Vmpp	Impp	Pmpp	FF
Erro máximo (%):	1,66	13,16	8,47	20,23	14,68	7,23
Erro mínimo (%):	0,19	0,08	0,84	0,05	0,29	0,34
Média dos ERROS (%):	0,72	2,43	3,02	4,57	3,40	2,37

Fonte: Autoria Própria

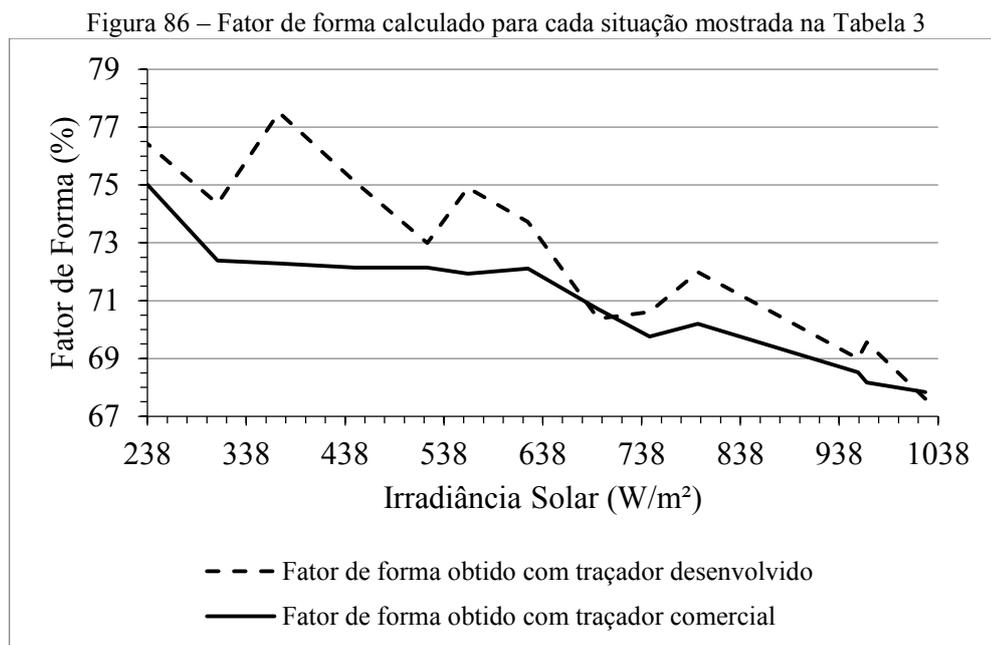
Na Figura 85 são mostrados os pontos de potência máxima medidos com os dois traçadores. Como a irradiância diminui ao longo do experimento percebe-se que a potência máxima diminui de aproximadamente 19 W para menos do que 6 W.

Figura 85 – Potência máxima medida para cada situação mostrada na Tabela 3



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 86 são mostrados os fatores de forma obtidos com os dois traçadores para as situações mostradas na Tabela 3. Ambos os traçadores apresentaram fatores de forma decrescentes em relação ao aumento da irradiância solar devido à irradiância e a temperatura diminuírem durante o experimento. A grande variação no valor da corrente de curto circuito e a pequena variação na tensão de circuito aberto fazem com que a curva IxV se torne mais próxima de um retângulo acarretando num maior fator de forma.



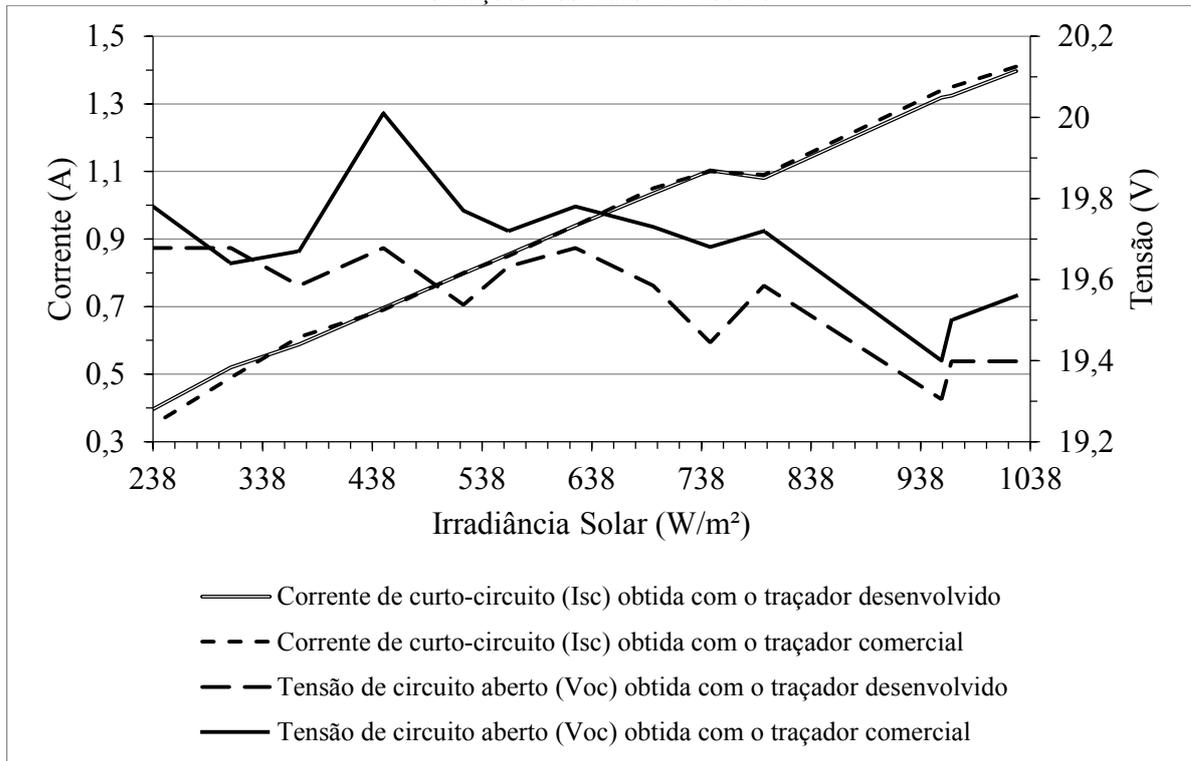
Fonte: Autoria Própria

Na Figura 87 são mostradas as variações na tensão de circuito aberto e na corrente de curto circuito durante o experimento. Percebe-se que a corrente de curto circuito varia entre aproximadamente 1,4 A e 0,4 A; e a tensão de circuito aberto varia entre 19,3 V e 20 V. A pequena variação na tensão de circuito aberto se deve a pequena variação de temperatura (39,2 a 59,5 °C) durante o experimento. Já a irradiância varia entre 1025 e 238 W/m² o que fez a corrente de curto circuito variar aproximadamente 350% no experimento.

Na Figura 88 são mostradas as correntes e tensões nos pontos de potência máxima medidas pelos dois traçadores. Novamente, percebe-se que ocorre uma tendência crescente na curva de tensão e uma tendência decrescente na curva de corrente.

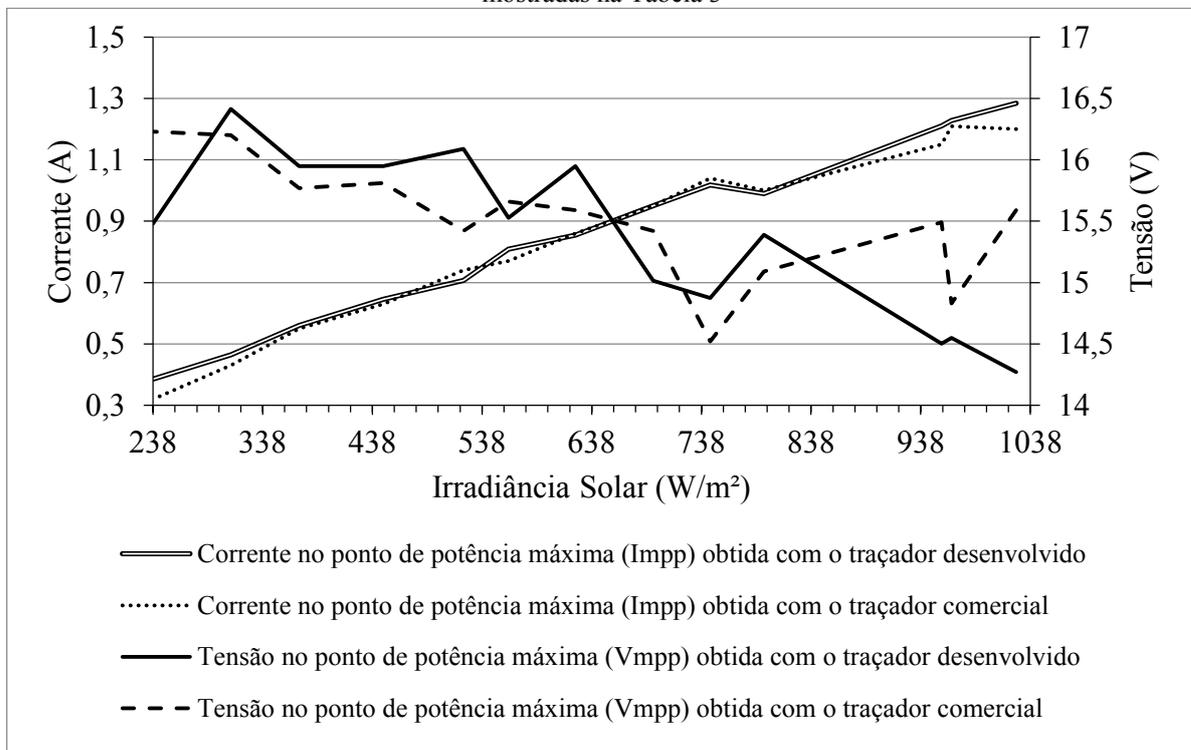
As comparações de todas as curvas IxV e PxV obtidas com os dois traçadores nas 13 situações identificadas na Tabela 3, referentes ao módulo FV KS 20 T, são mostradas no Apêndice 1.

Figura 87 – Correntes de curto circuito e tensões de circuito aberto medidas com os dois traçadores para situações mostradas na Tabela 3



Fonte: Autoria Própria

Figura 88 – Correntes e tensões nos pontos de potência máxima medidas com os dois traçadores para situações mostradas na Tabela 3



Fonte: Autoria Própria

6.3 Medições com o Módulo KC 85 T

O segundo módulo FV utilizado para validação do traçador desenvolvido foi o KC 85 T do fabricante Kyocera Solar. As características elétricas em STC do mesmo são mostradas na Tabela 5.

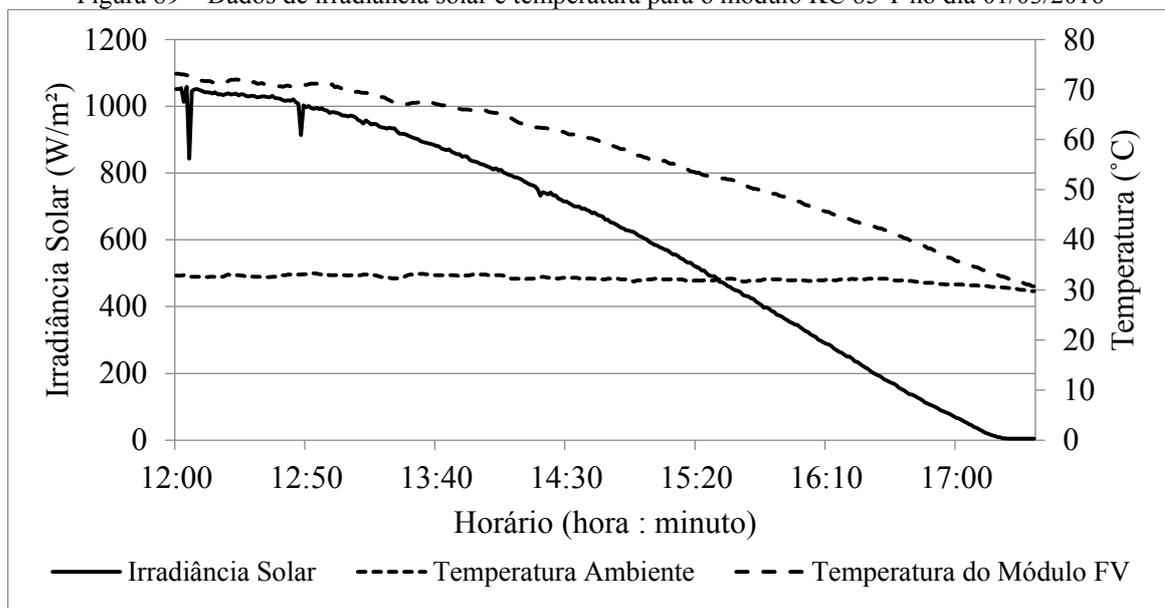
Tabela 5 – Parâmetros elétricos em STC para o módulo FV KC 85 T

Corrente de curto circuito (Isc):	5,34 A
Tensão de circuito aberto (Voc):	21,7 V
Corrente no ponto de potência máxima (Imp):	5,02 A
Tensão no ponto de potência máxima (Vmpp):	17,4 V
Potência máxima (Pmpp):	87 W

Fonte: KYOCERA

Os experimentos com o módulo KC 85 T foram realizados no dia 1 de março de 2016. Novamente, os experimentos foram realizados no período da tarde no horário de 12h15min às 16h5min. Na Figura 89 são mostrados os perfis de variação de irradiância solar, de temperatura ambiente e do módulo durante o experimento. A temperatura do módulo variou entre 72,1 e 39,9 °C; e a irradiância solar variou entre 1046 e 139 W/m². A temperatura ambiente durante todo o experimento situou-se próximo de 32 °C. Percebe-se que com a queda da irradiância solar a temperatura do módulo tende a igualar-se com a temperatura ambiente visto que o módulo não permanece mais iluminado durante a noite.

Figura 89 – Dados de irradiância solar e temperatura para o módulo KC 85 T no dia 01/03/2016



Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 6 são mostradas as 23 situações nas quais foram traçadas as curvas IxV e PxV do módulo KC 85 T para os dois traçadores. Em comparação com a Tabela 3 percebe-se que o módulo KC 85 T, devido a sua maior área, apresenta uma temperatura mais elevada do que o módulo KS 20 T para condições próximas de temperatura ambiente e irradiância solar.

Tabela 6 – Situações de teste e validação do traçador desenvolvido para o módulo KC 85 T

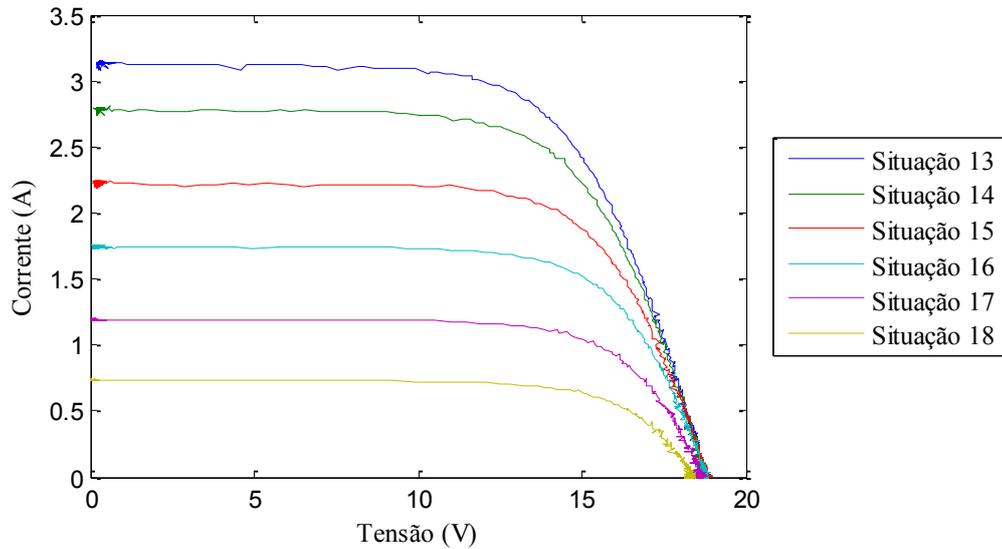
Situação	Horário	G (W/m ²)	T (°C)
1	12:15	1046	72,1
2	12:40	1028	71,1
3	12:51	1017	71
4	13:15	971	69,7
5	13:25	944	68,8
6	13:45	891	67,6
7	13:50	874	66,7
8	14:05	826	66
9	14:10	811	65,2
10	14:30	739	62,2
11	14:40	707	61,1
12	14:50	675	59,5
13	15:05	619	56,7
14	15:10	595	56
15	15:21	549	54,6
16	15:30	509	53
17	15:45	442	51,1
18	15:56	395	49,3
19	16:06	348	47,7
20	16:21	281	45,2
21	16:30	236	43,6
22	16:41	183	41,9
23	16:51	139	39,9

Fonte: Autoria Própria

Na Figura 90 e na Figura 91 são mostradas, como exemplo, respectivamente, as curvas IxV e PxV medidas com o traçador desenvolvido para as situações 13 a 18 da Tabela 6. Percebe-se, novamente, como na Figura 82 e na Figura 83, que a tensão de circuito aberto varia pouco quando comparada com a corrente de curto circuito.

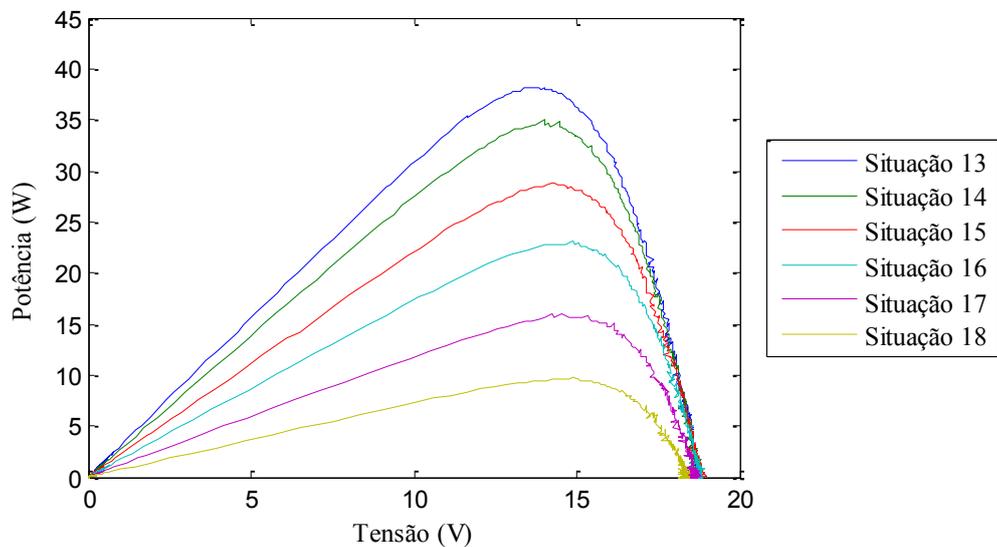
As comparações de todas as curvas IxV e PxV obtidas com os dois traçadores nas 23 situações identificadas na Tabela 6, referentes ao módulo FV KC 85 T, são mostradas no Apêndice 2.

Figura 90 – Curvas IxV medidas com o traçador desenvolvido para as situações 13, 14, 15, 16, 17 e 18 descritas na Tabela 6



Fonte: Autoria Própria

Figura 91 – Curvas PxV medidas com o traçador desenvolvido para as situações 13, 14, 15, 16, 17 e 18 descritas na Tabela 6

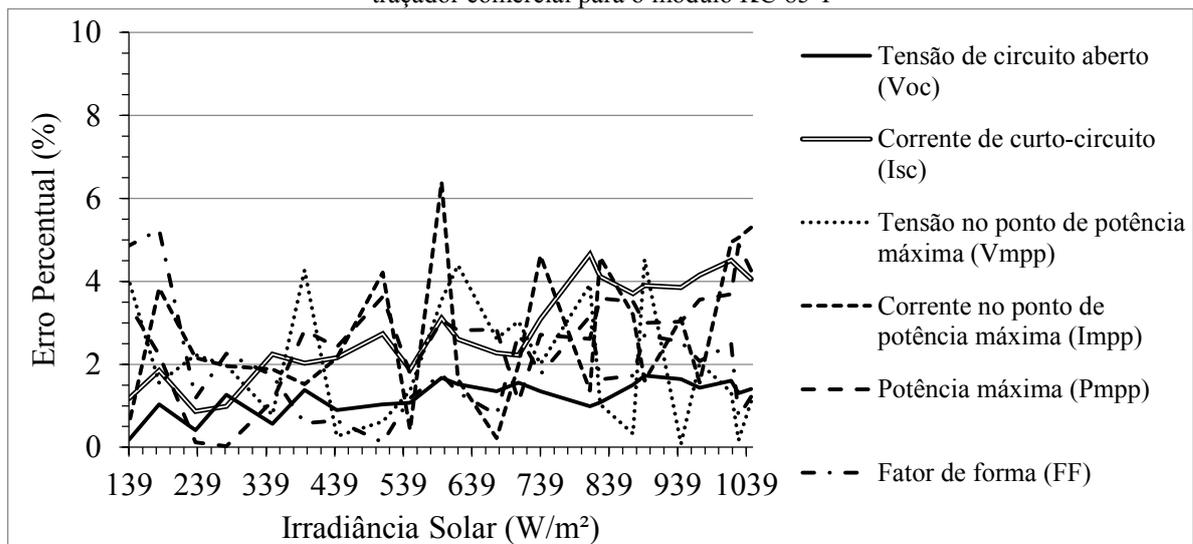


Fonte: Autoria Própria

Na Figura 92 são mostrados os erros percentuais relativos a cada parâmetro elétrico medido com o traçador desenvolvido em relação ao traçador comercial. Diferentemente do que ocorre com o módulo KS 20 T onde os erros de corrente são elevados para condições de baixas irradiâncias, os erros para o módulo KC 85 T tiveram para todas as situações valores inferiores a 7% e com exceção da situação 14 todos os valores foram inferiores a 6%. Isso se deve a este módulo apresentar valores de corrente de curto circuito

maiores do que o módulo KS 20 T. Para corrente muito baixas o sensor de corrente utilizado no traçador desenvolvido começa a apresentar uma precisão baixa e por isso os erros de corrente se tornam altos. Para as medições da tensão de circuito aberto foi observado que todos os erros foram inferiores a 2% e para as medições de tensão no ponto de máxima potência foram observados erros inferiores a 4,5%.

Figura 92 – Erros percentuais dos parâmetros elétricos medidos com o traçador desenvolvido em relação ao traçador comercial para o módulo KC 85 T



Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 7 são mostrados os erros máximos, mínimos e médios para os parâmetros elétricos medidos com o traçador desenvolvido em relação aos do traçador comercial. A média dos erros para todos os parâmetros foi inferior a 3% indicando boa precisão do traçador desenvolvido para este módulo. Os maiores erros se situaram novamente nas medições de corrente devido à imprecisão desta medição.

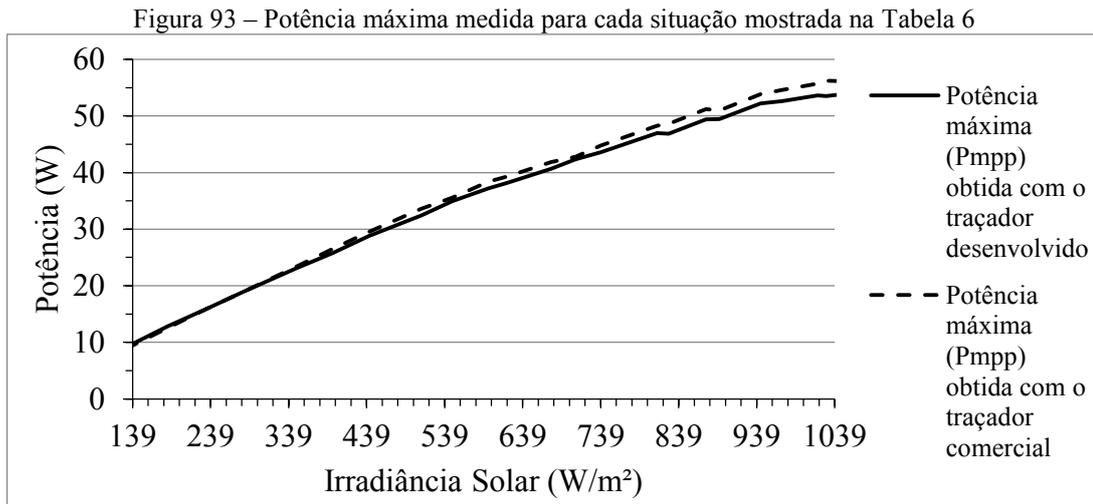
Tabela 7 – Erros máximos, mínimos e médios para cada parâmetro medido (módulo KC 85 T)

	Voc	Isc	Vmpp	Impp	Pmpp	FF
Erro máximo (%):	1,73	4,66	4,53	6,39	4,89	5,25
Erro mínimo (%):	0,18	0,87	0,08	0,22	0,03	0,12
Média dos ERROS (%):	1,22	2,89	2,05	2,79	2,71	1,93

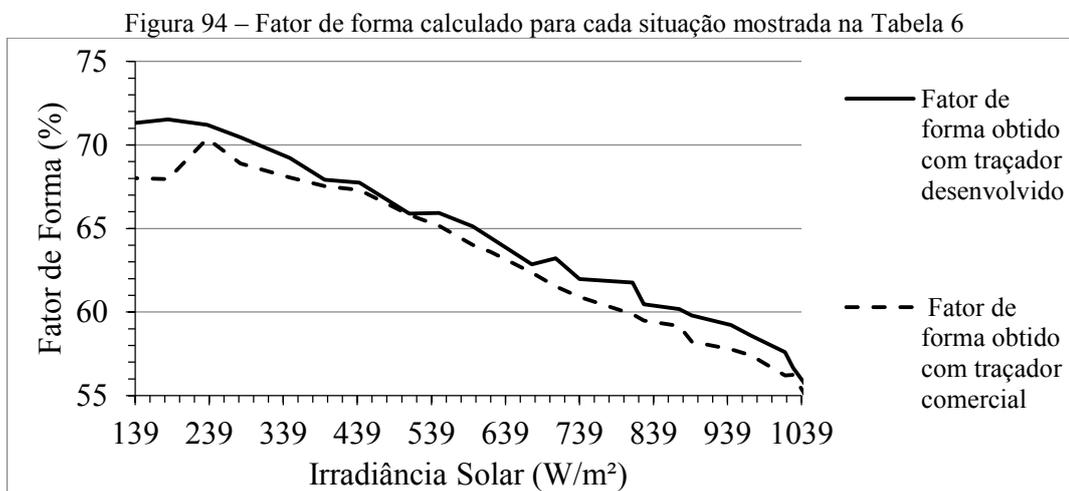
Fonte: Autoria Própria

Na Figura 93 são mostrados os níveis de potência máxima medidos com os dois traçadores para as situações mencionadas na Tabela 6. A potência máxima medida com o traçador desenvolvido variou de 56 até 9,44 W.

Na Figura 94 são mostrados os fatores de forma calculados a partir dos parâmetros medidos com os dois traçadores. Novamente, percebe-se que o fator de forma é crescente durante o experimento devido a grande influencia da irradiância solar sobre a corrente de curto circuito e a pequena variação de tensão de circuito aberto durante o experimento.



Fonte: Autoria Própria

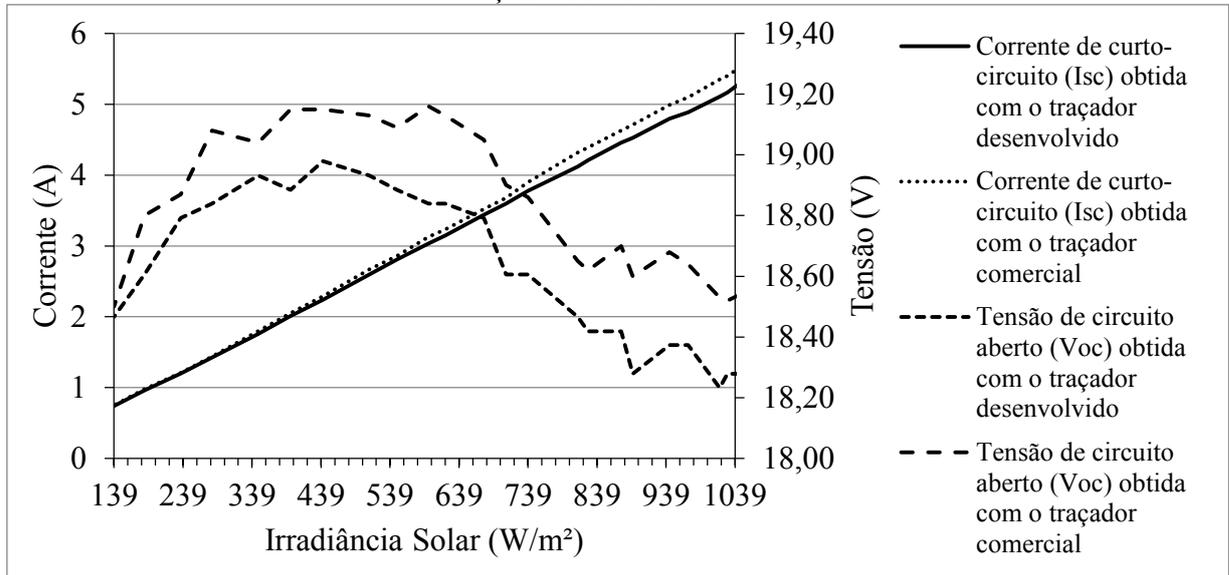


Fonte: Autoria Própria

Na Figura 95 são mostrados os valores de corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto medidas com os dois traçadores. Percebe-se que a diferença nas correntes de curto circuito medidas é maior para valores elevados de irradiância além do que a tensão de circuito aberto apresenta valores crescentes para valores decrescentes de temperatura. Quando a temperatura diminui a tendência é a tensão de circuito aberto se tornar maior, mas na Figura

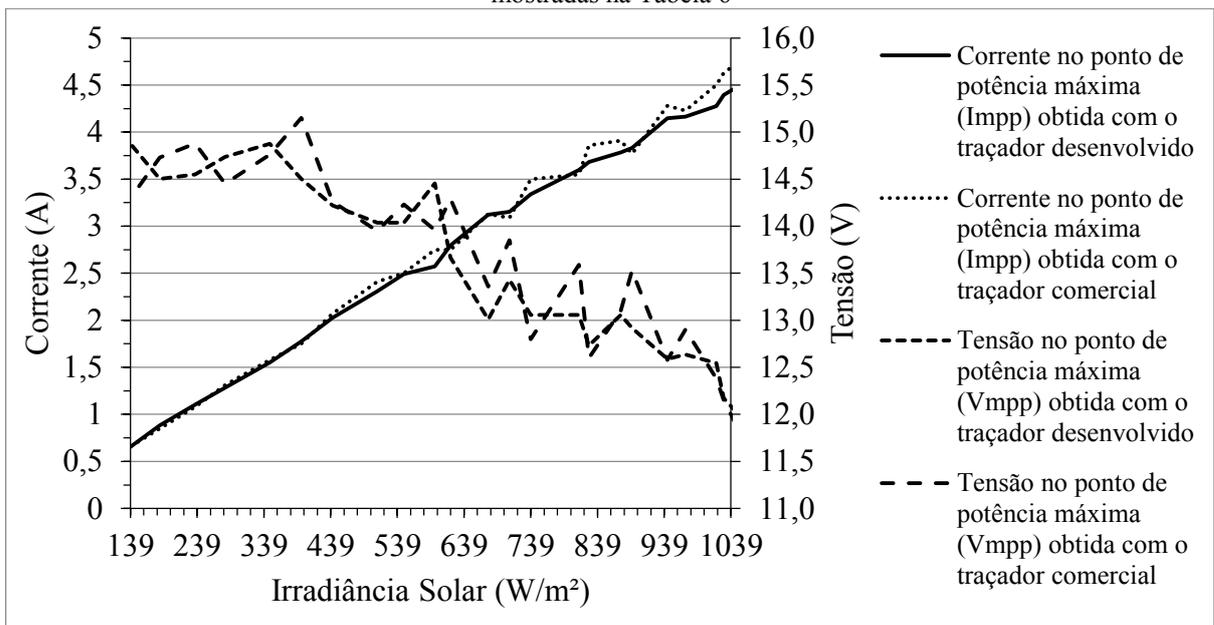
95 percebe-se que este fato só é verdadeiro para determinados níveis de irradiância solar, pois para valores muito baixos de irradiância percebe-se o decréscimo da tensão de circuito aberto.

Figura 95 – Correntes de curto circuito e tensões de circuito aberto medidas com os dois traçadores para situações mostradas na Tabela 6



Na Figura 96 são mostradas as tensões e correntes nos pontos de potência máxima para as situações mostradas na Tabela 6.

Figura 96 – Correntes e tensões nos pontos de máxima potência medidas com os dois traçadores para situações mostradas na Tabela 6



6.4 Medições com o Módulo TSM 160

O terceiro módulo FV utilizado para validação do traçador desenvolvido foi TSM 160 do fabricante Azur. As características elétricas em STC do mesmo são mostradas na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros elétricos em STC para o módulo FV TSM 160

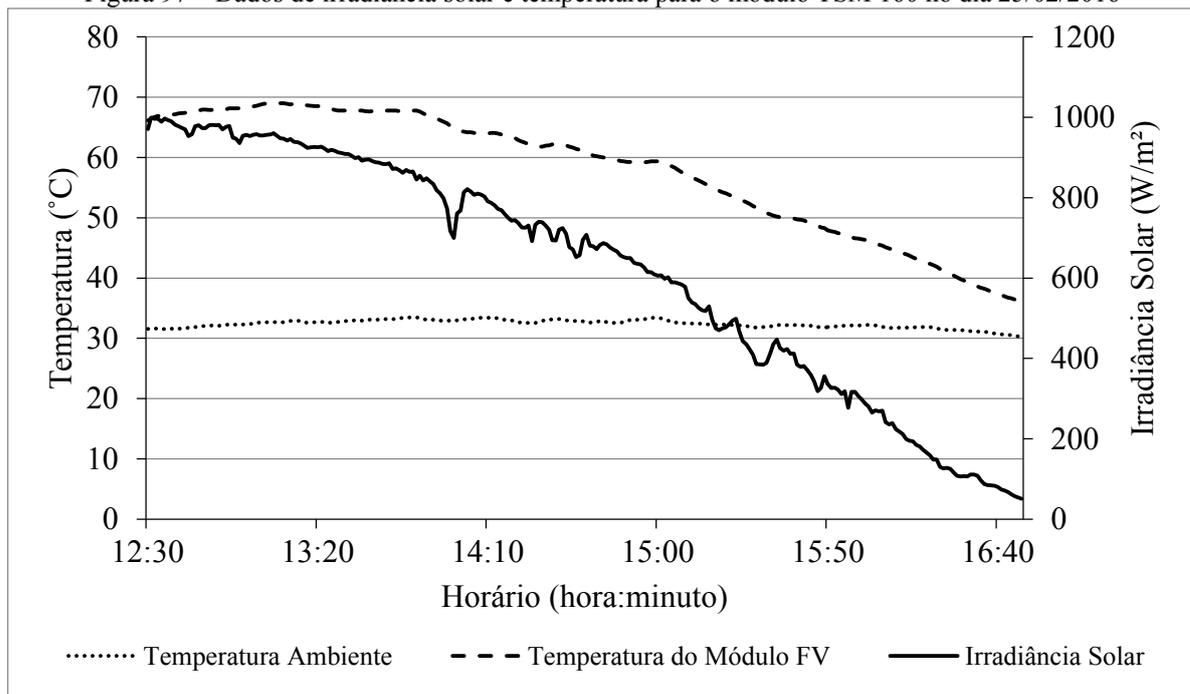
Corrente de curto circuito (I_{sc}):	4,94 A
Tensão de circuito aberto (V_{oc}):	43,5 V
Corrente no ponto de potência máxima (I_{mpp}):	4,54 A
Tensão no ponto de potência máxima (V_{mpp}):	35,25 V
Potência máxima (P_{mpp}):	160 W

Fonte: AZUR

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 como é mostrado na Figura 97. Nesta é possível identificar uma variação de temperatura no módulo de 69,6 a 41 °C. A irradiância variou de 982 a 126 W/m² e a temperatura ambiente se manteve próxima de 32 °C.

Na Tabela 9 são mostradas as 20 situações de validação com o módulo TSM 160.

Figura 97 – Dados de irradiância solar e temperatura para o módulo TSM 160 no dia 25/02/2016



Fonte: Autoria Própria

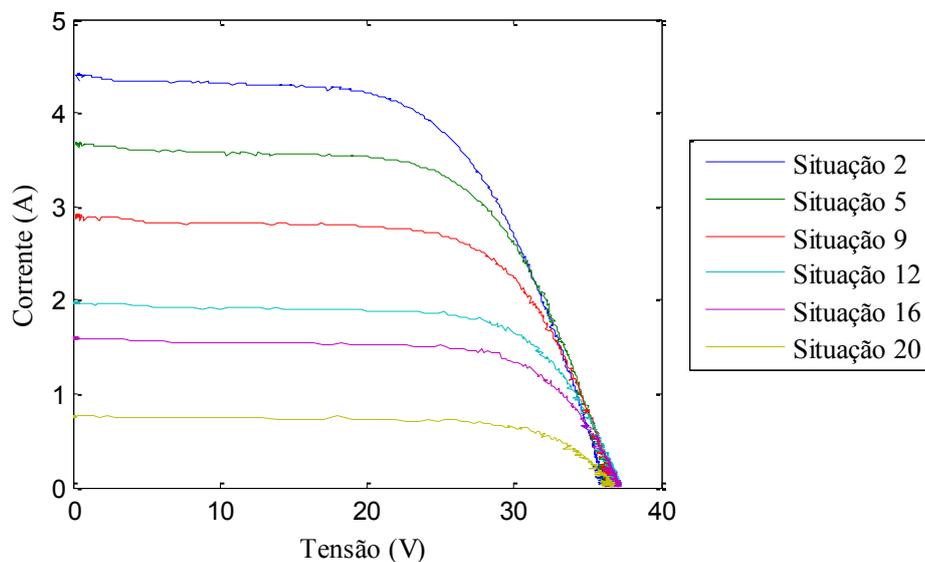
Tabela 9 – Situações de teste e validação do traçador desenvolvido para o módulo TSM 160

Situação	Horário	G (W/m ²)	T (°C)
1	12:57	982	68
2	13:26	932	69,6
3	13:49	884	67,8
4	14:15	812	64,1
5	14:23	770	63,8
6	14:30	725	62,5
7	14:45	681	61,2
8	15:01	639	59,2
9	15:11	601	58,9
10	15:21	532	56
11	15:26	476	54,8
12	15:37	401	51,7
13	15:44	444	50,2
14	15:48	405	49,9
15	15:53	371	49,2
16	15:56	321	48,4
17	16:12	269	45,8
18	16:19	226	44,4
19	16:27	178	42,5
20	16:33	126	41

Fonte: Autoria Própria

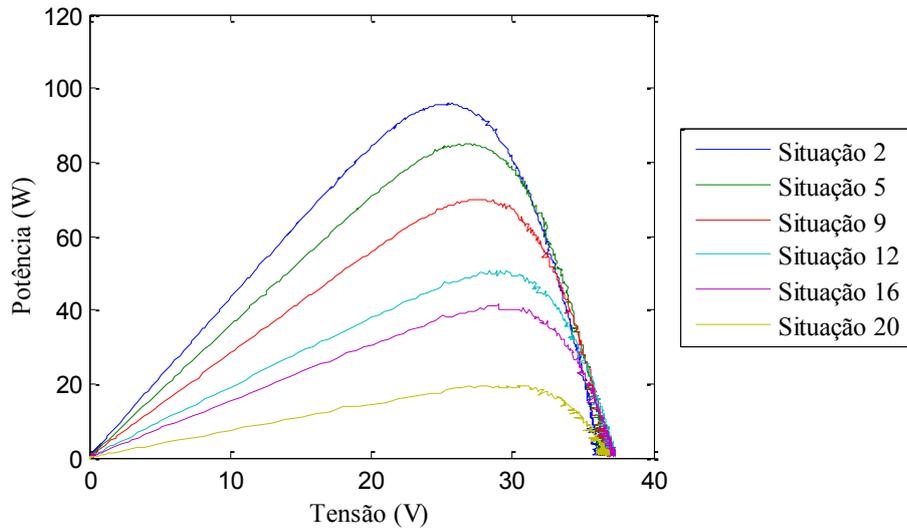
Na Figura 98 e na Figura 99 são mostradas, como exemplo, as curvas IxV e PxV, respectivamente, relativas as situações 2, 5, 9, 12, 16 e 20 da Tabela 9.

Figura 98 – Curvas IxV medidas com o traçador desenvolvido para as situações 2, 5, 9, 12, 16 e 20 descritas na Tabela 9



Fonte: Autoria Própria

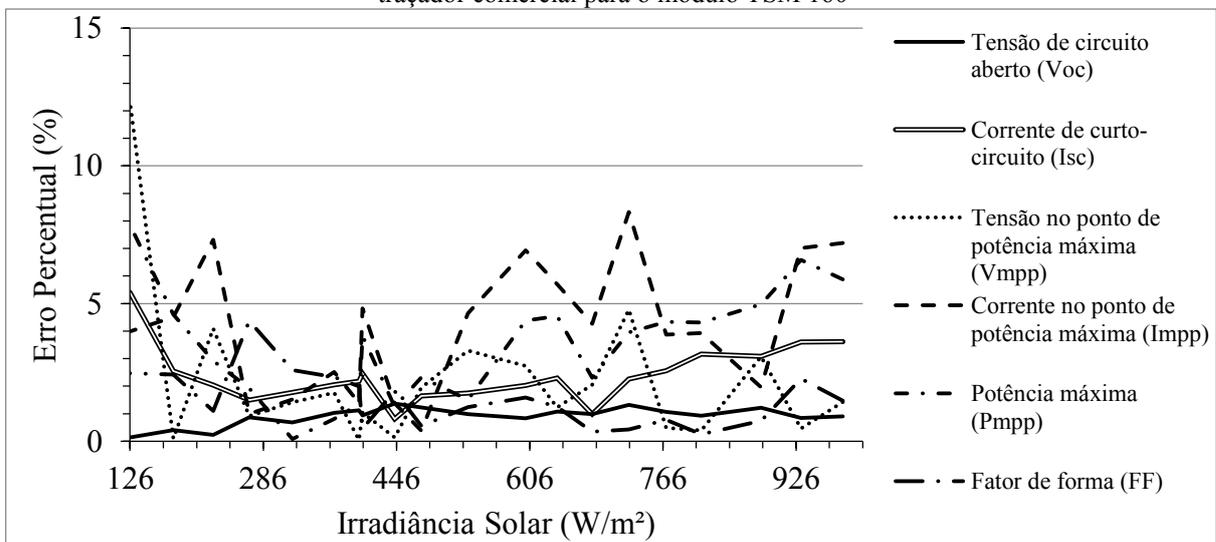
Figura 99 – Curvas PxV medidas com o traçador desenvolvido para as situações 2, 5, 9, 12, 16 e 20 descritas na Tabela 9



Fonte: Autoria Própria

Os erros percentuais entre os parâmetros elétricos medidos com o traçador desenvolvido em relação ao traçador comercial são mostrados na Figura 100. 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 IxV contenha distorções para baixas irradiâncias. Essas distorções próximas ao ponto de potência máxima acentuam o erro entre os dois traçadores.

Figura 100 – Erros percentuais dos parâmetros elétricos medidos com o traçador desenvolvido em relação ao traçador comercial para o módulo TSM 160



Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 10 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 10 – Erros máximos, mínimos e médios para cada parâmetro elétrico (módulo TSM 160)

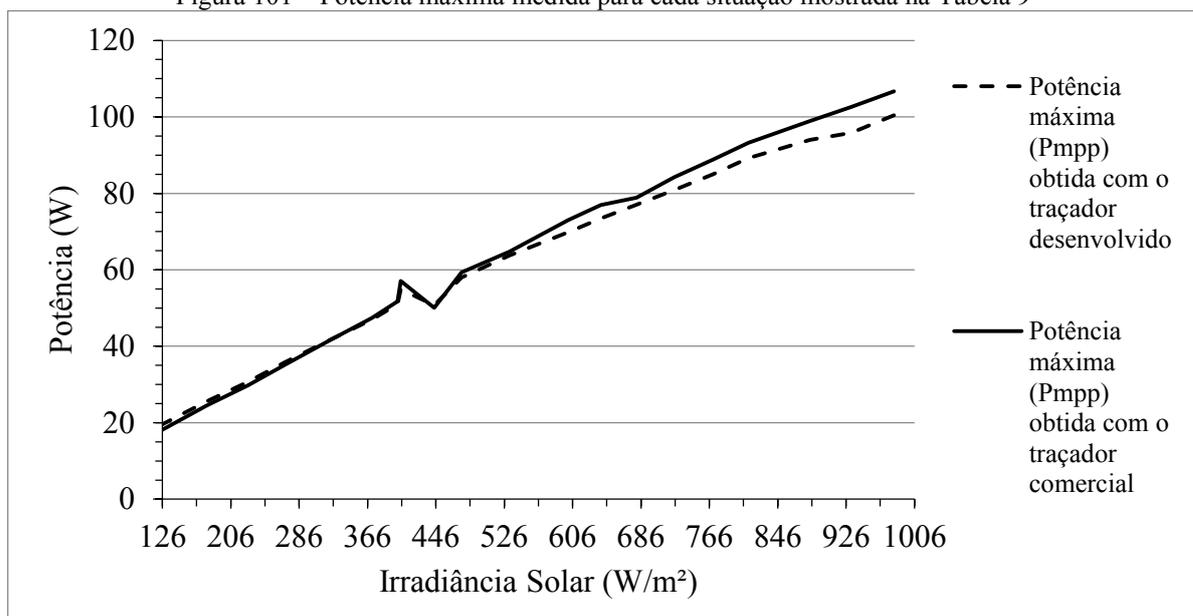
	Voc	Isc	Vmpp	Impp	Pmpp	FF
Erro máximo (%):	1,36	5,41	12,34	8,33	7,86	4,37
Erro mínimo (%):	0,14	0,81	0,05	0,38	0,08	0,26
Média dos ERROS (%):	0,91	2,39	2,18	4,13	3,49	1,52

Fonte: Autoria Própria

Na Figura 101 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.

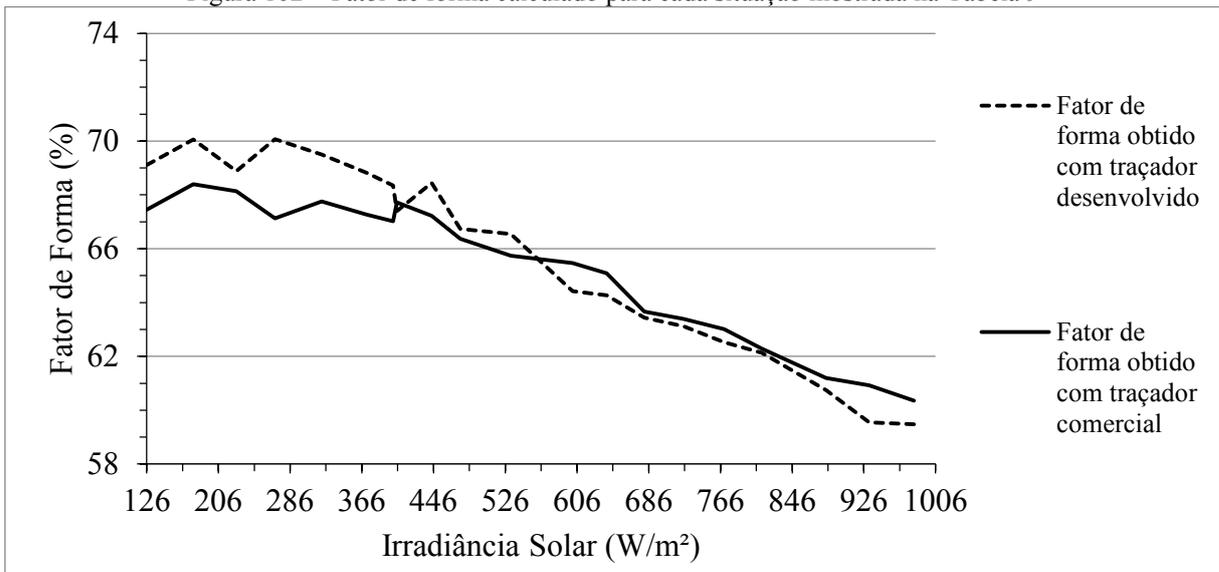
Na Figura 102 são mostrados os fatores de forma calculados a partir dos parâmetros elétricos medidos com os dois traçadores. Igualmente como nas medições com os módulos KS 20 T e KC 85 T o fator de forma aumenta durante o experimento. Para o módulo KS 20 T foram registrados fatores de forma variando entre 67 e 76%, para o módulo KC 85 T foram registrados fatores de forma variando entre 56 e 71%; e para o módulo TSM 160 foram registrados fatores de forma variando entre 59 e 69%.

Figura 101 – Potência máxima medida para cada situação mostrada na Tabela 9



Fonte: Autoria Própria

Figura 102 – Fator de forma calculado para cada situação mostrada na Tabela 9

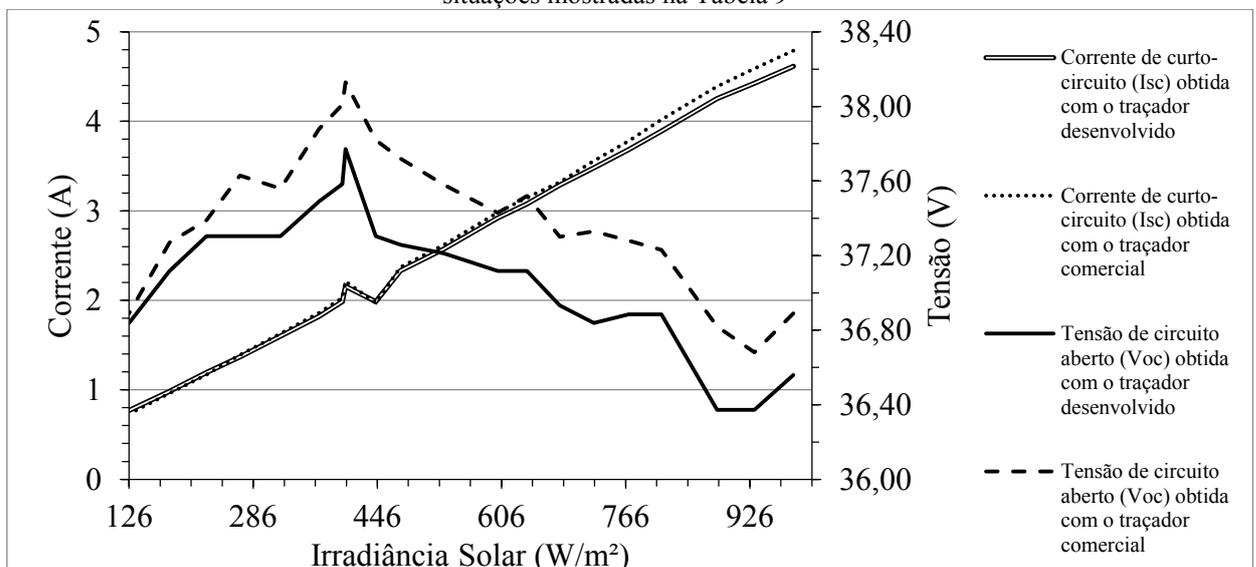


Fonte: Autoria Própria

Na Figura 103 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 °C.

As comparações de todas as curvas IxV e PxV obtidas com os dois traçadores nas 20 situações identificadas na Tabela 9, referentes ao módulo FV TSM 160, são mostradas no Apêndice 3.

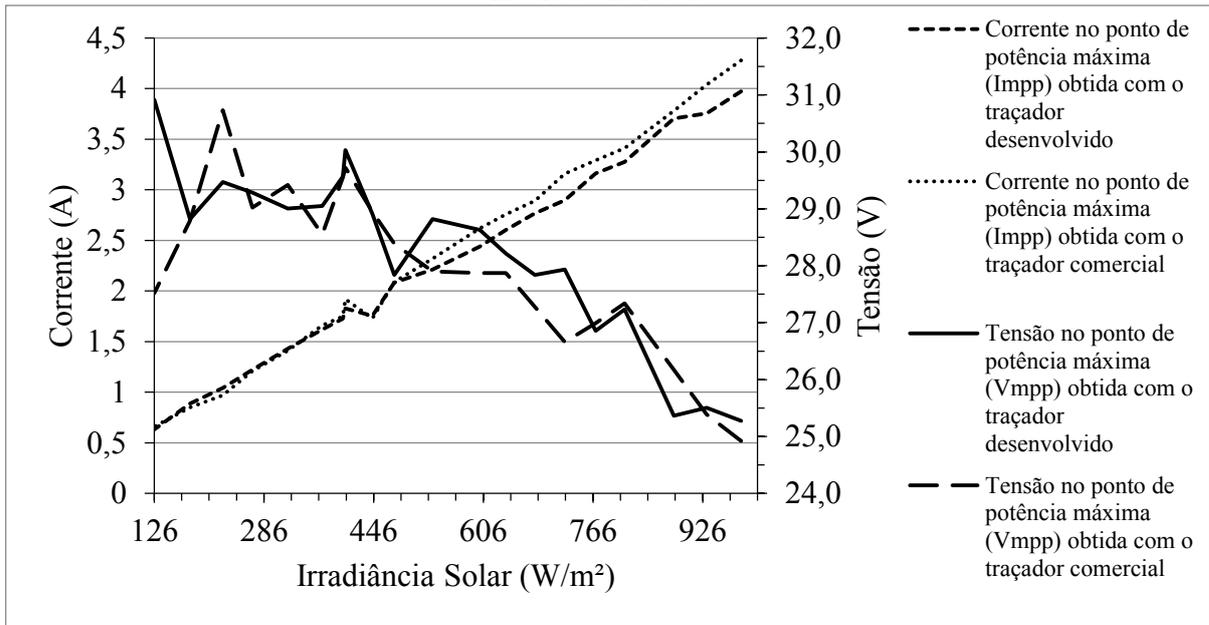
Figura 103 – Correntes de curto circuito e tensões de circuito aberto medidas com os dois traçadores para situações mostradas na Tabela 9



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 104 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 104 – Correntes e tensões nos pontos de potência máxima medidas com os dois traçadores para situações mostradas na Tabela 9



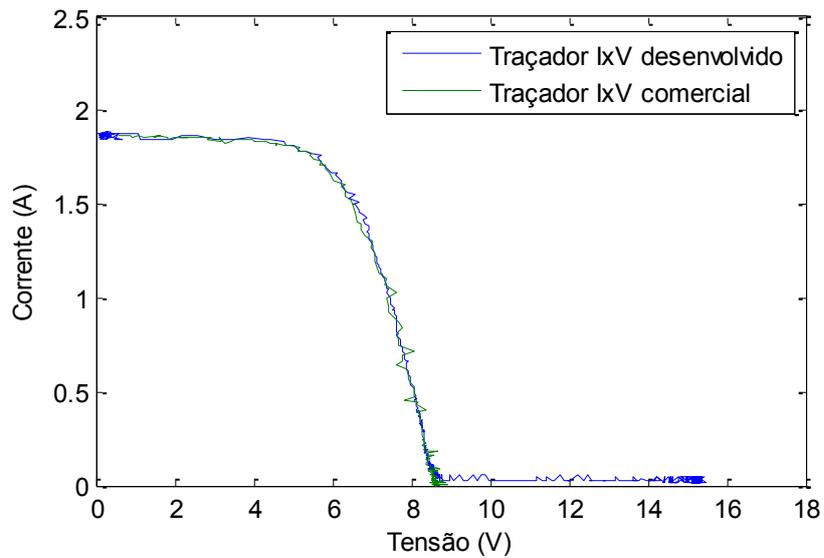
Fonte: Autoria Própria

6.5 Medições para Identificação de Sombreamento

Para avaliar o comportamento do traçador desenvolvido em situações de sombreamento foram realizados experimentos no dia 26 de fevereiro de 2016. O módulo KC 85 T foi submetido a condições de sombreamento e foram observados os comportamentos das curvas I_xV e P_xV relativas tanto ao traçador desenvolvido como ao traçador comercial (MINI-KLA).

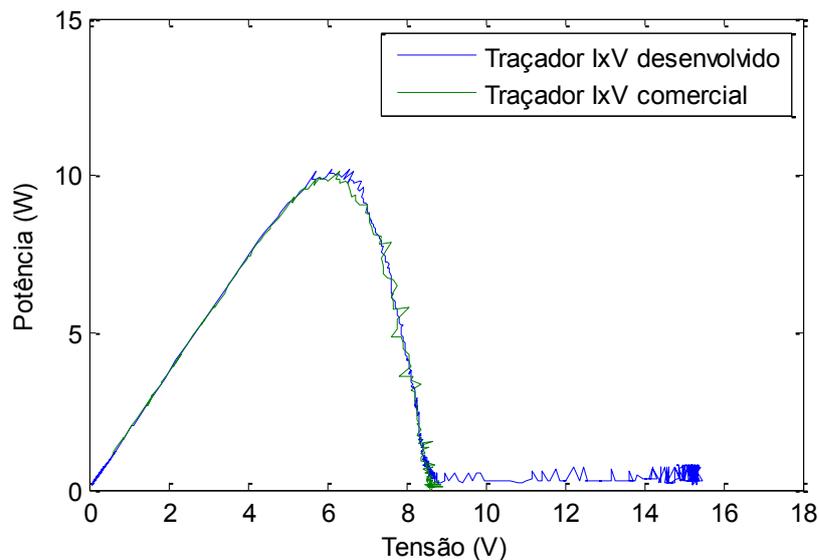
Na Figura 105 e na Figura 106 são mostradas as curvas I_xV e P_xV medidas com os dois traçadores para uma situação de irradiância solar igual a 351 W/m^2 e temperatura do módulo igual a $53,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Neste caso, as células de uma das partes laterais do módulo FV foram totalmente cobertas com isopor para simular o sombreamento. Percebe-se que ambos os traçadores conseguiram identificar a corrente de curto circuito, mas apenas o traçador desenvolvido conseguiu detectar a característica de sombreamento que é perceptível na tensão de circuito aberto.

Figura 105 – Curva IxV para o módulo KC85T sombreado nas condições de $G=351 \text{ W/m}^2$ e $T=53,2 \text{ }^\circ\text{C}$



Fonte: Autoria Própria

Figura 106 – Curva PxV para o módulo KC85T sombreado nas condições de $G=351 \text{ W/m}^2$ e $T=53,2 \text{ }^\circ\text{C}$



Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 11 são mostrados os parâmetros elétricos obtidos através dos dois traçadores para as situações mencionadas na Figura 105 e na Figura 106. Percebe-se que o traçador comercial não identifica a curva IxV dentro da faixa de tensão compreendida entre 8,93 V e 15,48 V. Este fato pode ser explicado pelo número de pontos que cada traçador caracteriza a curva IxV, no traçador desenvolvido cada curva possui 800 pontos e no traçador comercial, para as situações mostradas na Figura 105 e na Figura 106, a curva IxV possui 207 pontos.

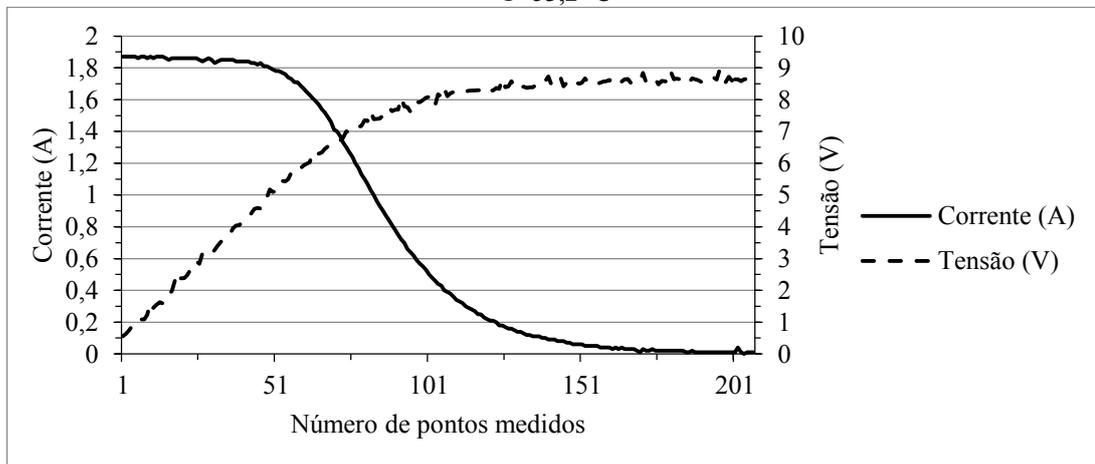
Na Figura 107 e na Figura 108 são mostrados, respectivamente, os transientes de caracterização da curva IxV obtidos com o traçador MINI-KLA e com o traçador desenvolvido para as situações mencionadas na Figura 105 e na Figura 106.

Tabela 11 – Parâmetros elétricos obtidos com os 2 traçadores para o módulo KC 85 T sombreado nas condições de $G=351 \text{ W/m}^2$ e $T=53,2 \text{ }^\circ\text{C}$

	Voc (V)	Isc (A)	Vmpp (V)	Impp (A)	Pmpp (W)	FF (%)
Traçador Desenvolvido	15,48	1,89	6,11	1,67	10,20	34,85
Traçador Comercial	8,93	1,87	6,31	1,61	10,16	60,84
Erro Percentual (%)	-	1,07	3,17	3,72	0,39	-

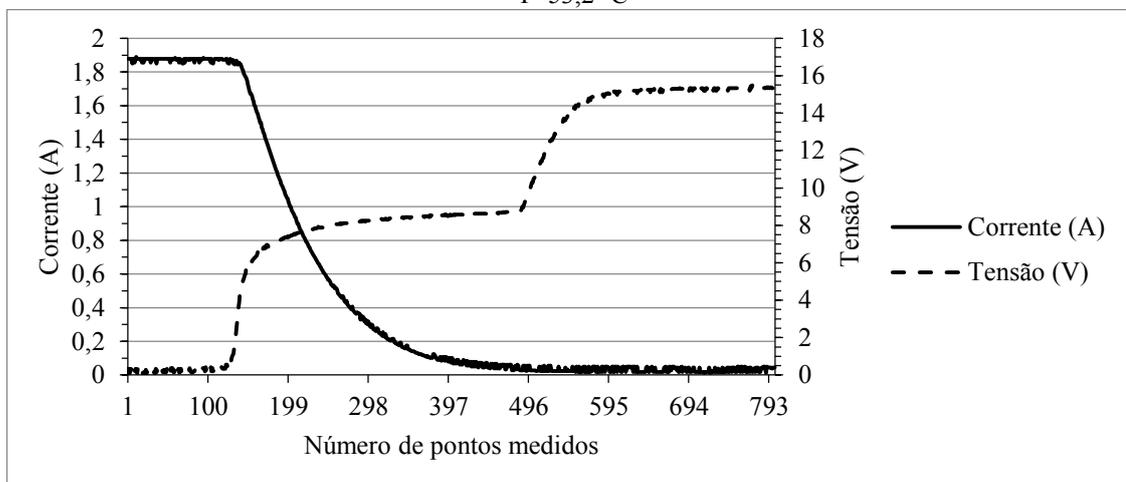
Fonte: Autoria Própria

Figura 107 – Transiente de caracterização obtido com o traçador MINI-KLA nas condições de $G=351 \text{ W/m}^2$ e $T=53,2 \text{ }^\circ\text{C}$



Fonte: Autoria Própria

Figura 108 – Transiente de caracterização obtido com o traçador desenvolvido nas condições de $G=351 \text{ W/m}^2$ e $T=53,2 \text{ }^\circ\text{C}$



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 109 e na Figura 110 são mostradas, respectivamente, as curvas IxV e PxV para o módulo KC 85 T numa situação de sombreamento com irradiância solar igual a 418 W/m^2 e temperatura do módulo igual a $56,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Neste caso, as células de uma das partes laterais do módulo FV foram parcialmente cobertas com isopor para simular o sombreamento. Percebe-se a presença de um nó na curva IxV que é detectado pelos dois traçadores.

Somente as medições de corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto não seriam suficientes para identificação do problema visto que a única forma de identificação seria a medição completa da curva IxV.

Na Tabela 12 são mostrados os parâmetros elétricos obtidos com os dois traçadores para as situações mostradas na Figura 109 e na Figura 110. O baixo fator de forma é um indicativo de que o módulo esteja sombreado, tanto na Tabela 11 quanto na Tabela 12 o traçador desenvolvido indica fatores de forma menores do que 40%.

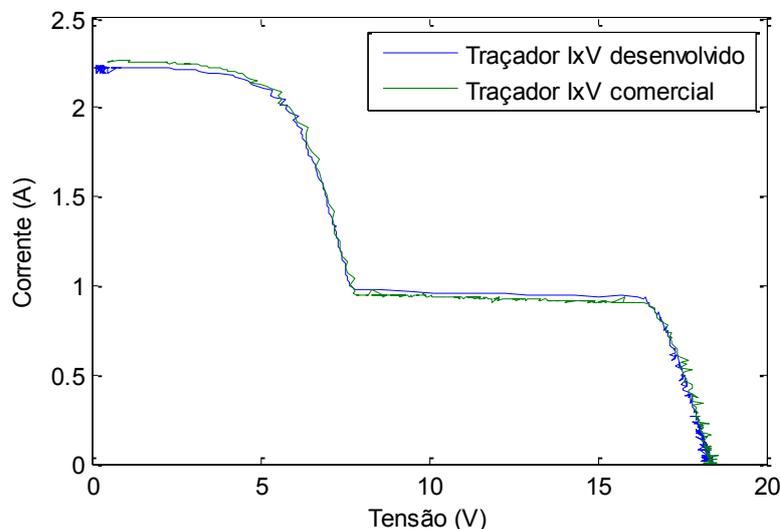
Os erros percentuais dos parâmetros elétricos medidos com os dois traçadores para esta situação de sombreamento foram inferiores a 4% e a maior diferença entre os valores obtidos foi identificado no fator de forma com um erro percentual de 5,41%.

Tabela 12 – Parâmetros elétricos obtidos com os 2 traçadores para o módulo KC85T sombreado nas condições de $G=418 \text{ W/m}^2$ e $T=56,7 \text{ }^\circ\text{C}$

	Voc (V)	Isc (A)	Vmpp (V)	Impp (A)	Pmpp (W)	FF (%)
Traçador Desenvolvido	18,42	2,23	16,41	0,93	15,32	37,22
Traçador Comercial	18,59	2,26	15,78	0,94	14,83	35,31
Erro Percentual (%)	0,91	1,32	3,99	1,06	3,30	5,41

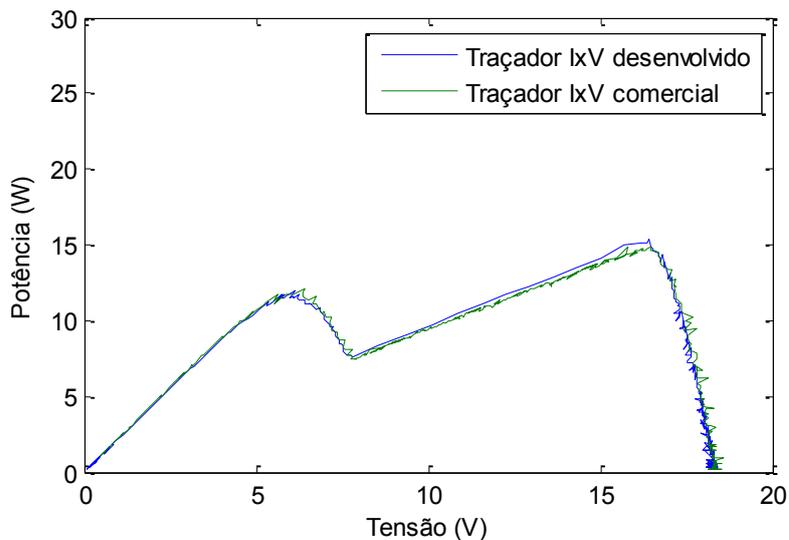
Fonte: Autoria Própria

Figura 109 – Curva IxV para o módulo KC85T sombreado nas condições de $G=418 \text{ W/m}^2$ e $T=56,7 \text{ }^\circ\text{C}$



Fonte: Autoria Própria

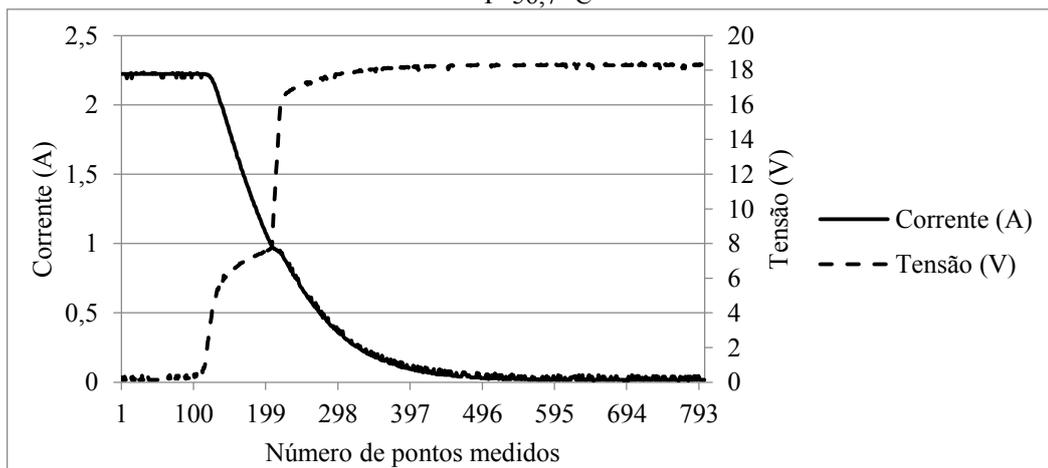
Figura 110 – Curva PxV para o módulo KC85T sombreado nas condições de $G=418 \text{ W/m}^2$ e $T=56,7 \text{ }^\circ\text{C}$



Fonte: Autoria Própria

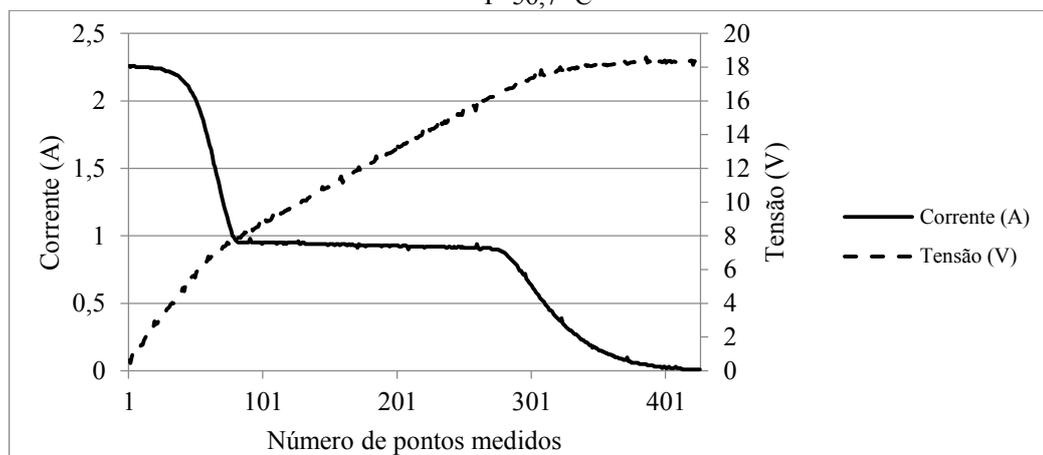
Na Figura 111 e na Figura 112 são mostrados, respectivamente, os transientes de caracterização da curva IxV obtidos com o traçador MINI-KLA e com o traçador desenvolvido para as situações mencionadas na Figura 109 e na Figura 110. Nesta situação de sombreamento o traçador comercial caracterizou a curva IxV com 426 pares IxV e o traçador desenvolvido com 800.

Figura 111 - Transiente de caracterização obtido com o traçador desenvolvido nas condições de $G=418 \text{ W/m}^2$ e $T=56,7 \text{ }^\circ\text{C}$



Fonte: Autoria Própria

Figura 112 - Transiente de caracterização obtido com o traçador MINI-KLA nas condições de $G=418 \text{ W/m}^2$ e $T=56,7 \text{ }^\circ\text{C}$



Fonte: Autoria Própria

6.6 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos com o traçador IxV desenvolvido. A validação de cada curva obtida foi realizada através do traçador comercial MINI-KLA. Os parâmetros elétricos fornecidos por cada traçador foram comparados e assim foi gerado um erro entre os valores do traçador desenvolvido em relação ao traçador comercial.

Estes erros foram estudados para 3 módulos de diferentes características elétricas. Todas as medições foram realizadas no período da tarde para evitar variações bruscas de irradiância durante as medições com os dois traçadores. Os resultados mostraram que, para todos os parâmetros elétricos fornecidos pelos traçadores, os erros médios das medições para os três módulos utilizados foram inferiores a 5%. Este erro está dentro da faixa esperada de imprecisão dos instrumentos de medição utilizados contando com a imprecisão de resistores de até 5%, deve-se considerar também que os dois traçadores não foram utilizados ao mesmo tempo.

Para analisar o funcionamento sob condições de sombreamento, os dois traçadores foram utilizados no módulo KC 85 T. Foi visto que para determinada condição de sombreamento os dois traçadores apresentaram diferenças sendo que o traçador desenvolvido conseguiu caracterizar de forma inteira a curva IxV. Para outra condição de sombreamento os dois traçadores apresentaram resultados semelhantes.

7 CONCLUSÕES

A energia solar tem ganhado mais espaço no mercado mundial através da substituição gradativa de fontes poluentes por fontes renováveis. Os módulos FV são o meio de conversão direta deste tipo de energia em eletricidade, tendo suas características definidas na curva característica IxV. Esta curva é capaz de diagnosticar problemas nos módulos FV como sombreamento, conexões defeituosas, envelhecimento e desacoplamento entre vários módulos.

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 realizar a 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.

Na presente dissertação 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, o número de pontos para cada curva IxV foi definido em 800.

Uma simulação do circuito elétrico do traçador foi realizada no *software* Proteus e observou-se a lógica de acionamento do estágio de comando para carregamento e descarregamento do capacitor que fica em paralelo ao *gate* do MOSFET utilizado. O transiente de passagem do curto-circuito ao circuito aberto foi analisado tanto para uma situação de rápida caracterização quanto para uma situação de caracterização mais lenta obtendo-se tempos, respectivamente, de 13,32 ms e 437,5 ms.

No dia 11 de fevereiro de 2016 foram realizadas medições com o módulo FV KS 20 T com potência de 20 Wp. Neste dia, as medições foram realizadas em condições de irradiância solar variando entre 238 e 1025 W/m² e temperatura do módulo variando entre 39,2 e 58,5 °C. Os resultados mostraram que a média dos erros percentuais, para todos os parâmetros elétricos, entre o traçador desenvolvido e o traçador comercial (MINI-KLA) ficou abaixo de 4,6%. Os maiores erros foram encontrados nas medições de corrente devido à imprecisão do sensor de corrente utilizado para baixas correntes. Assim, observou-se, para este módulo, que para baixas irradiâncias (menor do que 400 W/m²) o erro percentual na corrente no ponto de potência máxima chegou a aproximadamente 20%.

No dia 1 de março de 2016 foram realizadas medições com o módulo FV KC 85 T com potência de 87 Wp. Neste dia, as medições foram realizadas em condições de irradiância solar variando entre 139 e 1046 W/m² e temperatura do módulo variando entre 39,9 e 72,1 °C. Os resultados mostraram novamente uma média de erros pequena para todos os parâmetros elétricos obtidos com os dois traçadores (menor do que 2,9%) e os maiores erros se situaram novamente na medição de corrente. Este erro está dentro da faixa esperada de 5% de imprecisão para os resistores utilizados na medição de corrente; além disso, deve-se considerar a imprecisão de medição do próprio sensor LA 100P utilizado, de aproximadamente 0,7%.

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 41 e 69,6 °C. Os resultados da comparação entre os dois traçadores mostraram erros percentuais pequenos para todos os parâmetros elétricos obtidos (menor 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; 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.

Durante os 3 dias de experimentos citados, realizados no período da tarde, foi observado um aumento no fator de forma dos módulos FV durante os experimentos devido à pequena variação da tensão de circuito aberto e à grande variação da corrente de curto-circuito. No módulo KS 20 T foi observado um aumento de 67,6% para 76,42% no fator de forma obtido com o traçador desenvolvido, para o módulo KC 85 T o fator de forma aumentou de 55,5% para 71,52%; e para o módulo TSM 160 o fator de forma passou de 59,47% para 70,05%.

Além da medição da curva IxV sob condições normais de operação, o traçador desenvolvido também foi analisado em duas diferentes condições de sombreamento com o módulo FV KC 85 T. Na primeira condição, as células de uma das partes laterais do módulo foram sombreadas totalmente enquanto que na segunda situação estas células foram sombreadas parcialmente. Observou-se que para primeira situação o traçador desenvolvido

conseguiu caracterizar a curva IxV de forma inteira, enquanto que o traçador MINI-KLA apenas parcialmente. Para a segunda situação, observaram-se comportamentos semelhantes entre os dois traçadores, com erros percentuais entre os valores dos parâmetros elétricos obtidos com os dois traçadores inferiores a 5,42%.

Desta forma, o traçador desenvolvido foi capaz de caracterizar as curvas IxV de 3 módulos FV com diferentes potências e em diferentes condições de irradiância solar e temperatura. A média dos erros percentuais nos 3 módulos FV utilizados, para todos os parâmetros elétricos obtidos com os traçadores foi inferior a 5%.

7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Desenvolvimento de uma carga eletrônica com vários MOSFET'S para caracterização um arranjo FV composto por um conjunto de módulos FV;
- Desenvolvimento de um circuito elétrico específico para que o traçador possa funcionar em campo de modo autônomo a base de baterias;
- Desenvolvimento de uma interface em *smartphone* ou *tablet* com comunicação *bluetooth* com a placa de aquisição;
- Validação do traçador desenvolvido através de instrumentação com certificado de calibração atualizado;
- Uso de um sistema de aquisição com memória suficiente para armazenar os pontos medidos durante o transiente de caracterização da curva IxV de forma a diminuir o tempo para esta caracterização.

7.2 Artigos Publicados em Congresso

- LUNA, M. L. M; CARVALHO, P. C. M; *Desenvolvimento e Validação de Traçador de Curva IxV para Módulos Fotovoltaicos*. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belo Horizonte, 2016.

8 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL: **ANEEL amplia possibilidades para micro e minigeração distribuída**. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=8955&id_area=90. Acessado em: 30 de março de 2016.

AZUR: TSM 160 – Módulo Monocristalino. Datasheet. Disponível em: http://www.solarshop-europe.net/solar-components/solarmodules/azur-solar-gmbh_azur-tsm-165m_m_219.html. Acessado em: 10 de novembro de 2015.

BARBOSA, L. A. M. **Estudo da Eficiência de Sistemas Fotovoltaicos**. Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2010.

BELMILI, H. et al. **Design and development of a data acquisition system for photovoltaic modules characterization**. *Renewable Energy*, v. 35, n. 7, p. 1484–1492, 2010.

BENGHANEM, M. **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, 2009.

BRIGHENTI, L. L. **Inversores não autônomos associados a um autotransformador multipulsos para geração fotovoltaica**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade do Estado de Santa Catarina, 2014.

BÜHLER, A. J. **Determinação de Parametros Fotovoltaicos a partir de Ensaio de Curvas Características sem Iluminação**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

BORGES NETO, M. R.; CARVALHO, P. C. M. **Geração de energia elétrica: fundamentos**. 46p. 1. ed. Editora Érica Ltda, 2013.

CORRÊA, R. M. D. C. **Modelagem e validação do uso de módulo fotovoltaico flutuante em água**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, 2015.

COSTA, W. T. DA. **Modelagem, Estimação de Parâmetros e Método MPPT para Módulos Fotovoltaicos**. Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo, 2010.

DURÁN, E. et al. **Determination of PV Generator I-V/P-V Characteristic Curves Using a DC-DC Converter Controlled by a Virtual Instrument**. International Journal of Photoenergy, v. 2012, p. 1–13, 2012.

EL CHAAR, L.; LAMONT, L. A.; EL ZEIN, N. **Review of photovoltaic technologies**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, n. 5, p. 2165–2175, 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE: **1º Leilão de Energia de Reserva 2015 garante investimentos de R\$ 4,3 bi no país**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/1%C2%BA%20Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20de%20Reserva%202015/1%C2%BALeil%C3%A3odeEnergia%20deReserva2015contrata1GWpdeenergiasolar.aspx>. Acessado em: 30 de março de 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE: **2º Leilão de Energia de Reserva 2015 garante investimentos de R\$ 6,8 bi no país**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/2%C2%BA%20Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20de%20Reserva%202015/2%C2%BALeil%C3%A3odeEnergia%20deReserva.aspx>. Acessado em: 30 de março de 2016.

FARIA, W. A. DE. **Estudo do sombreamento parcial em módulos fotovoltaicos através da resistência série e das redes neurais artificiais**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

GASPARIN, F. P. **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, 2009.

GREEN, M. A. et al. **Solar cell efficiency tables (Version 45)**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 23, n. 1, p. 1–9, 2015.

HERNDAY, P. **Field Applications for I-V Curve Tracers**. SolarPro, n. 4.5, 2011.

HUKSEFLUX: Piranômetro LP02-TR. Datasheet. Disponível em: www.hukseflux.com/sites/default/files/.../LP02-TR_v1302.pdf. Acessado em: 20 de setembro de 2015.

International Rectifier: MOEFET IRFP260N. Datasheet. Disponível em: www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfp260n.pdf. Acessado em: 15 de outubro de 2015.

ISAAC, M. K. **Designing and Fabrication of a Current-Voltage Curve Meter for Electrical Characterization of Photovoltaic Modules**. Dissertação de mestrado apresentada a School of Pure and Applied Sciences os Kenyatta University, 2013.

JIANG, H.; LU, L.; SUN, K. **Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) modules**. Atmospheric Environment, v. 45, n. 25, p. 4299–4304, 2011.

KALDELLIS, J. K.; KAPSALI, M.; KAVADIAS, K. A. **Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations**. Experience obtained from outdoor measurements in Greece. Renewable Energy, v. 66, p. 612–624, 2014.

KIM, J.-H. et al. **Study on mitigation of solder corrosion for crystalline photovoltaic modules**. International Journal of Photoenergy, v. 2014, p. 1–9, 2014.

KING, D. L.; KRATOCHVIL, J. A.; BOYSON, W. E. **Temperature coefficients for PV modules and arrays: measurements methods, difficulties, and results**. Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim (Estados Unidos), 1997.

KUAI, Y.; YUVARAJAN, S. **An electronic load for testing photovoltaic panels**. Journal of Power Sources, v. 154, n. 1, p. 308–313, 2006.

KYMAKIS, E.; KALYKAKIS, S.; PAPAZOGLU, T. M. **Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete**. Energy Conversion and Management, v. 50, n. 3, p. 433–438, 2009.

KYOCERA: KC85T - Módulo Policristalino, Datasheet. Disponível em: www.kyocerasolar.com/assets/001/5177.pdf. Acessado em: 5 de novembro de 2015.

KYOCERA: KS20T - Módulo Policristalino, Datasheet. Disponível em: <http://www.kyocerasolar.com.br/modulos-solares/ks20t.html>. Acessado em: 3 de novembro de 2015.

LEITE, V. et al. **Low-Cost Instrument for Tracing Current-Voltage Characteristics of Photovoltaic Modules**. International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Santiago de Compostela (Espanha), 2012

LEITE, V.; CHENLO, F. **An improved electronic circuit for tracing the IV characteristics of photovoltaic modules and strings**. International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Granada (Espanha), 2010.

LUNA, M. L. M. **Comparação e validação de modelos elétricos de um diodo e dois diodos de um módulo fotovoltaico**. Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, 2013.

MANGANIELLO, P.; BALATO, M.; VITELLI, M. **A Survey on Mismatching and Aging of PV Modules: The Closed Loop**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 62, n. 11, p. 7276–7286, 2015.

MARCOLINO, J. B. **Desenvolvimento de células solares com campo retrodifusor formado por pasta de alumínio e difusão em forno de esteira**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2011.

MATTOS, F. C. **Contribuição ao estudo de um sistema solar fotovoltaico monofásico de um único estágio**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, 2011.

MUÑOZ, J.; LORENZO, E. **Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays**. *Solar Energy*, v. 80, n. 11, p. 1489–1497, 2006.

NDIAYE, A. et al. **Impact of dust on the photovoltaic (PV) modules characteristics after an exposition year in Sahelian environment: The case of Senegal**. *International Journal of Physical Sciences*, v. 8(21), n. 21, p. 1166–1173, 2013.

ORTEGA, L. L. M. **Conversão fotovoltaica: comparação de modelos de desempenho**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Metrologia da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2013.

PIERRET, R. F. **Semiconductor device fundamentals**. United States of America: Addison Weley, 1996.

PILIOUGINE, M. et al. **Experimental system for current-voltage curve measurement of photovoltaic modules under outdoor conditions**. *Progress in photovoltaics: research and applications*, v. 19, p. 591–602, 2011.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Grupo de trabalho de energia solar (GTES). CEPEL - DTE - CRESESB. 2014

REKIOUA, D.; MATAGNE, E. **Optimization of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulation and Control**. 1. ed. Londres: Springer, 2012.

RILEY, C. W. **An Autonomous Online I-V Tracer for PV Monitoring Applications**. Dissertação de mestrado apresentada a Universidade de Tennessee (Knoxville), 2014.

RODRIGUES, P. M. F. **Sistema de geração e aquisição das características I-V de módulos fotovoltaicos**. Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto Politécnico de Bragança, 2009.

SAHBEL, A. et al. **Experimental Performance Characterization of Photovoltaic Modules Using DAQ**. Energy ProcediaTerraGreen 13 International Conference 2013 - Advancements in Renewable Energy and Clean Environment Experimental, v. 36, p. 323–332, 2013.

SANUSB: Tutorial. Disponível em: <https://xa.yimg.com/kq/groups/22186886/.../110305TutorialSanUSBWindows.pdf>. Acessado em: 25 de janeiro de 2015.

SCHILL, C.; BRACHMANN, S.; KOEHL, M. **Impact of soiling on IV-curves and efficiency of PV-modules**. Solar Energy, v. 112, p. 259–262, 2015.

SIMON, M.; MEYER, E. L. **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, 2006.

SURICHAQUI, R. C. C. **Avaliação teórica do uso de conversores CC-CC na eficiência da conversão fotovoltaica em condições adversas de operação**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metrologia da Potifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2015.

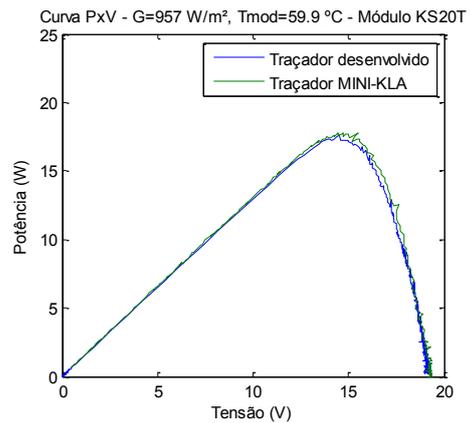
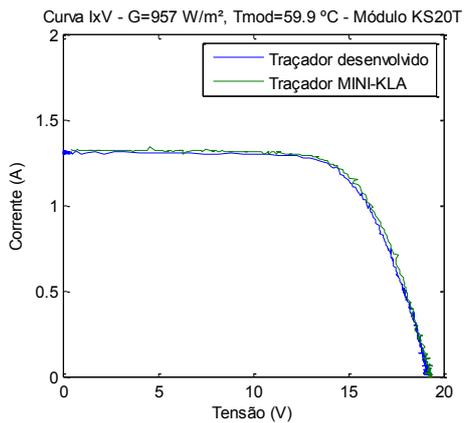
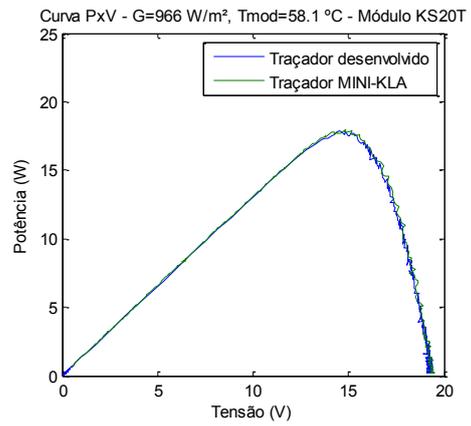
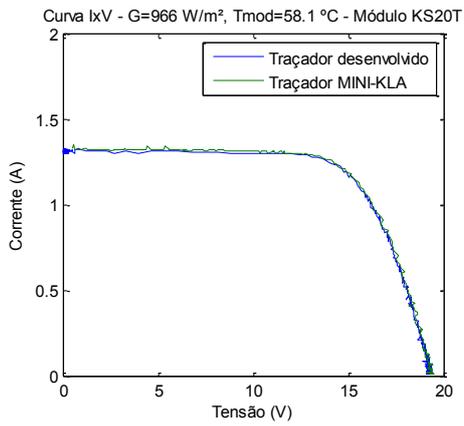
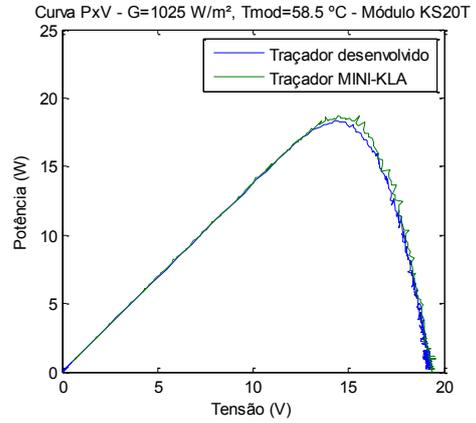
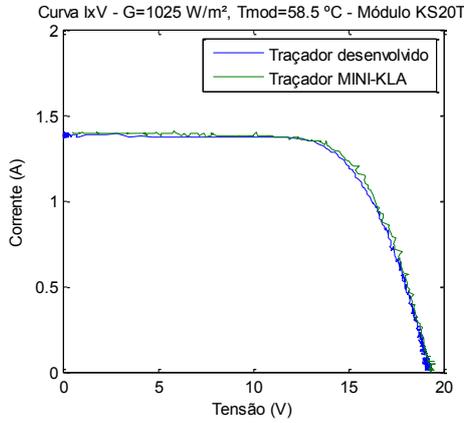
TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T.; KIEHL, J. **Earth's Global Energy Budget**. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 90, n. 3, p. 311–323, 2009.

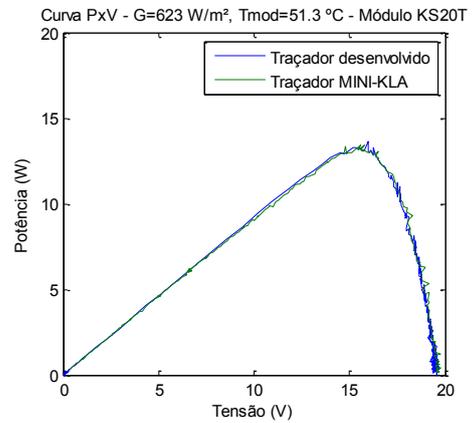
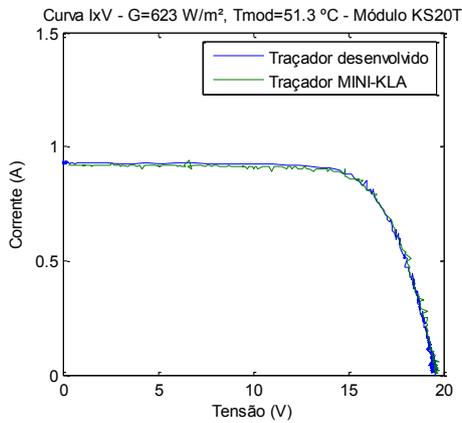
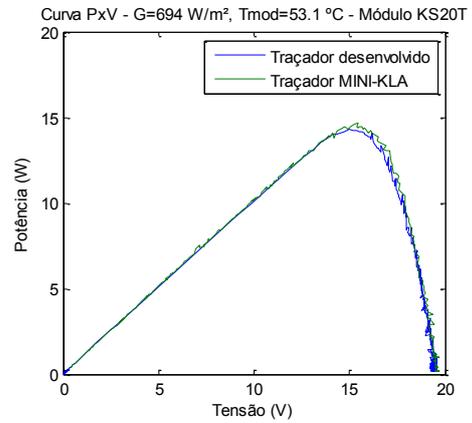
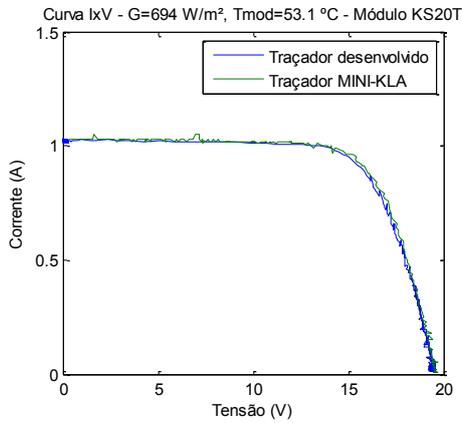
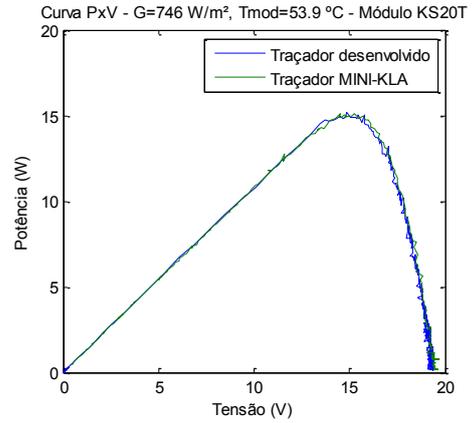
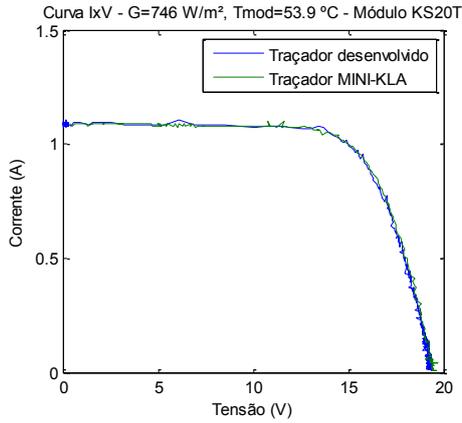
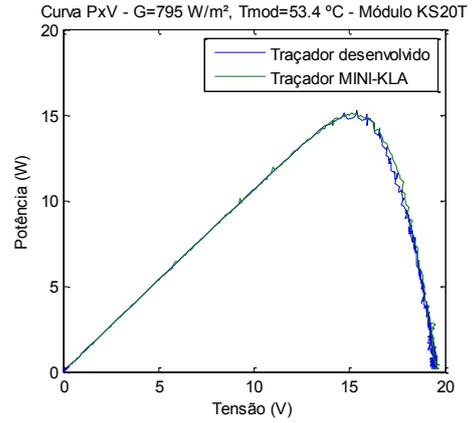
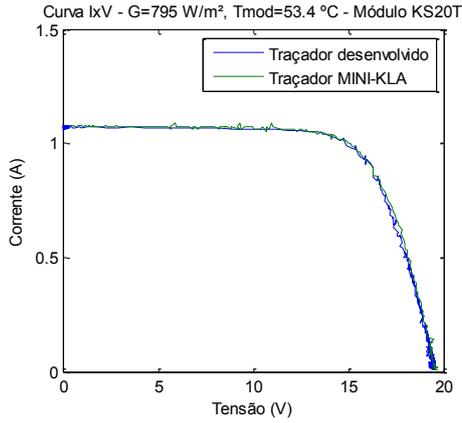
VALENTE, M. A. S. **Caracterização Automática de um Pannel Fotovoltaico**. Dissertação de mestrado apresentada ao Departamento de Engenharia Eletrotecnica da Universidade Nova de Lisboa, 2011.

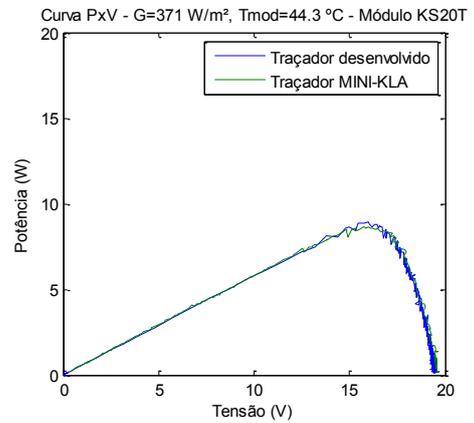
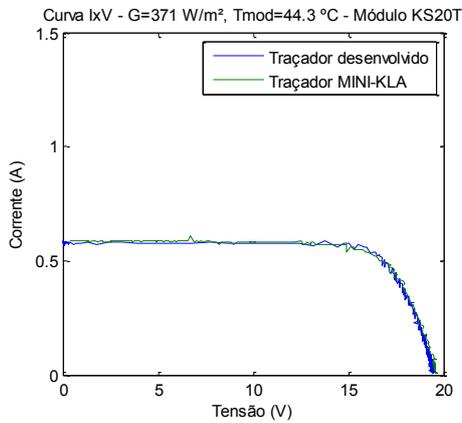
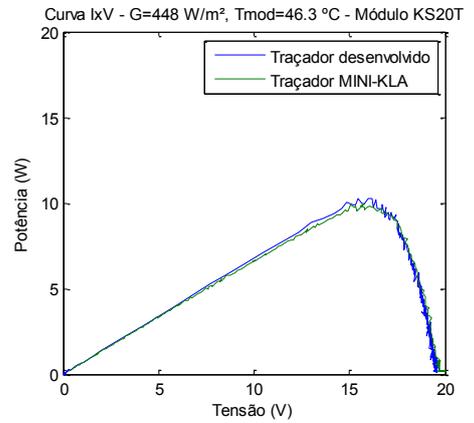
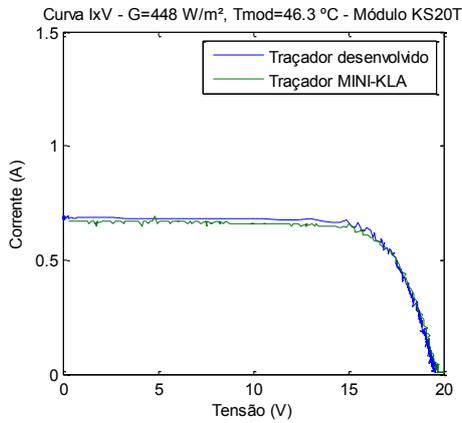
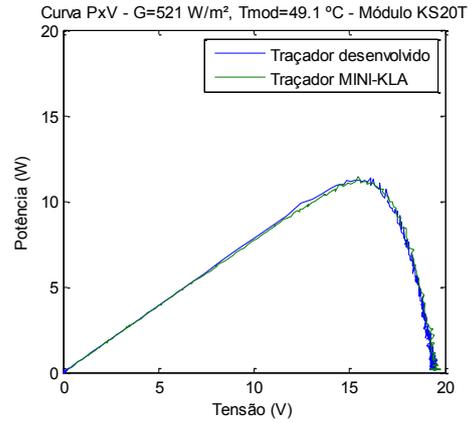
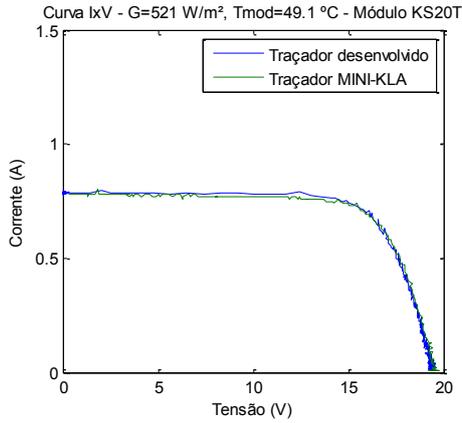
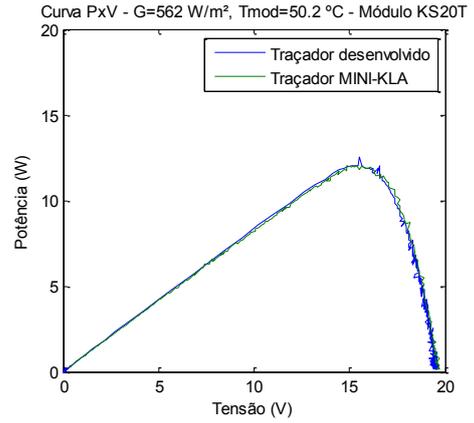
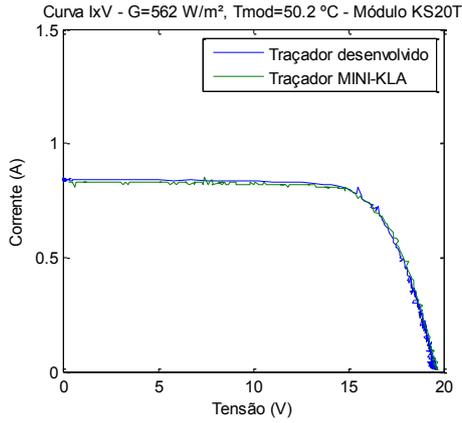
VAN DYK, E. E.; MEYER, E. L. **Analysis of the effect of parasitic resistances on the performance of photovoltaic modules**. Renewable Energy, v. 29, n. 3, p. 333–344, 2004.

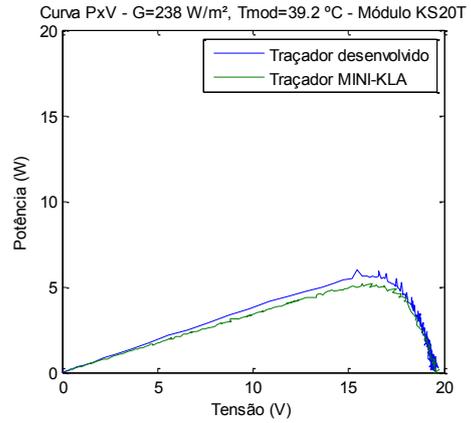
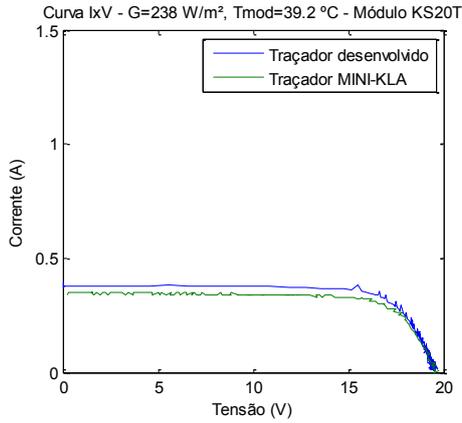
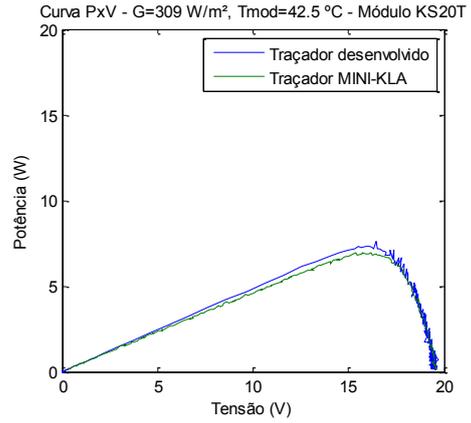
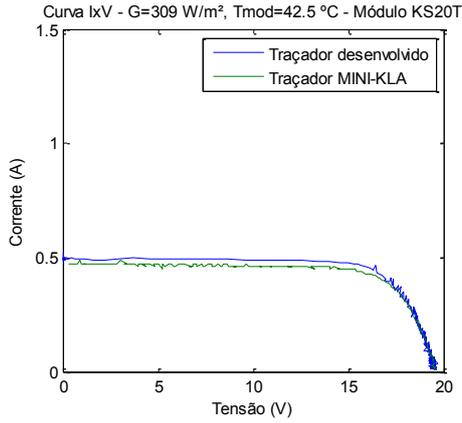
APÊNDICES

Apêndice 1: Comparação das curvas IxV e PxV medidas com os traçadores desenvolvido e comercial (MINI-KLA) para o módulo FV KS 20 T

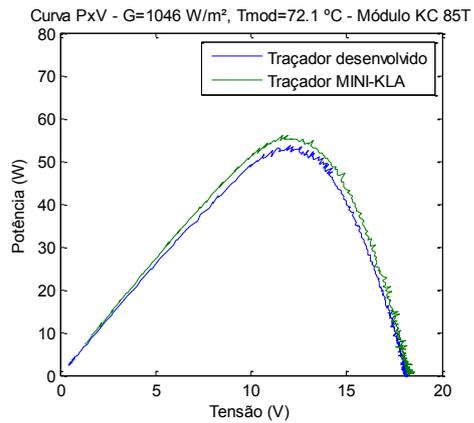
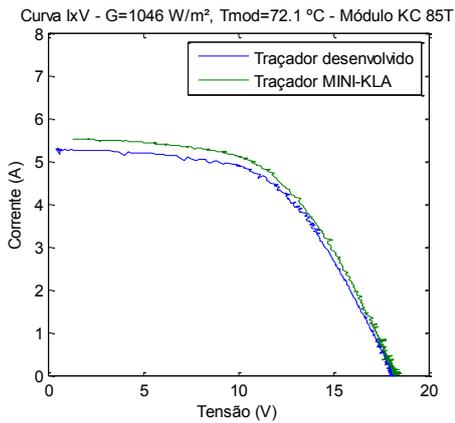


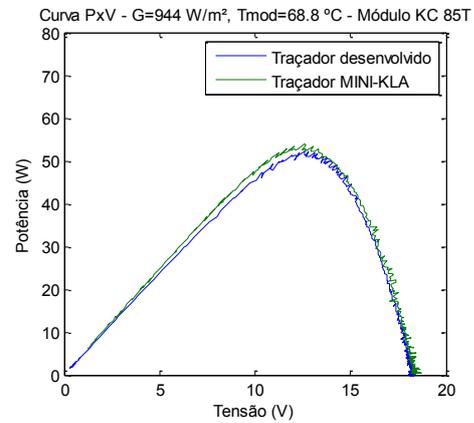
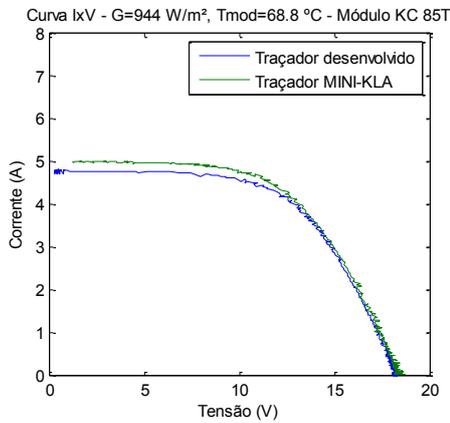
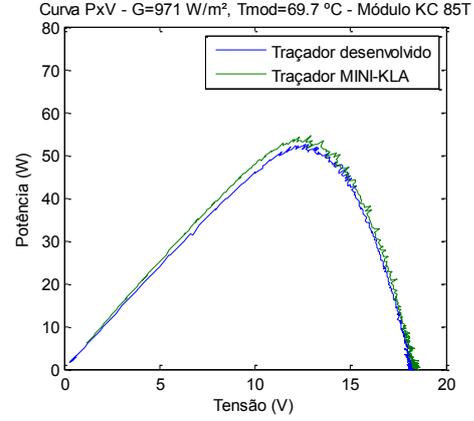
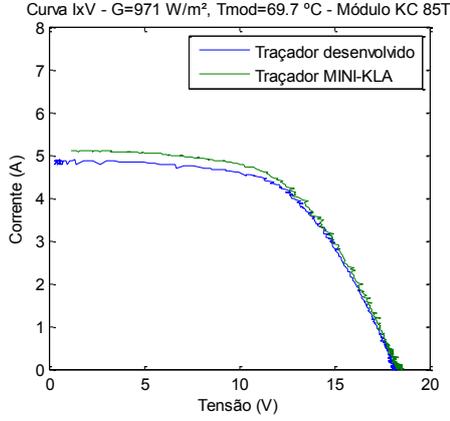
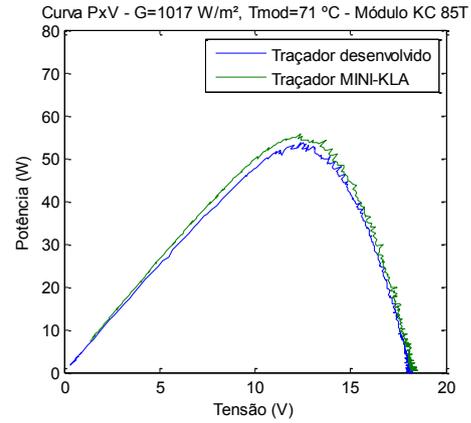
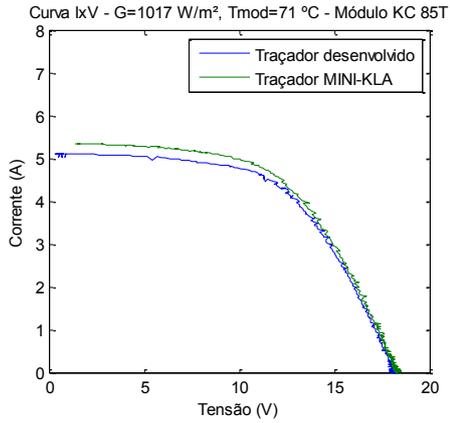
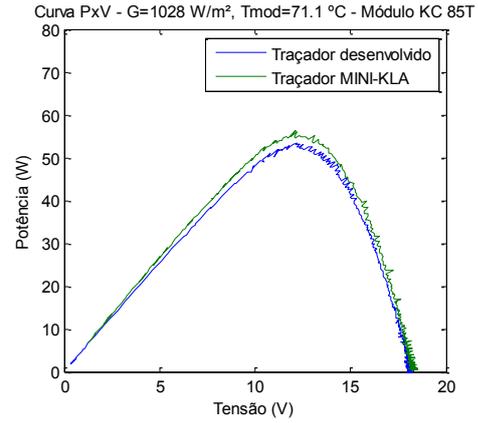
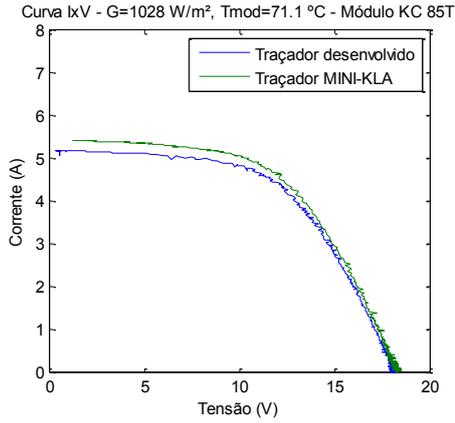


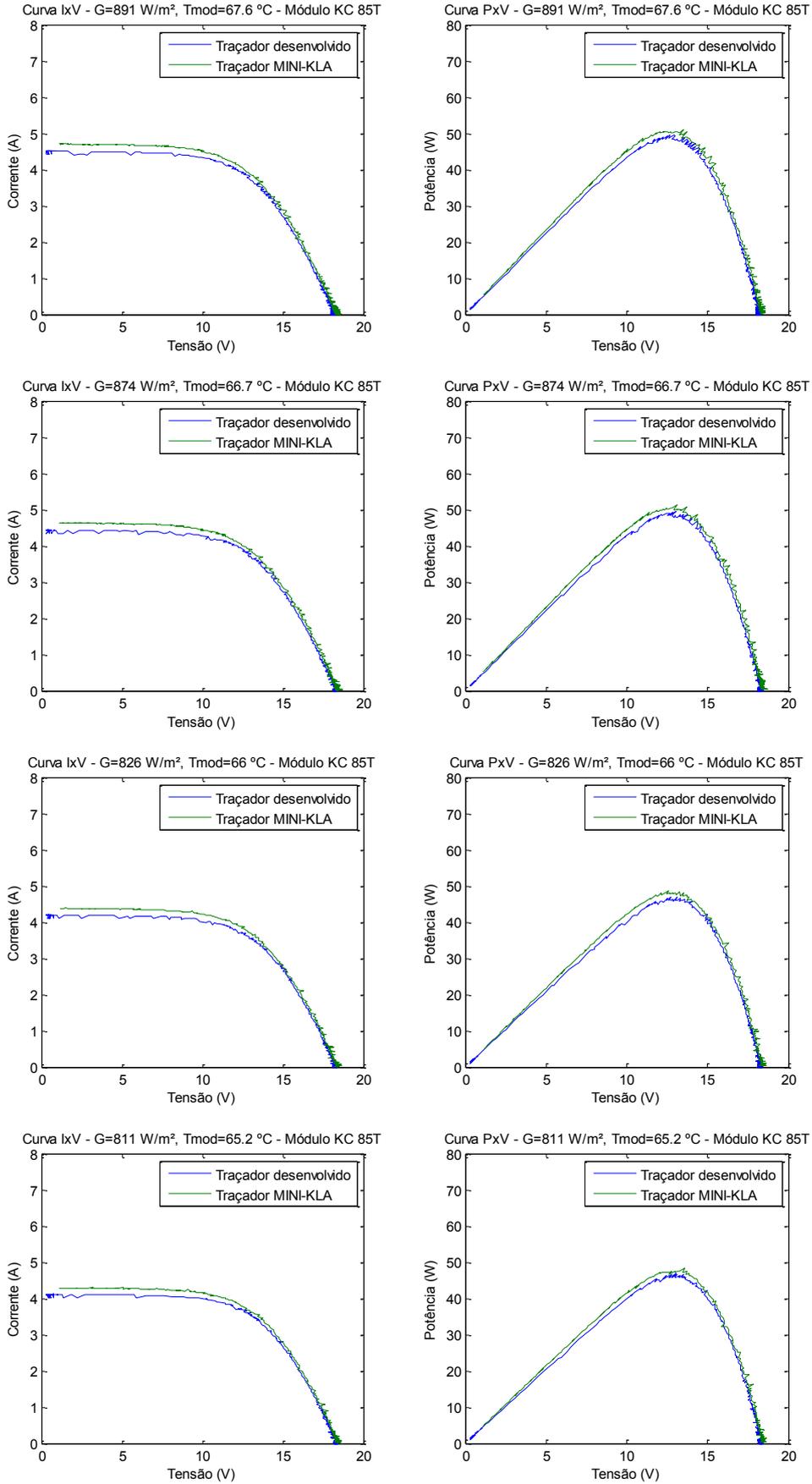


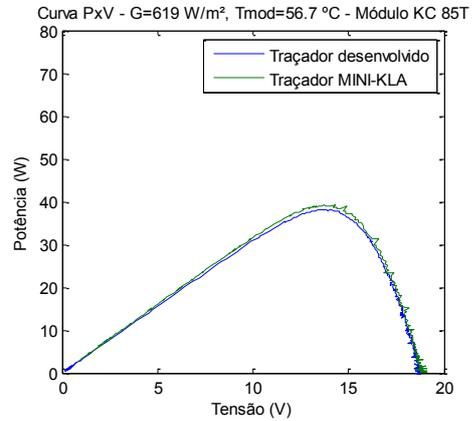
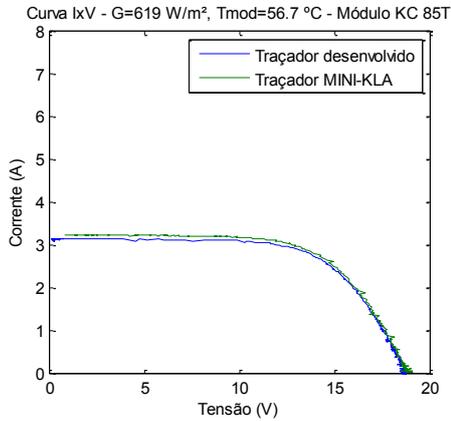
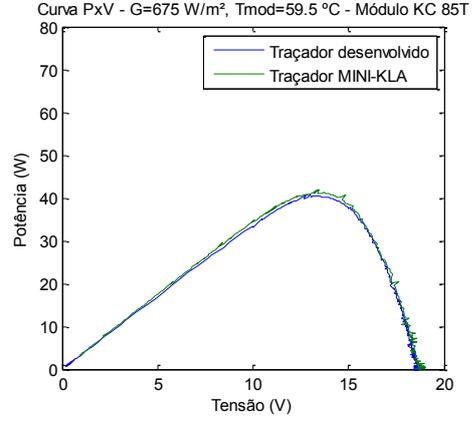
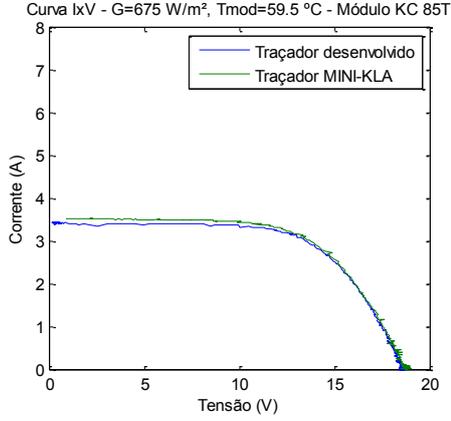
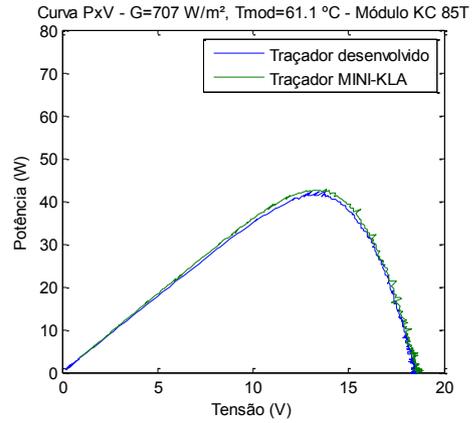
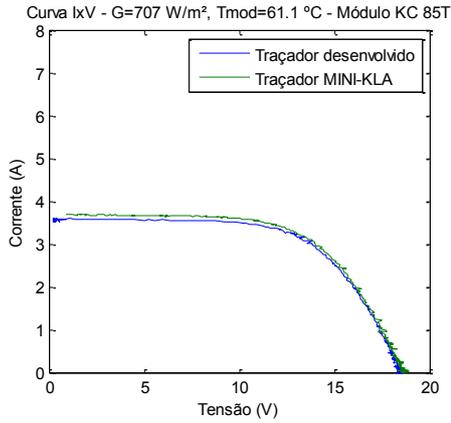
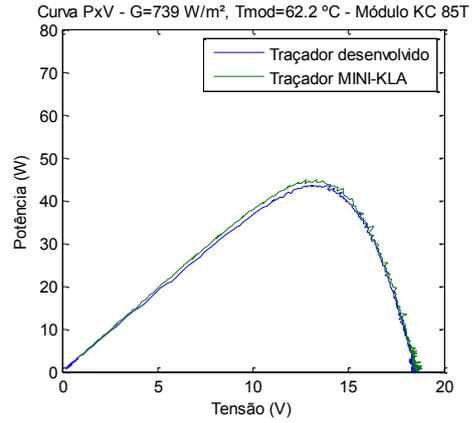
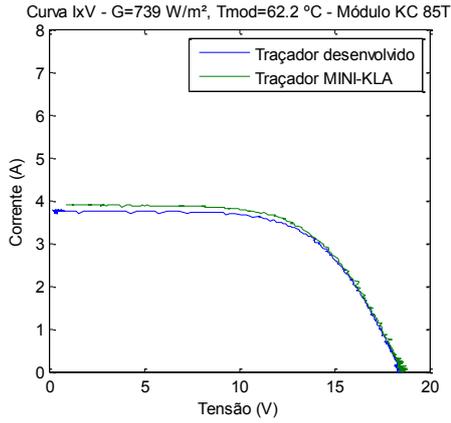


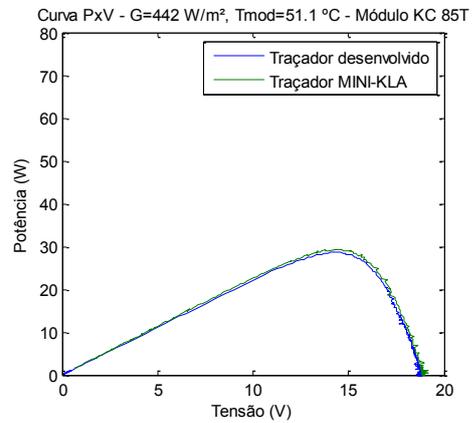
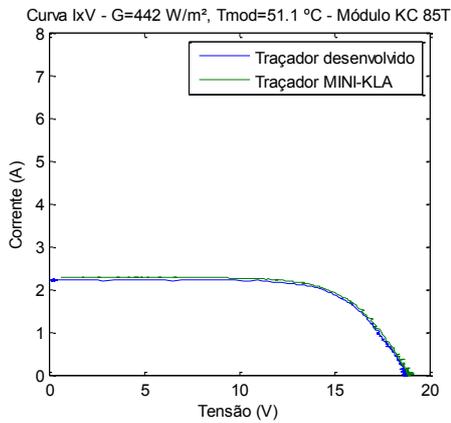
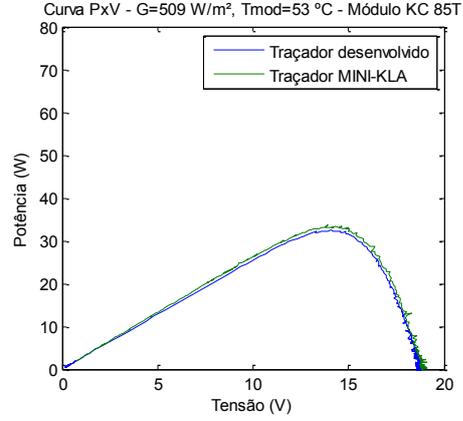
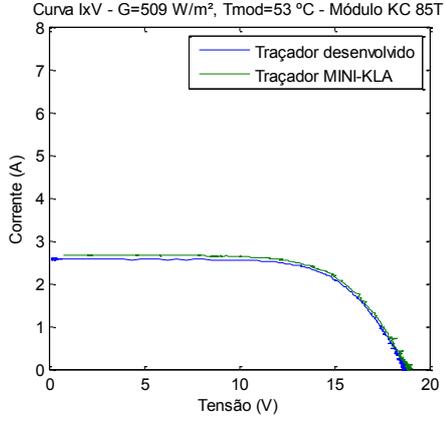
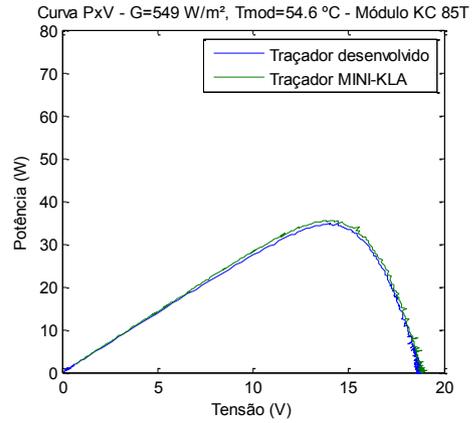
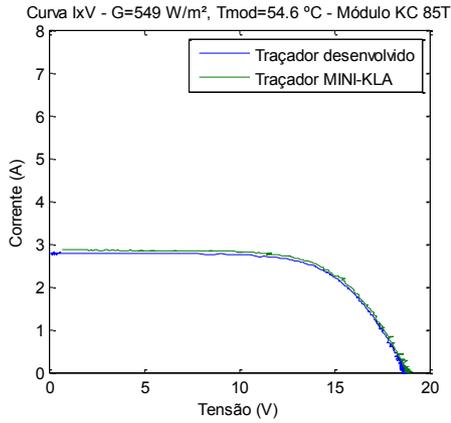
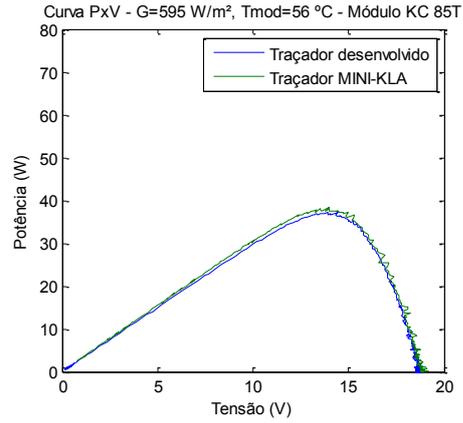
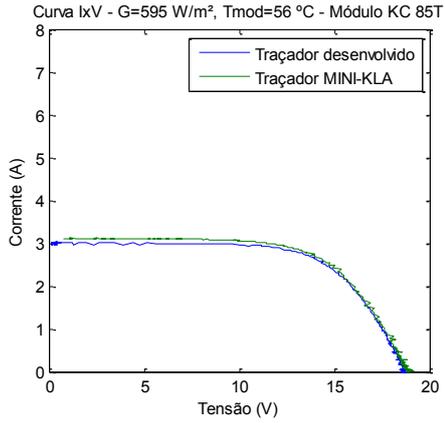
Apêndice 2: Comparação das curvas IxV e PxV medidas com os traçadores desenvolvido e comercial (MINI-KLA) para o módulo FV KC 85 T

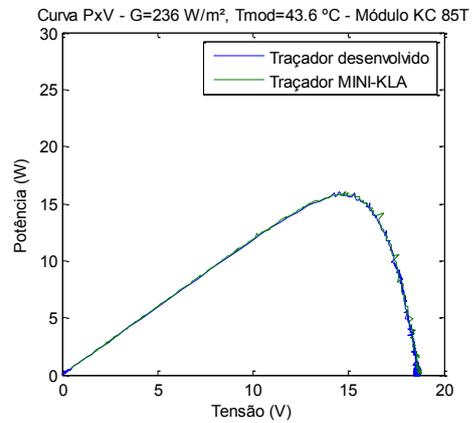
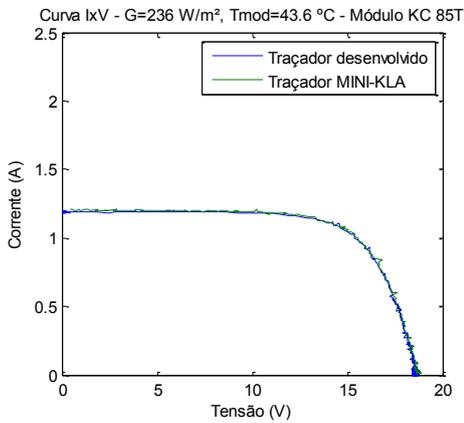
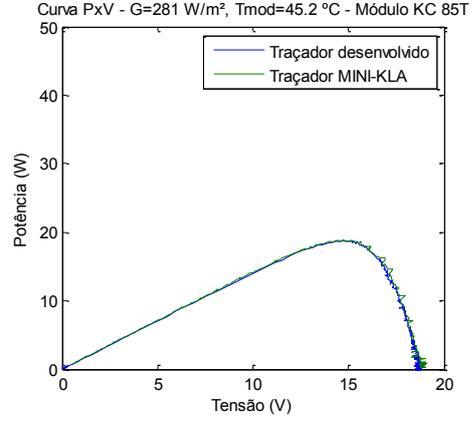
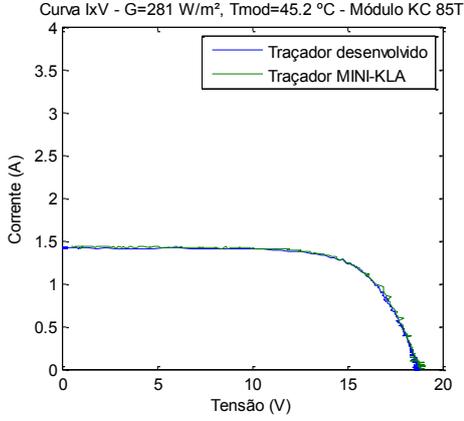
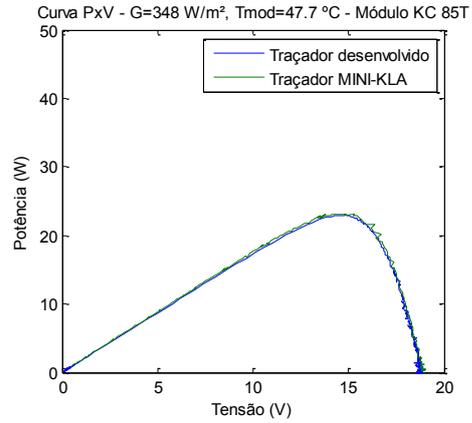
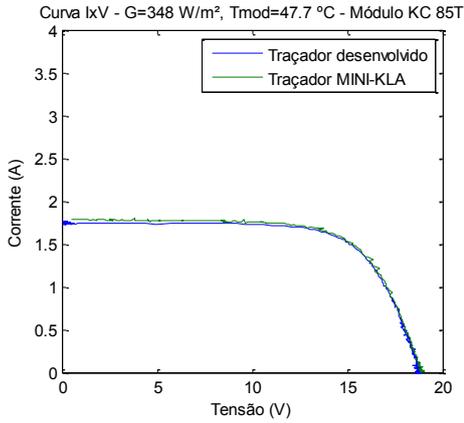
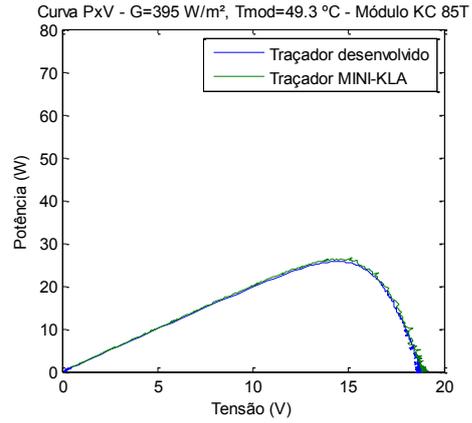
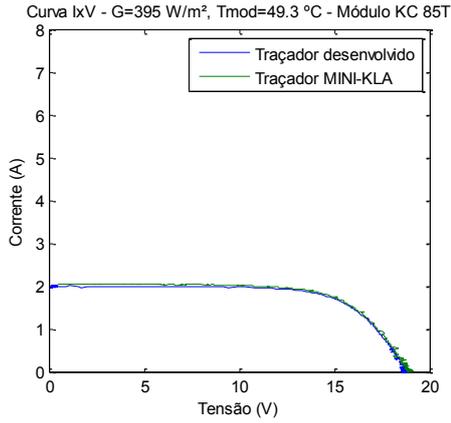


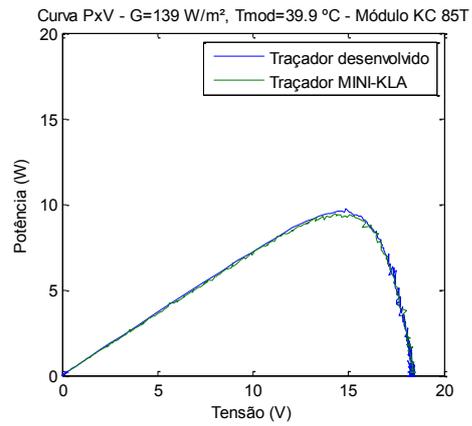
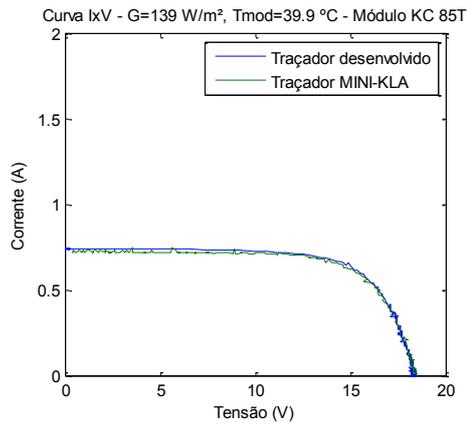
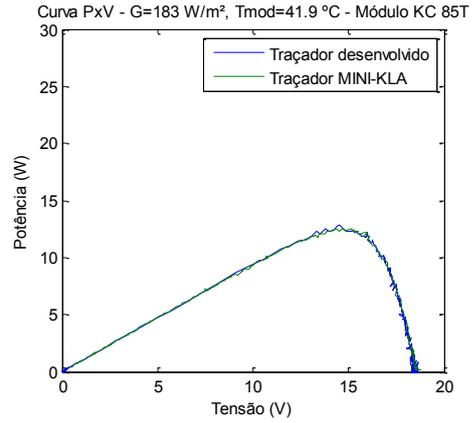
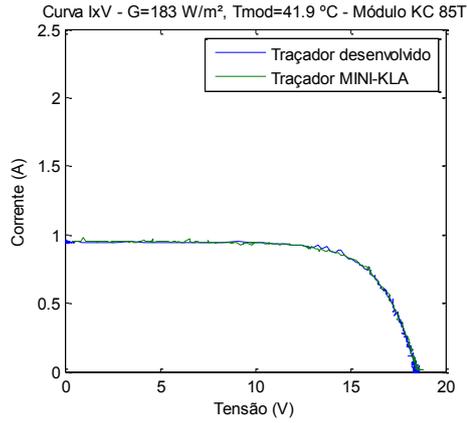




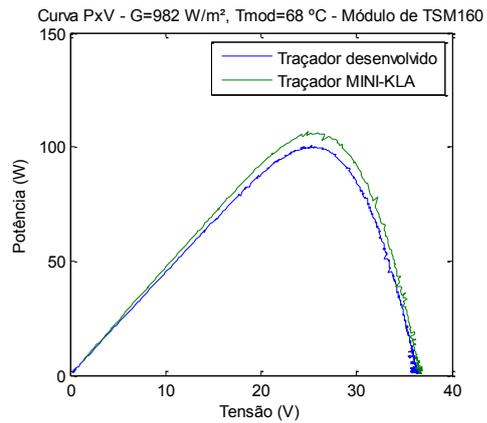
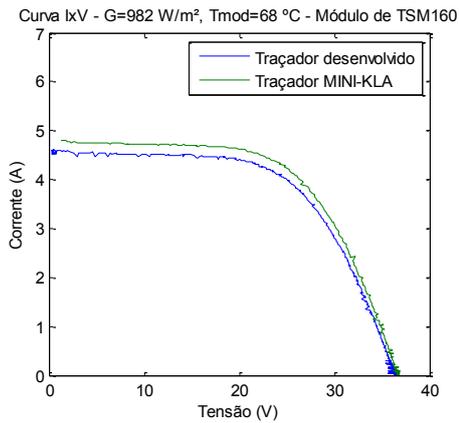




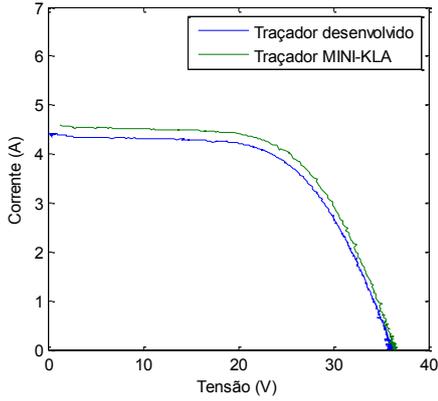




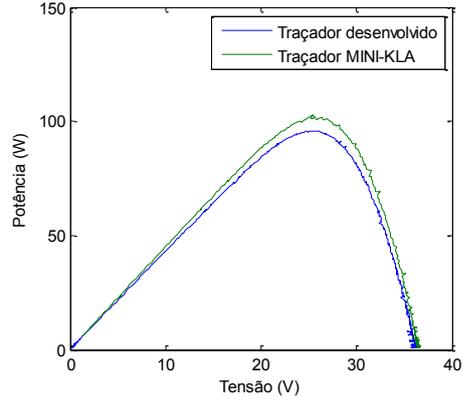
Apêndice 3: Comparação das curvas IxV e PxV medidas com os traçadores desenvolvido e comercial (MINI-KLA) para o módulo FV TSM 160



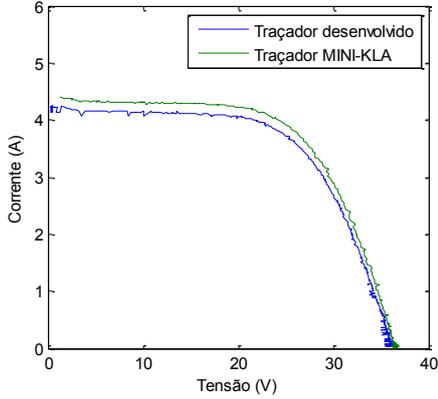
Curva IxV - G=932 W/m², Tmod=69.6 °C - Módulo de TSM160



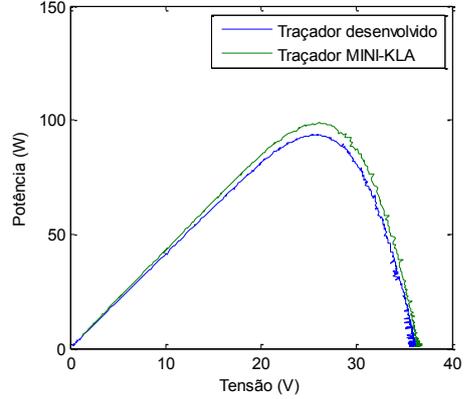
Curva PxV - G=932 W/m², Tmod=69.6 °C - Módulo de TSM160



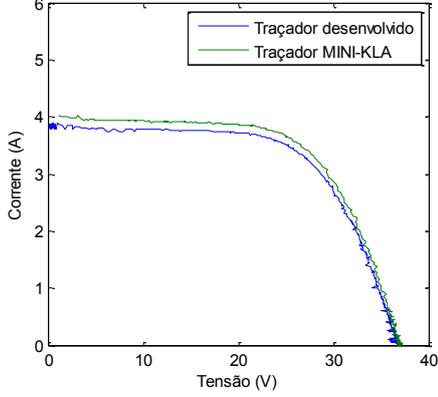
Curva IxV - G=884 W/m², Tmod=67.8 °C - Módulo de TSM160



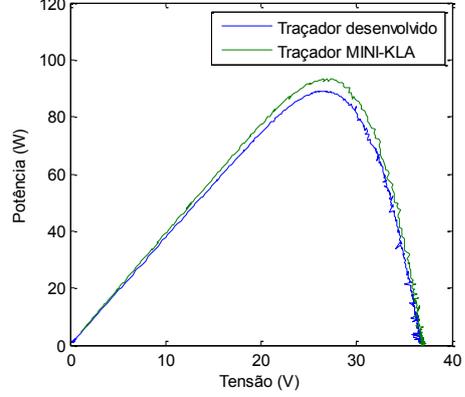
Curva PxV - G=884 W/m², Tmod=67.8 °C - Módulo de TSM160



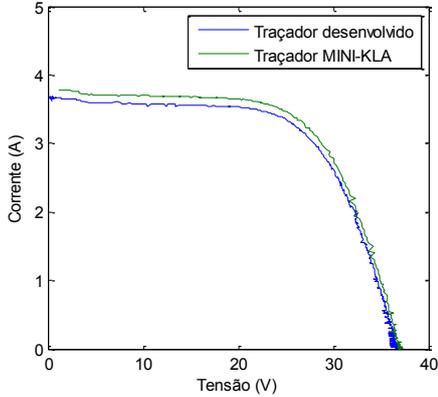
Curva IxV - G=812 W/m², Tmod=64.1 °C - Módulo de TSM160



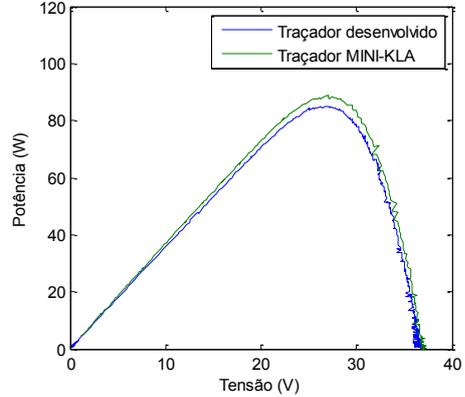
Curva PxV - G=812 W/m², Tmod=64.1 °C - Módulo de TSM160



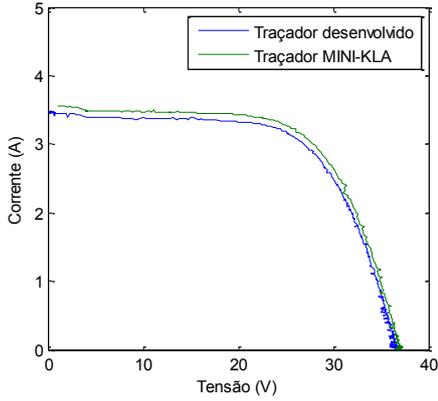
Curva IxV - G=770 W/m², Tmod=63.8 °C - Módulo de TSM160



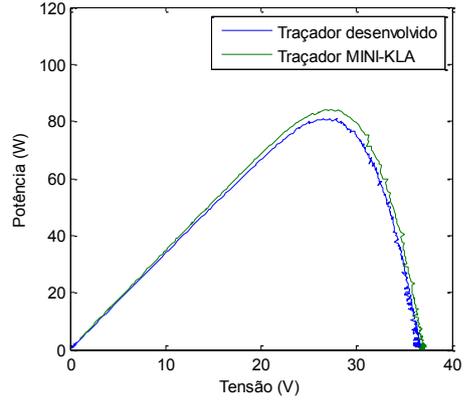
Curva PxV - G=770 W/m², Tmod=63.8 °C - Módulo de TSM160



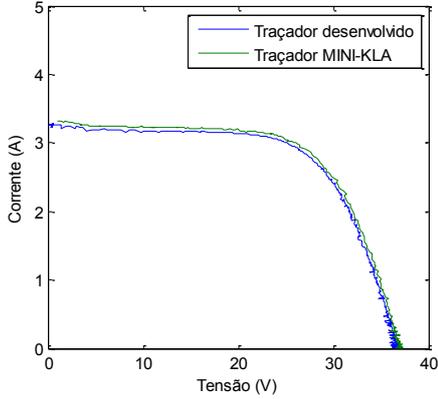
Curva IxV - G=725 W/m², Tmod=62.5 °C - Módulo de TSM160



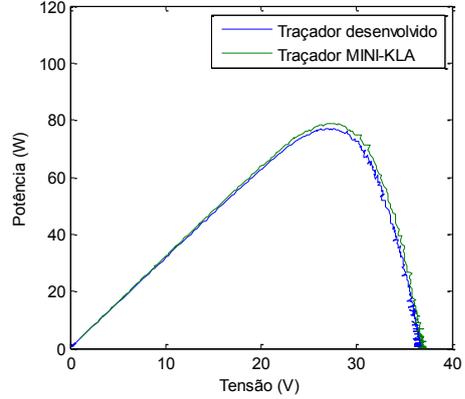
Curva PxV - G=725 W/m², Tmod=62.5 °C - Módulo de TSM160



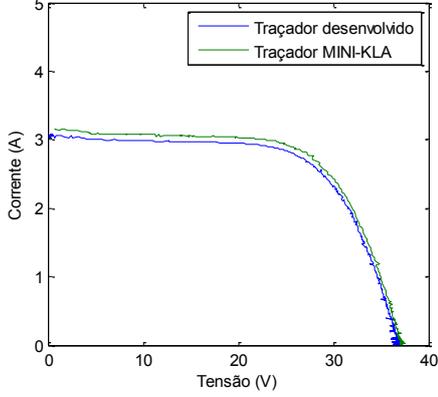
Curva IxV - G=681 W/m², Tmod=61.2 °C - Módulo de TSM160



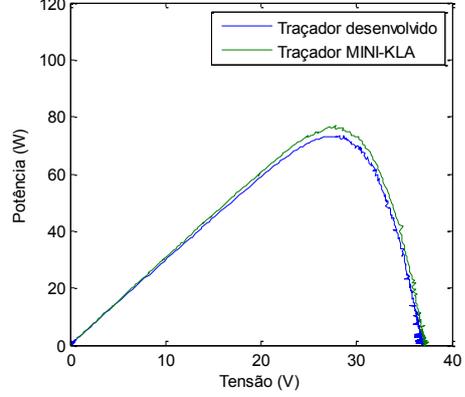
Curva PxV - G=681 W/m², Tmod=61.2 °C - Módulo de TSM160



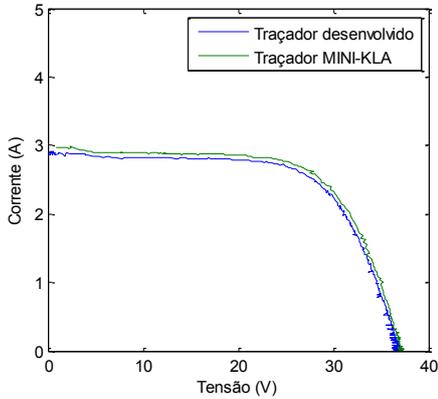
Curva IxV - G=639 W/m², Tmod=59.2 °C - Módulo de TSM160



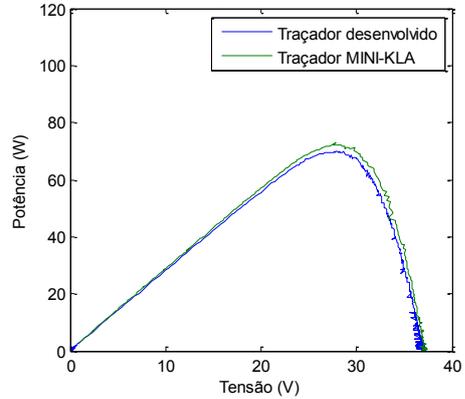
Curva PxV - G=639 W/m², Tmod=59.2 °C - Módulo de TSM160



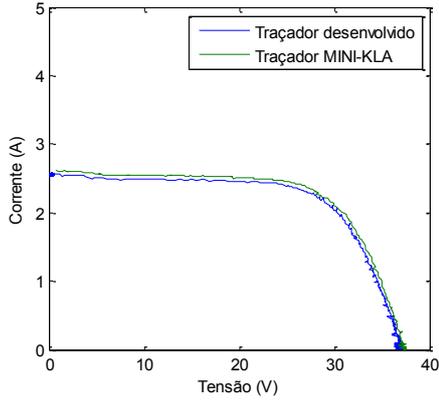
Curva IxV - G=601 W/m², Tmod=58.9 °C - Módulo de TSM160



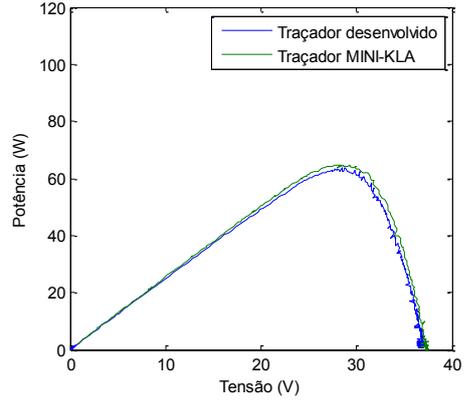
Curva PxV - G=601 W/m², Tmod=58.9 °C - Módulo de TSM160



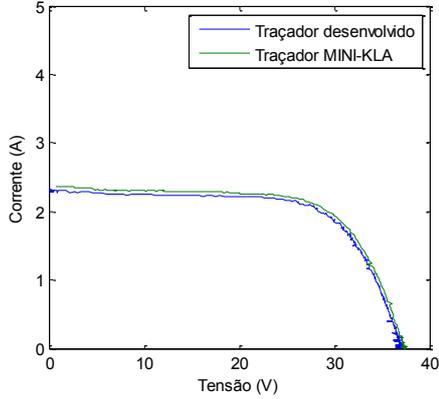
Curva IxV - G=532 W/m², Tmod=56 °C - Módulo de TSM160



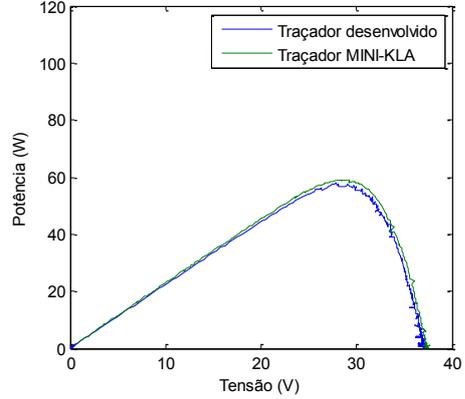
Curva PxV - G=532 W/m², Tmod=56 °C - Módulo de TSM160



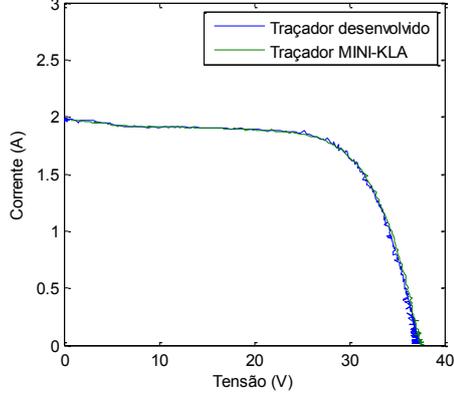
Curva IxV - G=476 W/m², Tmod=54.8 °C - Módulo de TSM160



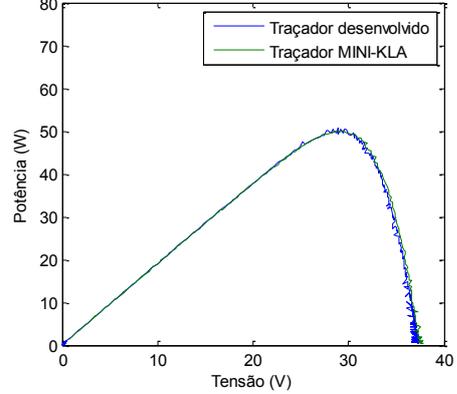
Curva PxV - G=476 W/m², Tmod=54.8 °C - Módulo de TSM160



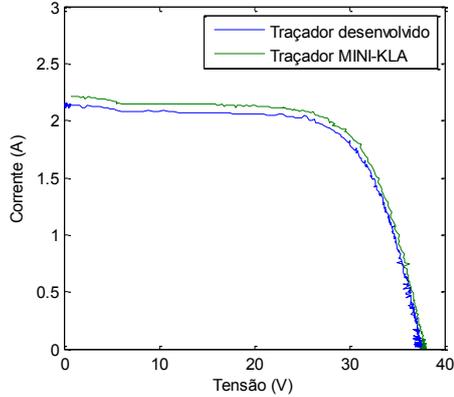
Curva IxV - G=401 W/m², Tmod=51.7 °C - Módulo de TSM160



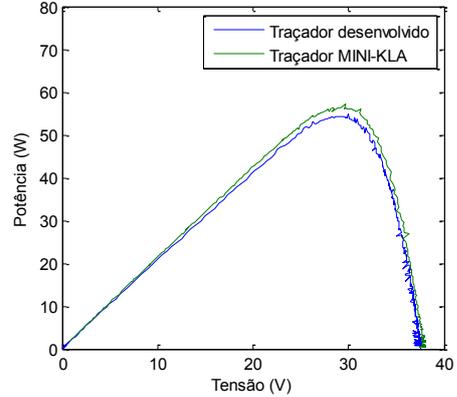
Curva PxV - G=401 W/m², Tmod=51.7 °C - Módulo de TSM160



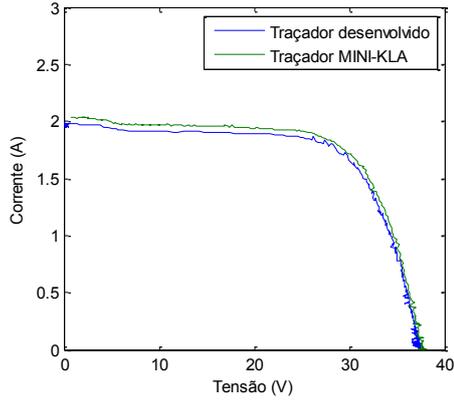
Curva IxV - G=444 W/m², Tmod=50.2 °C - Módulo de TSM160



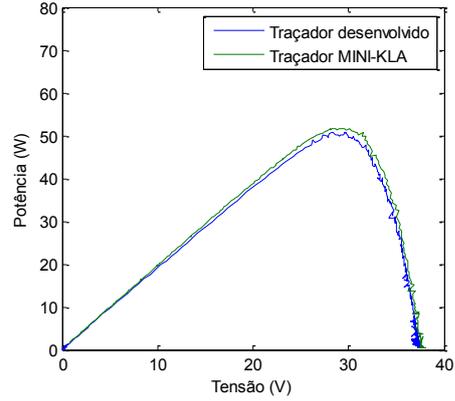
Curva PxV - G=444 W/m², Tmod=50.2 °C - Módulo de TSM160



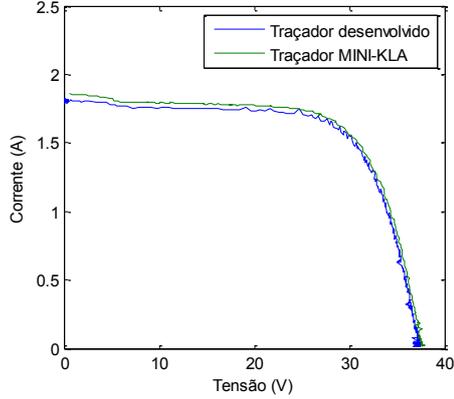
Curva IxV - G=405 W/m², Tmod=49.9 °C - Módulo de TSM160



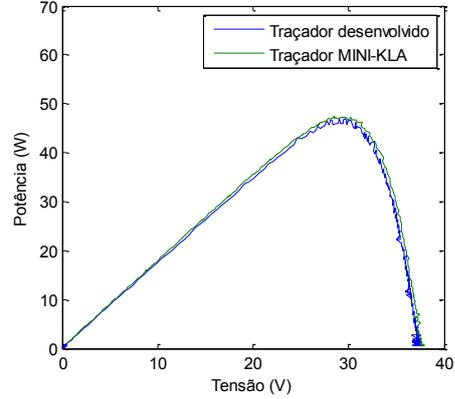
Curva PxV - G=405 W/m², Tmod=49.9 °C - Módulo de TSM160



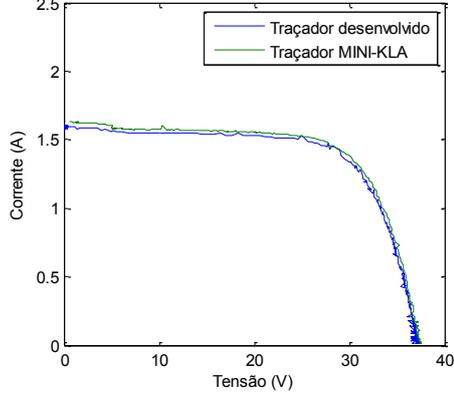
Curva IxV - G=371 W/m², Tmod=49.2 °C - Módulo de TSM160



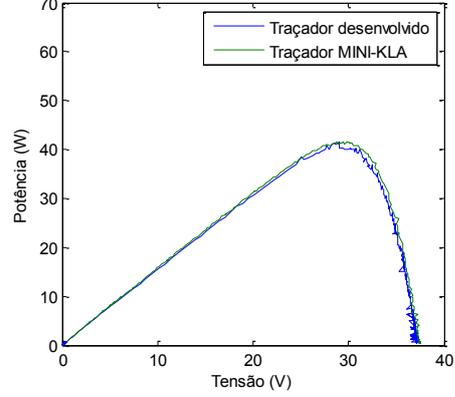
Curva PxV - G=371 W/m², Tmod=49.2 °C - Módulo de TSM160



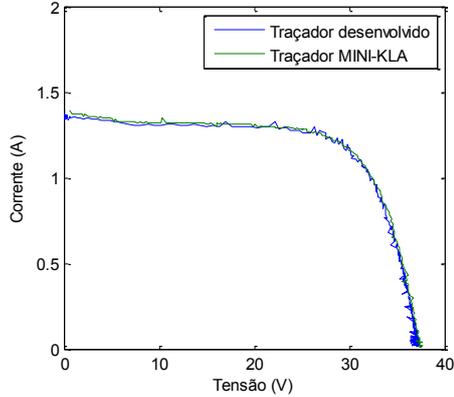
Curva IxV - G=321 W/m², Tmod=48.4 °C - Módulo de TSM160



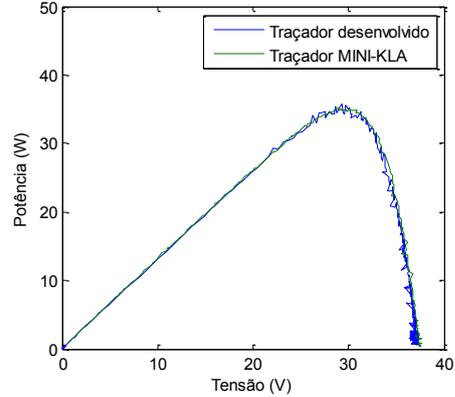
Curva PxV - G=321 W/m², Tmod=48.4 °C - Módulo de TSM160



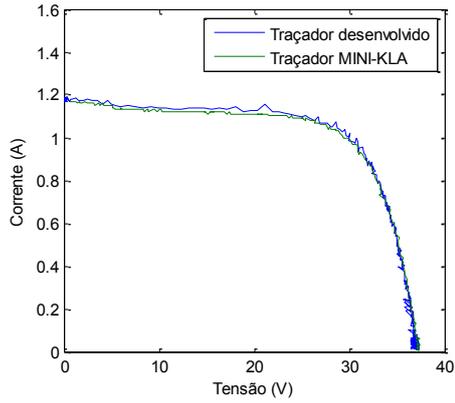
Curva IxV - G=269 W/m², Tmod=45.8 °C - Módulo de TSM160



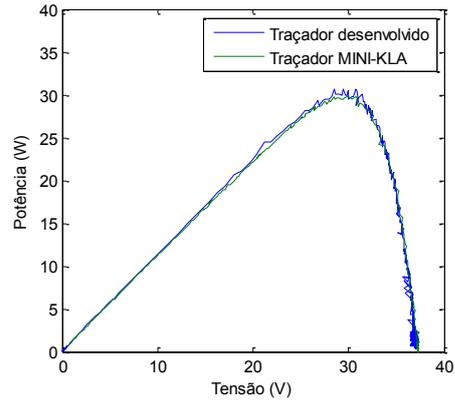
Curva PxV - G=269 W/m², Tmod=45.8 °C - Módulo de TSM160



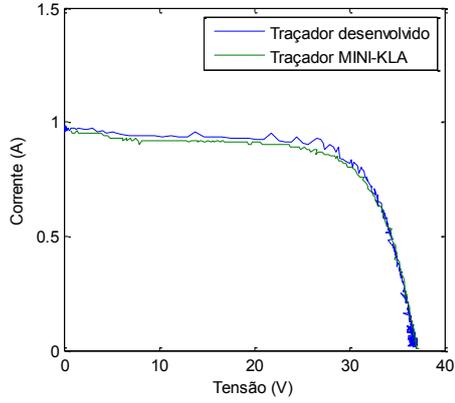
Curva IxV - G=226 W/m², Tmod=44.4 °C - Módulo de TSM160



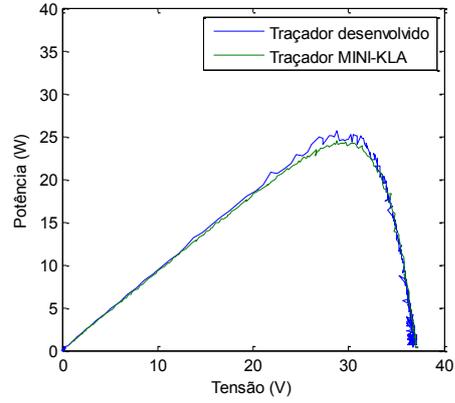
Curva PxV - G=226 W/m², Tmod=44.4 °C - Módulo de TSM160



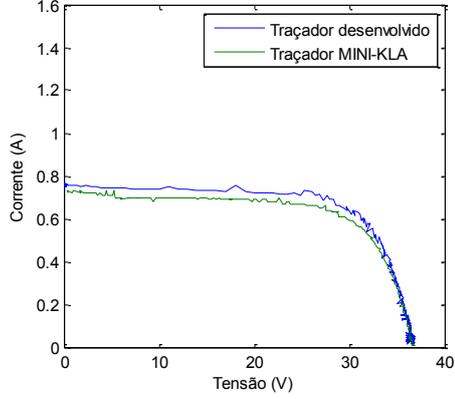
Curva IxV - G=178 W/m², Tmod=42.5 °C - Módulo de TSM160



Curva PxV - G=178 W/m², Tmod=42.5 °C - Módulo de TSM160



Curva IxV - G=126 W/m², Tmod=41 °C - Módulo de TSM160



Curva PxV - G=126 W/m², Tmod=41 °C - Módulo de TSM160

