

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

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

por

Fernando Schuck de Oliveira

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, abril de 2015

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

por

Fernando Schuck de Oliveira

Licenciado em Física

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger

Aprovada por:

Prof. Dr. Roberto Zilles, USP

Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli, UFSC

Prof^a Dr^a Adriane Prisco Petry, PROMEC-UFRGS

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 17 de abril de 2015

Para minha esposa Eliane Garcia

AGRADECIMENTOS

Agradeço, sobretudo, a Deus pelo dom da vida e por ter colocado as pessoas certas em meu caminho.

Ao professor Arno Krenzinger pela orientação desta dissertação, pelo exemplo de profissional e pela confiança em mim depositada, meu muito obrigado.

Ao César Prieb pela amizade e contribuições que conduziram este trabalho a conclusão, obrigado.

Agradeço minha mãe e meu irmão pelo incentivo.

Agradeço minha esposa Eliane pela paciência, incentivo e companheirismo.

Agradeço ao Fabiano Gasparin pela discussão sobre o tratamento estatístico de erros.

Agradeço ao Eng. Floriano Brenner pelas sugestões de elaboração do *layout* dos circuitos eletrônicos deste trabalho.

Agradeço ao Daniel Aguiar pelas dicas de programação.

Agradeço aos colegas de laboratório e de jornada científica: Tiago Manea, Camilo Hincapié, Juan Toro, Cristiano Ruschel, Luiz Piccoli, Rafael Torres, Eurides Costa, Marcelo Dalla Corte, Aryston Perin, Crissiane Ancines e Crisciele dos Santos.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo ensino de excelência.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e ao Laboratório de Energia Solar pela oportunidade de estudo.

Agradeço à CEEE pela bolsa de estudos.

Agradeço ao CNPq pelo apoio financeiro.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um traçador de curvas I-V para aplicação em arranjos fotovoltaicos a serem medidos em campo. Este sistema utiliza a carga capacitiva como método de polarização do gerador fotovoltaico sendo o chaveamento realizado por transistores bipolares de porta isolada (IGBT). Para controle do chaveamento dos IGBTs e aquisição dos pontos I-V, a placa Arduino foi aplicada demonstrando-se adequada para a proposta. Para tanto foi escrito, em uma variação da linguagem de programação C++, o programa de controle desta placa. Foram construídos circuitos auxiliares de amplificação de sinal para realizar as medidas de corrente e de irradiância, sendo nestes casos, usados como sensores um resistor shunt e uma célula de referência calibrada, respectivamente. Para medida da temperatura foi aplicado o sensor de temperatura LM35 que apresentou resultados satisfatórios. Os dados adquiridos pela placa Arduino são salvos em um cartão de memória para posterior análise. A análise de incertezas foi realizada usando métodos estatísticos, onde foram determinados os erros sistemáticos e aleatórios para cada canal de medição. O protótipo construído foi aplicado no levantamento da curva I-V de um gerador fotovoltaico composto de uma série de 3 módulos instalada no terraço do prédio que abriga o simulador solar do Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LABSOL) e o seu resultado foi comparado com o sistema traçador de curvas do laboratório. O resultado, de maneira geral, foi satisfatório quando comparado com a medida a 2 fios pelo sistema do LABSOL, mas apresentou um erro maior quando comparado à medida a 4 fios. Este protótipo também foi submetido a um teste para avaliar sua capacidade de apresentar a curva I-V de forma adequada quando são provocados defeitos na série de módulos. O resultado apresentado pelo protótipo se mostrou bastante semelhante ao do apresentado pelo sistema do LABSOL. De maneira geral, pode-se afirmar que o protótipo, baseado em seus resultados, mostrou-se adequado para aplicação em medidas em campo de curvas I-V de arranjos fotovoltaicos.

Palavras-chave: Energia Solar; Traçador de Curvas I-V; Arduino; Carga Capacitiva.

ABSTRACT

This work presents the development of an IV tracer for in field measurement of PV arrays. This system uses a capacitive load as a method for polarizing the photovoltaic generator, with the switching being performed by insulated gate bipolar transistors (IGBT). To control switching of the IGBTs and acquisition of the IV curve, an Arduino board was applied, and was proved to be adequate for this purpose. The Arduino board control program was written in a variation of C++ language. Auxiliary circuits for amplifying the signal were built to measure electric current and irradiance, being in such cases used as sensors a shunt resistor and a calibrated reference solar cell, respectively. For obtaining the temperature, the LM35 temperature sensor was employed, presenting satisfactory results. The data acquired by the Arduino board are saved on a memory stick for later analysis. The uncertainty analysis was performed by using statistical methods, in which the systematic and random errors for each measurement channel were determined. The assembled prototype was applied for measuring the IV curve of a photovoltaic generator composed of a string of 3 modules located on the roof of one of the buildings from Solar Energy Laboratory of the Federal University of Rio Grande do Sul (LABSOL) and its result was compared with the IV tracer used on the laboratory. The result was, generally, satisfactory when compared with the two-wire measurement by the laboratory's system, but showed a larger error when compared with the four-wire measurement. This prototype was also submitted to a test to evaluate its capacity of adequately presenting the IV curve when defects are induced on the string. The result presented by the prototype was quite similar to that obtained from LABSOL's system. In general, it is possible to affirm that the prototype, based on its results, proved to be adequate for in field measurement of photovoltaic arrays.

Keywords: Solar Energy; IV Curve Tracer; Arduino, Capacitive Load.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativa.....	3
1.2 Objetivo Geral	3
1.3 Objetivos Específicos	4
1.4 Escopo da Dissertação	4
2 TECNOLOGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	5
2.1 Efeito Fotovoltaico	5
2.2 Célula Solar Fotovoltaica	6
2.3 Módulo Fotovoltaico	7
2.4 Circuito Equivalente.....	9
2.5 Curva Característica	10
2.6 Efeito da Irradiância sobre a Curva Característica.....	12
2.7 Efeito da Temperatura sobre a Curva Característica.....	13
2.8 Efeito das Resistências Série e Paralela	14
2.9 Arranjo Fotovoltaico	15
3 SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS.....	19
4 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO	26
4.1 Sistema Lógico Programável.....	26
4.2 Sistema de Potência.....	27
4.3 Sistema de Medição.....	34
4.4 Funcionamento do Sistema	37
5 RESULTADOS	40
5.1 Determinação dos Erros Sistemáticos e Aleatórios.....	40

5.1.1 Determinação dos Erros para Tensão.....	41
5.1.2 Determinação dos Erros para Corrente	42
5.1.3 Determinação dos Erros para Temperatura.....	43
5.1.4 Determinação dos Erros para Irradiância.....	43
5.2 Comparação de Resultados na Curva Característica e na Potência.....	45
5.3 Comparação de Resultados na Correção da Curva para uma Condição de Referência	51
5.4 Comparação de Curvas com Anomalias.....	52
6 CONCLUSÕES.....	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Resumo da potência (MW) contratada por estado.	3
Figura 2.1 – Representação esquemática da junção PN.	6
Figura 2.2 – Representação esquemática de uma célula de silício com base P.	7
Figura 2.3 – Representação esquemática dos componentes de um módulo fotovoltaico.	8
Figura 2.4 – Módulo de silício monocristalino.	8
Figura 2.5 – Caixa de conexões elétricas de um módulo fotovoltaico, onde pode ser visto, em detalhe, um dos diodos de <i>bypass</i>	9
Figura 2.6 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica: modelo de um diodo.	9
Figura 2.7 – Curva característica e curva de potência de um módulo.	11
Figura 2.8 – Curva característica de um módulo sob diferentes condições de irradiância e temperatura constante.	12
Figura 2.9 – Variação da corrente de curto-circuito e da tensão de circuito aberto em função da variação da temperatura sob irradiância constante em um módulo.	13
Figura 2.10 – Variação da potência em função da variação da temperatura em um módulo.	14
Figura 2.11 – Influência da resistência série na curva característica de um módulo.	15
Figura 2.12 – Influência da resistência paralela na curva característica de um módulo.	15
Figura 2.13 – Célula, módulo, série e arranjo fotovoltaico.	16
Figura 2.14 – Curva característica para 1 módulo, 2 módulos idênticos em série e 3 módulos idênticos em série.	16
Figura 2.15 – Curvas características para 1 módulo, 2 módulos idênticos em paralelo e 3 módulos idênticos em paralelo.	17
Figura 2.16 – Arranjo fotovoltaico exibindo diodos de <i>bypass</i> e de bloqueio.	18
Figura 3.1 – Esquema de caracterização de células proposto Abete e Ferraro, 1990.	19
Figura 3.2 – (a) Resistor variável utilizado na medida da curva e (b) curva medida.	20
Figura 3.3 – Circuito proposto para um traçador de curvas baseado em carga capacitiva.	21
Figura 3.4 - Diagrama simplificado da carga eletrônica proposta por Kuai e Yuvarajan, 2006.	21
Figura 3.5 - Sistema de medida da curva característica proposto por Prieb, 2002.	22
Figura 3.6 - Carga capacitiva construída no IEE/USP.	23
Figura 3.7 – Traçador de curvas DS-1000.	24

Figura 3.8 – Traçador de curvas PVPM1000C100.....	25
Figura 3.9 – Traçador de curvas MP-11.....	25
Figura 4.1 – Placa Arduino Due.....	26
Figura 4.2 – Ambiente de desenvolvimento da placa Arduino.....	27
Figura 4.3 – Capacitor conectado a uma fonte de corrente.....	28
Figura 4.4 – Comportamento da tensão em função do tempo de um capacitor conectado a uma fonte de corrente.....	29
Figura 4.5 – Comportamento da corrente em função da tensão.....	29
Figura 4.6 – Curva I-V de um arranjo com três séries de módulos em paralelo.....	30
Figura 4.7 – Diagrama esquemático do circuito de potência.....	30
Figura 4.8 – Corrente e tensão em função do tempo de varredura.....	31
Figura 4.9 – (a) Associação dos capacitores instalados na caixa que abriga o protótipo traçador de curvas e (b) diagrama esquemático da mesma associação.....	32
Figura 4.10 – Circuito de acionamento dos IGBTs.....	33
Figura 4.11 – Placa do circuito de acionamento.....	33
Figura 4.12 – Divisor de tensão resistivo para atenuar a tensão de entrada.....	34
Figura 4.13 – Circuito de amplificação para medida da corrente do arranjo. Os pontos A e C são conectados aos pontos A e C do circuito da Figura 4.7.....	35
Figura 4.14 – Amplificadores para auxiliar na medida da corrente do gerador fotovoltaico e da irradiância.....	36
Figura 4.15 – Sensor de temperatura LM35 encapsulado com resina epóxi.....	37
Figura 4.16 – Painel de controle do protótipo.....	38
Figura 5.1 – Instalação da série de módulos usada para testes (3 módulos da fileira inferior).....	46
Figura 5.2 – Bornes de conexão.....	46
Figura 5.3 – Sistema de medição de curvas características de módulos fotovoltaicos utilizado no LABSOL.....	47
Figura 5.4 – Exemplo de uma <i>String Box</i>	48
Figura 5.5 – Esquema de conexão do traçador de curvas MP-11 para medição da curva I-V de um arranjo fotovoltaico.....	48
Figura 5.6 – Curvas I-V medidas com o PROTÓTIPO, o sistema do LABSOL a 2 fios e a 4 fios sob as mesmas condições de temperatura, irradiância e espectro solar.....	49
Figura 5.7 – Curvas P-V obtidas com o PROTÓTIPO, o sistema do LABSOL a 2 fios e a 4	

fios sob as mesma condições de temperatura, irradiância e espectro solar.....	50
Figura 5.8 – Curvas medidas quando causado sombreamento nas células dos módulos que compõem a série.....	52
Figura 5.9 – Curva medida com o protótipo quando causado sombreamento nas células dos módulos que compõem a série.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Algumas características da placa Arduino Due.....	26
Tabela 4.2 – Lógica de chaveamento dos IGBTs.....	34
Tabela 4.3 – Valores medidos para os resistores RG.....	37
Tabela 4.4 – Descrição das funções dos menus.....	38
Tabela 5.1 – Resumo dos dados estatísticos para a tensão.....	41
Tabela 5.2 – Resumo dos dados estatísticos para a corrente.....	42
Tabela 5.3 – Resumo dos dados estatísticos para a temperatura.....	43
Tabela 5.4 – Resumo dos dados estatísticos para o canal de medição do canal da irradiância.	44
Tabela 5.5 – Parâmetros elétricos informados pelo fabricante do módulo YL245P-29b.....	45
Tabela 5.6 – Comparação entre as características elétricas da série de módulos levantadas com o sistema do LABSOL a 2 fios e o protótipo nas condições de $G=815 \text{ W/m}^2$, $T_{\text{Cel}}=58,9$ $^{\circ}\text{C}$ e AM 1,5.....	50
Tabela 5.7 – Comparação entre as características elétricas da série de módulos levantadas com o sistema do LABSOL a 4 fios e o protótipo nas condições de $G=815 \text{ W/m}^2$, $T_{\text{Cel}}=58,9$ $^{\circ}\text{C}$ e AM 1,5.....	51

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CdTe	Telureto de Cádmio
CuInSe ₂	Disseleneto de Cobre-Índio
ELETROBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
GaAs	Arseneto de Gálio
IDE	<i>(Integrated Development Environment)</i> Ambiente Integrado de Desenvolvimento
IEE	Instituto de Energia e Ambiente
IGBT	<i>(Insulated Gate Bipolar Transistor)</i> Transistor Bipolar de Porta Isolada
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
LABSOL	Laboratório de Energia Solar da UFRGS
LCD	<i>(Liquid Crystal Display)</i> Display de Cristal Líquido
LER	Leilão de Energia de Reserva
MME	Ministério de Minas e Energia
MOSFET	<i>(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)</i> Transistor de Efeito de Campo de Semicondutor de Óxido Metálico
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SIN	Sistema Interligado Nacional
TRENSURB	Empresa de Trens Urbanos de Porto Alegre
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UHE	Usina Hidrelétrica
USP	Universidade Estadual de São Paulo
UTE	Usina Termoelétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{\text{módulo}}$	Área do módulo fotovoltaico	$[\text{m}^2]$
C	Capacitância	$[\text{F}]$
C_G	Correção do canal de medição da irradiância	$[\text{V}]$
C_I	Correção da corrente	$[\text{A}]$
C_T	Correção da temperatura	$[\text{°C}]$
C_V	Correção da tensão	$[\text{V}]$
e	Carga elementar	$[\text{C}]$
$E_{\text{máx}}$	Incerteza elétrica absoluta do canal de medição da irradiância	$[\text{V}]$
FF	Fator de forma	$[-]$
G	Irradiância	$[\text{W}/\text{m}^2]$
G_A	Ganho do amplificador de instrumentação	$[-]$
I	Corrente elétrica	$[\text{A}]$
I_C	Corrente de coletor para o IGBT	$[\text{A}]$
I_D	Corrente através do diodo	$[\text{A}]$
I_L	Corrente fotogerada	$[\text{A}]$
I_M	Corrente de máxima potência	$[\text{A}]$
I_{medido}	Corrente medida pelo traçador de curvas	$[\text{A}]$
$I_{\text{médio}}$	Valor médio da corrente	$[\text{A}]$
I_O	Corrente de saturação reversa	$[\text{A}]$
I_P	Corrente de fuga pela resistência paralela	$[\text{A}]$
I_{SC}	Corrente de curto circuito	$[\text{A}]$
I_{VC}	Valor verdadeiro convencional da corrente	$[\text{A}]$
k_B	Constante de Boltzman	$[\text{J}/\text{K}]$
m	Fator de idealidade	$[-]$
N_S	Número de células associada em série	$[-]$
P_M	Ponto de máxima potência	$[\text{W}]$
R_1, R_2	Resistores que formam o divisor de tensão para medida da tensão do arranjo	$[\Omega]$
R_D	Resistor de descarga do capacitor	$[\Omega]$
R_G	Resistor de ganho do amplificador de instrumentação	$[\Omega]$
R_P	Resistência em paralelo	$[\Omega]$

R_S	Resistência em série	[Ω]
t	Tempo	[s]
t_s	Coeficiente de student	[-]
T_{Cel}	Temperatura da célula	[$^{\circ}C$, K]
T_D	Temperatura do diodo	[$^{\circ}C$, K]
Td_G	Tendência do canal de medição da irradiância	[V]
Td_I	Tendência da corrente	[A]
Td_T	Tendência da temperatura	[$^{\circ}C$]
Td_V	Tendência da tensão	[V]
T_{medido}	Temperatura medida	[$^{\circ}C$]
$T_{médio}$	Valor médio da temperatura	[$^{\circ}C$]
T_{VC}	Valor verdadeiro convencional da temperatura	[$^{\circ}C$]
u	Desvio-padrão experimental	[-]
U	Incerteza expandida	[-]
u_G	Incerteza-padrão do canal de medição da irradiância	[V]
U_G	Incerteza expandida do canal de medição da irradiância	[V]
u_I	Incerteza-padrão da corrente	[A]
U_I	Incerteza expandida da corrente	[A]
u_T	Incerteza-padrão da temperatura	[$^{\circ}C$]
U_T	Incerteza expandida da temperatura	[$^{\circ}C$]
u_V	Incerteza-padrão da tensão	[V]
U_V	Incerteza expandida da tensão	[V]
V	Tensão elétrica	[V]
V_{CE}	Tensão coletor-emissor para o IGBT	[V]
V_M	Tensão de máxima potência	[V]
V_{medido}	Tensão medida pelo traçador de curvas	[V]
$V_{médio}$	Valor médio da tensão	[V]
$V_{médio, G}$	Valor médio da tensão no canal de medição da irradiância	[V]
V_{OC}	Tensão de circuito aberto	[V]
V_{VC}	Valor verdadeiro convencional da tensão	[V]
$V_{VC, G}$	Valor verdadeiro convencional da tensão na entrada do canal de medição da irradiância	[V]

Caracteres Gregos

α	Coeficiente da variação da corrente de curto circuito com a temperatura	[A/°C]
β	Coeficiente da variação da tensão de circuito aberto com a temperatura	[V/°C]
η	Eficiência de conversão de um módulo fotovoltaico	[-]
σ	Desvio-padrão	[-]
ω_G	Incerteza para medida da irradiância	[W/m ²]

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica desempenha um papel de grande relevância na vida das pessoas. Hoje seria impossível pensar em um mundo sem as facilidades e confortos proporcionados por essa fonte de energia. A qualidade de vida promovida pelo uso da energia elétrica vai desde o mais básico como a iluminação dos ambientes, passa pela conservação dos alimentos e o conforto térmico e chega até as mais variadas formas de entretenimento.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), o consumo de energia elétrica no país em 2014 cresceu 2,2 % em comparação com 2013, na classe comercial o crescimento foi de 7,3 % e na residencial 5,7 %, entretanto o consumo industrial recuou 3,6 % (EPE, 2014). No final de 2013 a EPE, publicou o “Plano Decenal de Expansão de Energia 2022”, trazendo a projeção sobre o crescimento da demanda de energia elétrica no país. De acordo com a publicação, a demanda, no período 2013-2022, crescerá, ao ano, 5,8 % na classe comercial, 4,3 % ao ano na classe residencial e na classe industrial esse crescimento será de 3,4 % ao ano, sendo desconsiderada a autoprodução (EPE, 2013).

Para atender a crescente demanda de energia é necessário ampliar a geração. No Brasil predominam as gerações hidrelétrica e termelétrica. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) dos mais de 130 GW de potência instalada no país, 63,11 % corresponde a usinas hidrelétricas (UHE) e 28,34 % a termelétricas (UTE). Com base nesses dados percebe-se que mais de 90% da energia gerada no país é atingida por essas duas fontes.

A produção de energia a partir de uma UHE está vinculada às condições climáticas, mais especificamente, aos ciclos de chuvas. Nos últimos dois anos o período prolongado de estiagem provocou a baixa dos reservatórios nas usinas hidrelétricas tornando compulsório o acionamento das usinas termelétricas, fonte mais poluente e com maior custo de operação (Neher, 2015). Aumentar a contribuição de outras fontes de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN) é um caminho para complementar a geração das UHEs e diminuir a atuação das UTEs.

Em 2004, através do Decreto Nº 5.025, o Governo Federal dispõe sobre o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA). Conforme descrito neste documento, o programa teve por objetivo aumentar a participação de empreendimentos de produção de energia elétrica no SIN baseados em fontes eólica, pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e biomassa. Na primeira etapa a meta era a instalação de 3,3 GW, igualmente distribuídos entre as três fontes (BRASIL, 2004). Atualmente, conforme

ELETROBRAS, 2015, existem 54 usinas eólicas, 27 térmicas a biomassa e 54 PCHs. Dessa forma, percebe-se através do PROINFA a preocupação do Governo Federal em diversificar a matriz energética brasileira. De acordo com dados da ANEEL, 2015, atualmente as usinas eólicas e as PCHs representam cerca de 8 % da capacidade instalada no SIN.

Tratando-se de energia solar fotovoltaica, um passo importante ocorreu em 2012, quando a ANEEL publicou a Resolução Normativa Nº 482 que estabelece as condições para acesso de microgeração (potências menores ou iguais a 100 kW) e minigeração (potências maiores que 100 kW e menores ou iguais a 1 MW) distribuídas, conectadas aos sistemas de distribuição de energia e também trata do sistema de compensação de energia elétrica. A resolução prevê a utilização de fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada que sejam conectadas à rede de distribuição por meio de unidades consumidoras (ANEEL, 2012).

Sob outro viés, anteriormente, em 2011, a mesma agência lançou a Chamada Nº 13/2011 denominada Projeto Estratégico: Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira que visou a instalação de centrais fotovoltaicas com capacidade instalada entre 0,5 MW e 3,0 MW. Um dos principais objetivos deste projeto foi de facilitar a inserção de sistemas fotovoltaicos na matriz energética brasileira (ANEEL, 2011). Inserida neste projeto, cita-se a usina de 1 MW instalada em São Lourenço da Mata, Pernambuco, que se destaca por fornecer até 30 % da energia consumida na Arena Pernambuco, a qual sediou a Copa do Mundo de 2014 (NEOENERGIA, 2013).

No Rio Grande do Sul, o projeto de construção de uma usina fotovoltaica de 550 KW_p foi um dos projetos selecionados pela Chamada Nº 13/2011. Esta usina será composta de 10 arranjos de 55 kW_p a serem instalados no telhado de dois prédios da Empresa de Trens Urbanos de Porto Alegre (TRENSURB): a oficina e o depósito de trens. Depois de construída, será necessário o acompanhamento do funcionamento do sistema e verificações periódicas no comportamento dos arranjos deverão ser realizadas, necessitando do uso de um equipamento traçador de curvas I-V portátil para essa tarefa.

Recentemente aconteceu o 6º Leilão de Reserva (6º LER), realizado em 31 de outubro de 2014. Este foi o primeiro leilão do Governo Federal a ofertar empreendimentos fotovoltaicos separados de outras fontes, onde foram cadastrados 400 projetos fotovoltaicos. O preço inicial para contratação dessa fonte de energia foi de R\$ 262,00/MWh, mas, com deságio, o valor médio ficou em R\$ 215,12/MWh. Como resultado, 31 empreendimentos foram contratados somando 889,66 MW de potência instalada. A distribuição de potências por estado é apresentada na Figura 1.1. Os empreendimentos devem começar a operar a partir

do segundo semestre de 2017, suprimindo energia por 20 anos (CCEE, 2014).

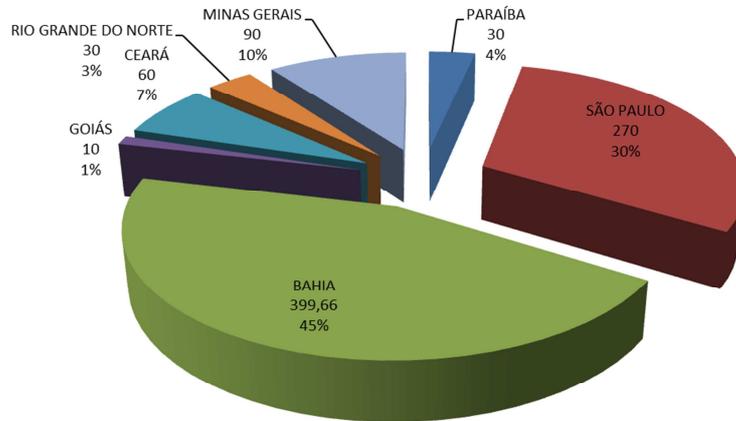


Figura 1.1 – Resumo da potência (MW) contratada por estado.

O cenário colocado pelo 6º LER, traz perspectivas prováveis de inserção da energia solar fotovoltaica, em sistemas de grande porte, na matriz energética brasileira.

1.1 Justificativa

O recente histórico da evolução da energia solar fotovoltaica em usinas de maior porte no Brasil indica um forte desenvolvimento no setor, exigindo um acompanhamento técnico com instrumentação adequada.

Instalações fotovoltaicas tem sua produção de energia influenciada por diversos fatores como a radiação solar, a temperatura e a distribuição espectral da radiação. A curva característica I-V (corrente *versus* tensão) de um arranjo fotovoltaico fornece informações importantes para o gerenciamento, operação e manutenção do sistema fotovoltaico. A capacidade de levantar esta curva é um ponto fundamental para a verificação do índice de produtividade previsto no comissionamento de um projeto. Os testes de comissionamento para sistemas fotovoltaicos conectados a rede estão previstos na NBR 16274 (ABNT, 2014).

1.2 Objetivo Geral

Na presente dissertação propõe-se desenvolver o protótipo de um equipamento portátil destinado à medida da curva característica de arranjos fotovoltaicos em campo. Com este equipamento pretende-se medir arranjos fotovoltaicos com tensão de circuito aberto de até 800 V e corrente de curto circuito no limite de 100 A. O equipamento deve ser de fácil

manuseio e deve responder aos padrões de qualidade de medição para poder atender às demandas de comissionamento em sistemas de grande porte e permitir a verificação do comportamento dos arranjos periodicamente.

1.3 Objetivos Específicos

- Construir um sistema de chaveamento de capacitores usando IGBTs;
- Desenvolver o controle de chaveamento dos IGBTs usando a plataforma Arduino;
- Construir circuitos auxiliares de medição;
- Implantar sistemas de medição de irradiância e temperatura;
- Desenvolver a aquisição de dados usando a plataforma Arduino;
- Realizar medidas de curvas características;
- Comparar as curvas medidas pelo protótipo com outro sistema traçador de curvas.

1.4 Escopo da Dissertação

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica básica acerca da tecnologia fotovoltaica.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre sistemas traçadores de curvas empregados para levantar a curva I-V de células, módulos e arranjos.

O capítulo 4 traz detalhes construtivos e descreve o funcionamento do protótipo desenvolvido nesta dissertação.

O capítulo 5 apresenta a análise de incertezas do protótipo e a comparação das medidas levantadas por ele com outro sistema traçador de curvas.

O capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 TECNOLOGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Neste capítulo são explanados, de forma breve, conceitos importantes da tecnologia solar fotovoltaica.

2.1 Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é o fenômeno físico responsável pela conversão direta da energia solar em energia elétrica e ocorre em dispositivos semicondutores chamados de células fotovoltaicas. Basicamente, uma célula fotovoltaica é um diodo de grande área que possui sua junção PN exposta à luz.

Um diodo é construído a partir da junção de dois materiais semicondutores: tipo P e tipo N. Estes materiais, chamados extrínsecos, são obtidos através de um processo denominado dopagem, que consiste na adição controlada de impurezas no material semicondutor chamado intrínseco¹ na razão de 1:10⁷ (Boylestad e Nashelsky, 1998).

Um dos materiais intrínsecos mais usados na fabricação de dispositivos eletrônicos, inclusive células fotovoltaicas, é o silício. Este material é tetravalente, fazendo 4 ligações covalentes para formar sua estrutura cristalina. Um material tipo N é obtido quando uma amostra de silício é contaminada por átomos de um elemento pentavalente, resultando na sobra de um elétron para cada ligação desse elemento à estrutura cristalina do silício. O material tipo P é produzido com a adição de átomos de um elemento trivalente na estrutura cristalina do silício e o resultado é que, a cada ligação, haverá a falta de um elétron, traduzindo-se em um excesso de lacunas que, por sua vez, tem o comportamento de portadores de carga positiva.

No diodo, sem qualquer polarização, haverá a migração de elétrons do lado N para o lado P e de lacunas do lado P para o lado N, formando na interface dos dois materiais uma região denominada de “zona de depleção”. Nesta região se estabelece um campo elétrico até o limite em que sua ação iniba a difusão dos portadores de carga de uma região para outra.

A Figura 2.1 ilustra, de forma esquemática, a junção PN, onde os elementos positivos representam os buracos e os negativos os elétrons.

Quando a junção PN é exposta à radiação solar, fótons com certa energia ao atingirem a zona de depleção, produzirão pares elétrons-lacunas. Estes portadores são acelerados pelo campo elétrico da junção, onde os elétrons passarão para o lado N e as lacunas para o lado P,

¹ Os materiais intrínsecos são semicondutores que tiveram as impurezas reduzidas a um nível muito baixo.

resultando numa diferença de potencial entre as superfícies das regiões P e N. O resultado desse fenômeno é denominado de efeito fotovoltaico (Bühler, 2011).

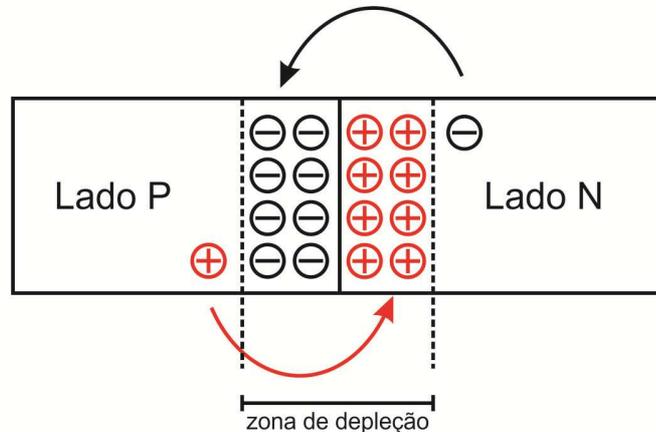


Figura 2.1 – Representação esquemática da junção PN. Fonte: Ruschel, 2015.

Pares elétrons-lacunas produzidos fora da zona de depleção também podem contribuir para o efeito fotovoltaico, mas precisam atingir esta zona antes que ocorra a recombinação (Pinho e Galdino, 2014). Uma corrente irá circular entre as superfícies das regiões P e N, com intensidade proporcional à intensidade da radiação incidente, quando estas superfícies forem interconectadas por um condutor.

2.2 Célula Solar Fotovoltaica

As células fotovoltaicas podem ser construídas a partir de semicondutores, geralmente o silício na sua forma cristalina ou amorfa. Há ainda células construídas a partir de ligas semicondutoras como, por exemplo, o arseneto de gálio (GaAs), telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre-índio (CuInSe₂), também chamado de CIS, etc..

Para obter os terminais elétricos na célula, sua face posterior – a face não iluminada – recebe uma camada metálica que cobre toda sua superfície, já na face frontal o contato metálico é feito na forma de uma grade, a fim de permitir a passagem da luz. Ainda na face frontal, é aplicada uma camada anti-reflexiva para minimizar as perdas por reflexão da energia solar incidente. A Figura 2.2 mostra uma representação esquemática de uma célula de silício cristalino.

Conforme mostra a Figura 2.2, a espessura do material tipo N (emissor) é menor que a do tipo P (base). Tipicamente em uma célula de silício, a camada do tipo N tem uma espessura compreendida entre 0,3 μm e 1 μm e a do tipo P entre 200 μm e 500 μm .

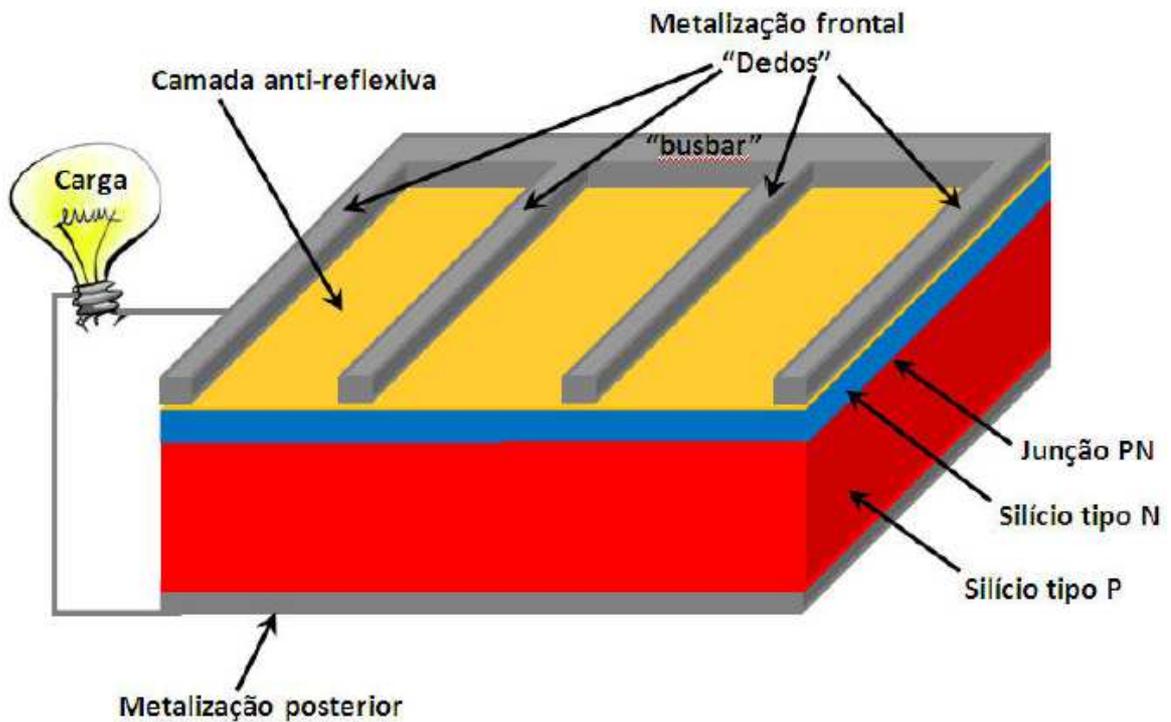


Figura 2.2 – Representação esquemática de uma célula de silício com base P.

Fonte: Bühler, 2011.

Em geral uma célula de silício cristalino apresenta uma tensão de circuito aberto na ordem de 0,6 V e uma corrente de curto-circuito de, aproximadamente, 40 mA/cm^2 quando iluminadas com radiação nas condições padrão (1000 W/m^2 , $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e AM 1,5).

2.3 Módulo Fotovoltaico

A tensão de uma célula é incompatível com a maioria dos equipamentos elétricos. Para que as células possam ser utilizadas para fins práticos, as mesmas são associadas em série e encapsuladas formando uma unidade básica de geração de energia elétrica denominada de módulo fotovoltaico.

A tensão de circuito aberto do módulo é igual à soma das tensões de circuito aberto de cada célula e a corrente de curto circuito é igual à corrente da célula que fornece o menor valor nesta condição. Embora na construção do módulo sejam selecionadas células similares, seus padrões elétricos não são idênticos na sua totalidade.

Os módulos fotovoltaicos comerciais trazem as células encapsuladas em uma estrutura para protegê-las das intempéries e esforços mecânicos. Essa estrutura é composta de diversos componentes conforme esquematiza a Figura 2.3.

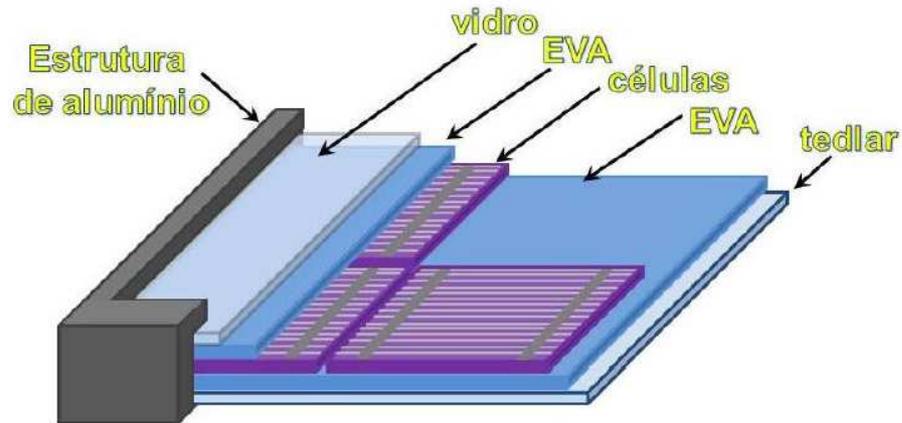


Figura 2.3 – Representação esquemática dos componentes de um módulo fotovoltaico.

Fonte: Bühler, 2011.

Módulos comerciais estão disponíveis para diversas potências e tecnologias. Na Figura 2.4 é apresentado um módulo de silício monocristalino composto por 72 células.



Figura 2.4 – Módulo de silício monocristalino.

Na parte posterior do módulo fotovoltaico existe a caixa de bornes, destinada às conexões elétricas, conforme mostra a Figura 2.5.

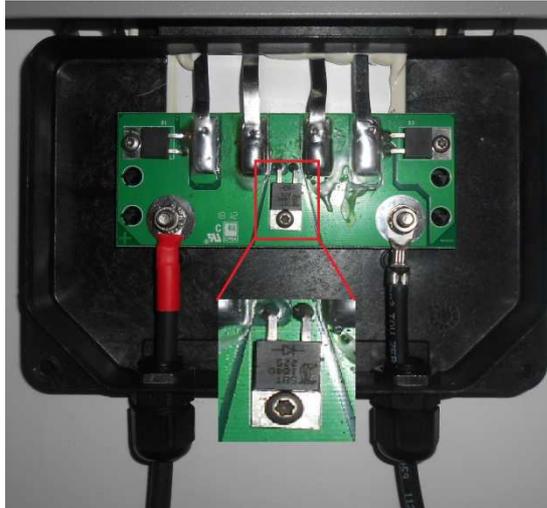


Figura 2.5 – Caixa de conexões elétricas de um módulo fotovoltaico, onde pode ser visto, em detalhe, um dos diodos de *bypass*.

Observa-se, em detalhe, na Figura 2.5 um dos diodos de *bypass* destinados à proteção do módulo caso uma célula ou um conjunto de células sejam sombreadas ou apresentem algum defeito.

2.4 Circuito Equivalente

Na Figura 2.6 é apresentado o circuito equivalente de uma célula fotovoltaica. Este circuito é conhecido como o modelo de um diodo.

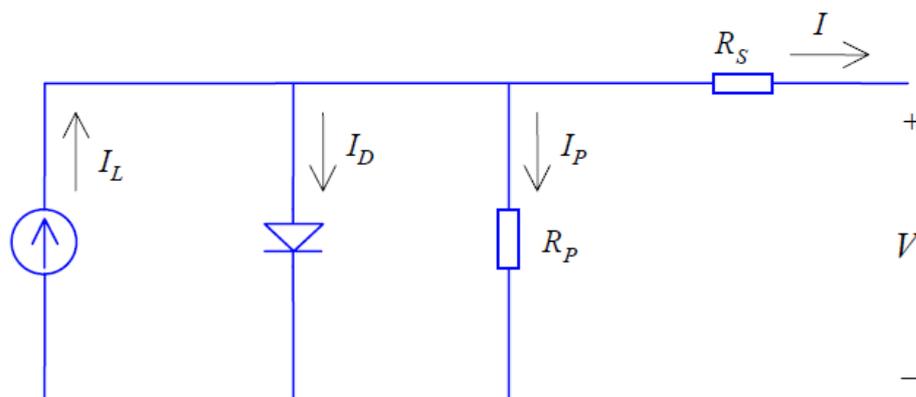


Figura 2.6 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica: modelo de um diodo.

Fonte: Prieb, 2002.

A corrente gerada pela incidência da luz, corrente fotogerada I_L na célula, é representada pela fonte de corrente e a junção PN pelo diodo.

As resistências série R_S e paralela R_P estão associadas à resistência efetiva da célula e às fugas de corrente existentes, respectivamente.

A corrente I gerada pela célula é obtida pela Equação 2.1.

$$I = I_L - I_D - I_P \quad (2.1)$$

O termo I_D é a corrente do diodo e I_P é a corrente de fuga pela resistência paralela.

A corrente que flui pelo diodo, conforme visto em Patterson e Bailey, 2010, é dada pela Equação 2.2.

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{mk_B T_D}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

onde I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo sem iluminação, e a carga elementar, V a tensão sobre o diodo, m o fator de idealidade, k_B a constante de Boltzman ($1,381 \times 10^{-23}$ J/K) e T_D a temperatura do diodo.

Aplicando a Equação 2.2 na Equação 2.1 e considerando a queda de tensão sobre R_S , chega-se a Equação 2.3.

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{e(V + IR_S)}{mk_B T_{cel}}\right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (2.3)$$

A Equação 2.3 descreve o comportamento de uma célula. Para um módulo, composto apenas por células associadas em série, considera-se a Equação 2.4.

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{e(V + IR_S)}{N_S mk_B T_{cel}}\right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (2.4)$$

Neste caso R_S e R_P representam as resistências série e paralelo do módulo e o termo N_S é o número de células associadas em série.

2.5 Curva Característica

A curva característica de um gerador fotovoltaico (célula, módulo, etc.) traz informações importantes acerca de sua qualidade e desempenho. Ela consiste na aquisição dos pares tensão e corrente a partir do ponto em que a tensão é nula e a corrente é máxima, até o

ponto em que a tensão é máxima e a corrente é nula ou vice-versa. Nessa varredura existem três pontos importantes na caracterização do gerador fotovoltaico:

- Tensão de circuito aberto V_{OC} : essa tensão é obtida quando os terminais do gerador estão desacoplados de qualquer carga, sendo assim a corrente será nula;
- Corrente de curto-circuito I_{SC} : é a corrente que circula pelo gerador quando os seus terminais estão em curto-circuito. Nesse ponto a tensão é nula.
- Ponto de máxima potência P_M : esse é o ponto onde o produto tensão e corrente apresenta o seu valor máximo. Nesse ponto V_M e I_M representam a tensão e a corrente, respectivamente, que determinam a máxima potência.

A Figura 2.7 mostra a curva característica I-V e de potência P-V, destacando os pontos importantes.

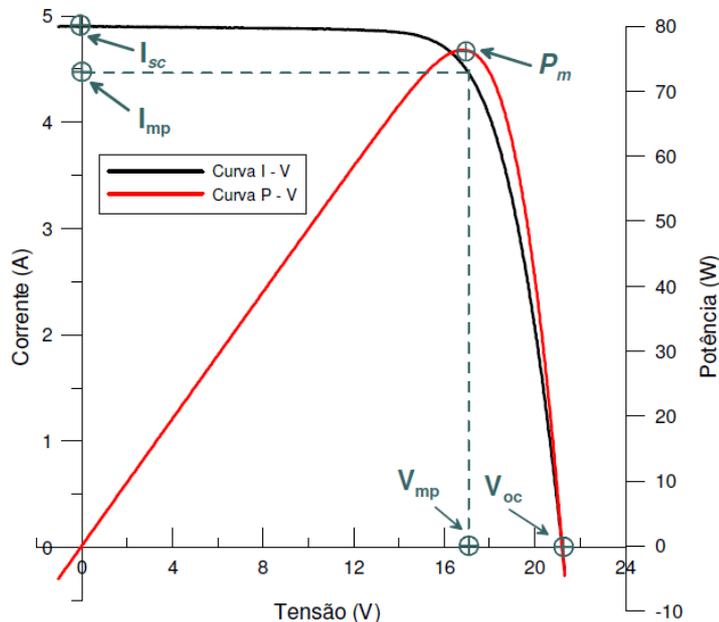


Figura 2.7 – Curva característica e curva de potência de um módulo.

Fonte: Gasparin, 2009.

Uma informação, também importante, determinada a partir da curva característica é o fator de forma, calculado pela Equação 2.5, ele fornece um parâmetro importante na determinação da qualidade do gerador fotovoltaico.

$$FF = \frac{I_M V_M}{I_{SC} V_{OC}} \quad (2.5)$$

A eficiência de conversão η de um módulo fotovoltaico é calculada, considerando-se a área do módulo $A_{\text{módulo}}$ e irradiância G , através da Equação 2.6.

$$\eta = FF \frac{I_{SC} V_{OC}}{A_{\text{módulo}} G} \quad (2.6)$$

2.6 Efeito da Irradiância sobre a Curva Característica

A variação da irradiância influencia tanto a corrente quanto a tensão de um gerador fotovoltaico. Mantendo-se a temperatura constante sobre o gerador fotovoltaico, o efeito da irradiância sobre a corrente segue uma relação diretamente proporcional enquanto que na tensão a relação é logarítmica. A Figura 2.8 mostra a curva característica de um módulo, a temperatura constante e sob diferentes condições de irradiância.

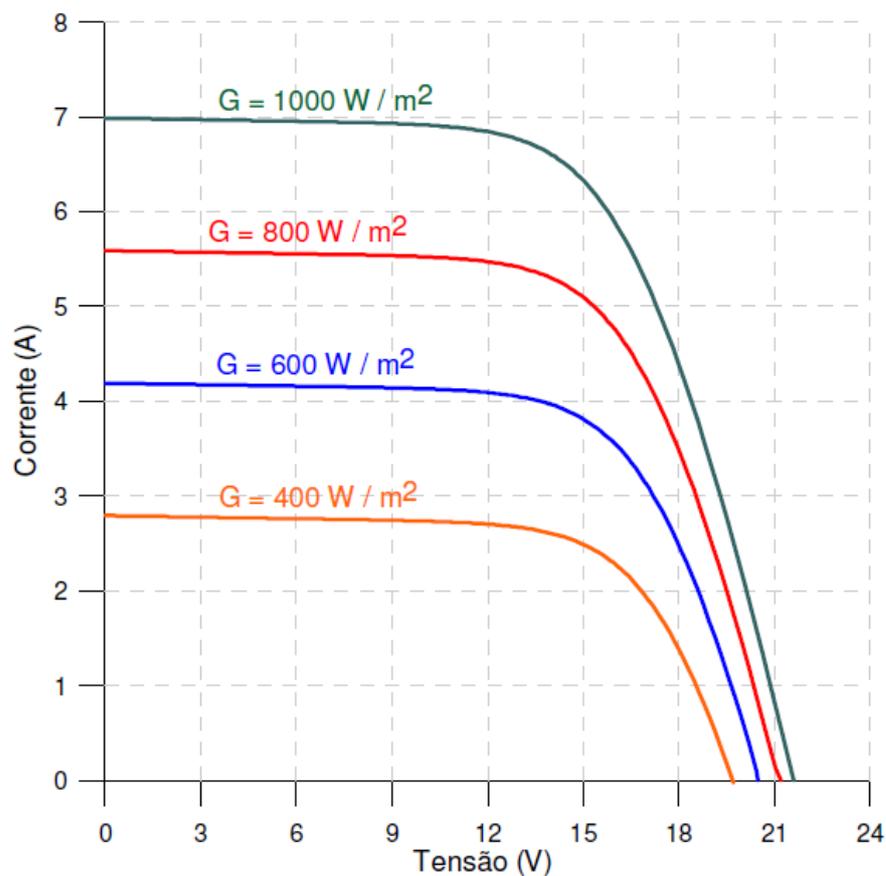


Figura 2.8 – Curva característica de um módulo sob diferentes condições de irradiância e temperatura constante. Fonte: Gasparin, 2009.

2.7 Efeito da Temperatura sobre a Curva Característica

A corrente de curto-circuito sofre um pequeno incremento com o aumento da temperatura quando se mantém constante a irradiância. O coeficiente da variação da corrente de curto-circuito com a temperatura é chamado de α , cuja expressão está descrita na Equação 2.7.

$$\alpha = \frac{\partial I_{SC}}{\partial T} \quad (2.7)$$

Conforme se observa na Figura 2.9, a tensão de circuito aberto também sofre variação com a temperatura.

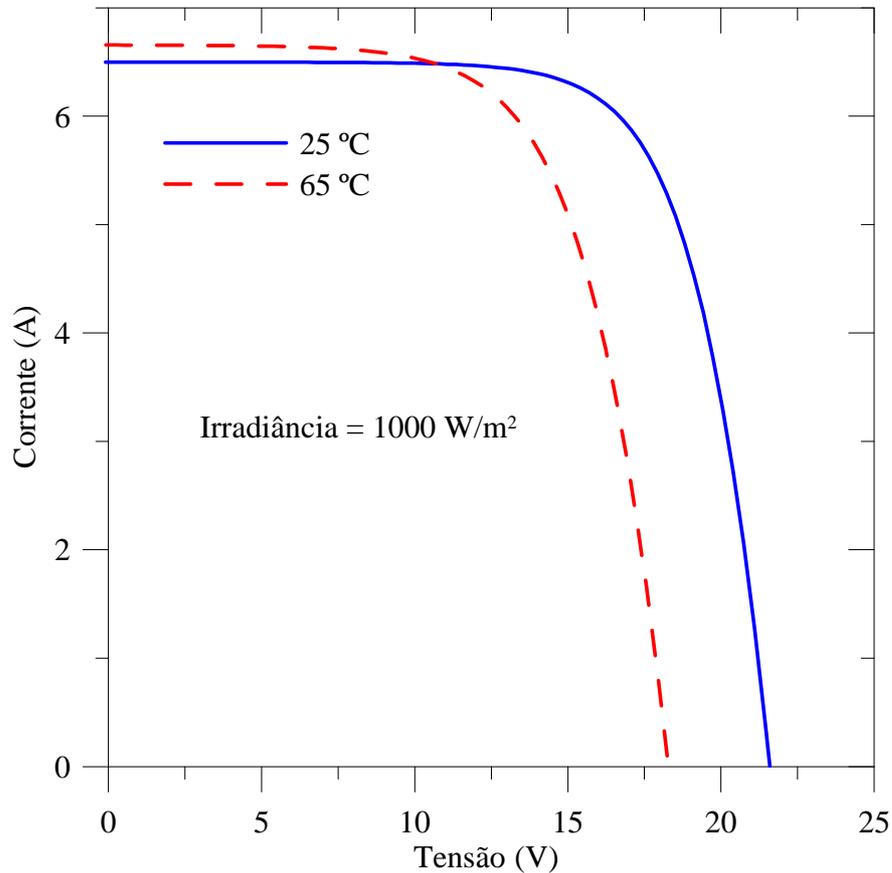


Figura 2.9 – Variação da corrente de curto-circuito e da tensão de circuito aberto em função da variação da temperatura sob irradiância constante em um módulo.

Esta variação, entretanto, é no sentido de diminuir a tensão de circuito aberto. O coeficiente de variação da tensão de circuito aberto é denominado β e expresso pela Equação 2.8.

$$\beta = \frac{\partial V_{OC}}{\partial T} \quad (2.8)$$

Como se observa na Figura 2.10, a potência diminui com o aumento da temperatura, pois o acréscimo na corrente não compensa o decréscimo na tensão ao longo da curva característica.

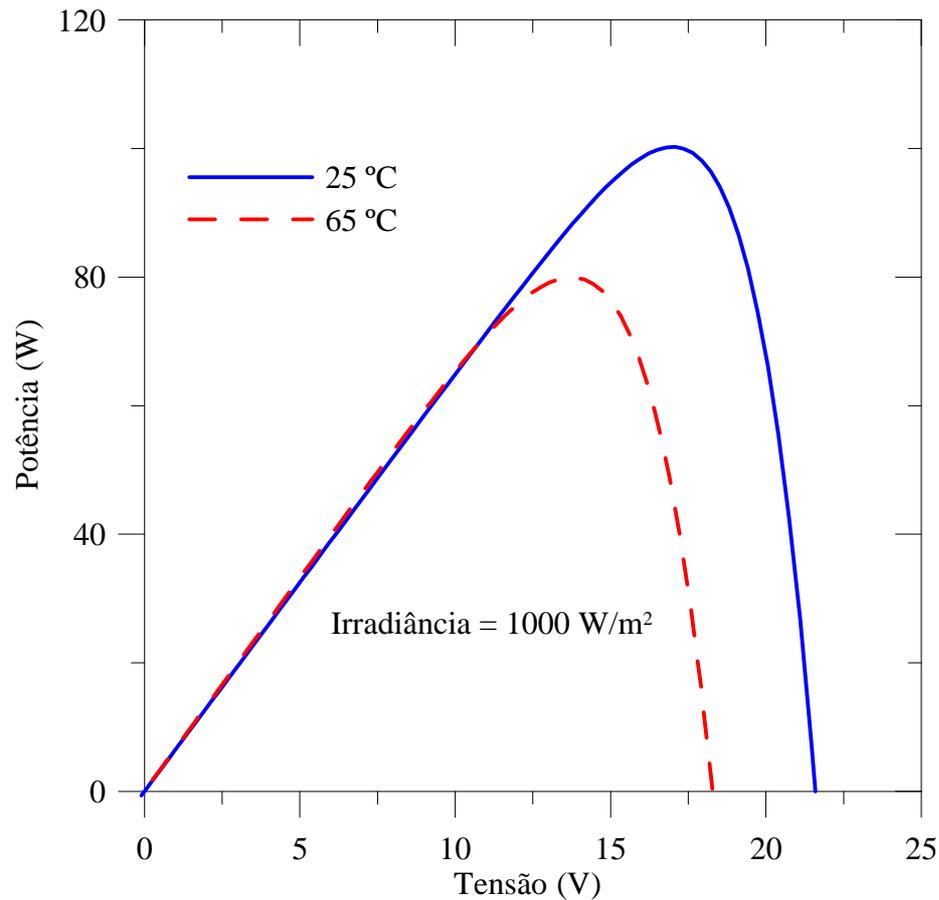


Figura 2.10 – Variação da potência em função da variação da temperatura em um módulo.

2.8 Efeito das Resistências Série e Paralela

Como descrito na seção 2.4, o modelo de um diodo apresenta duas resistências. Estas resistências influenciam consideravelmente no fator de forma da curva característica de maneira degrada-la e, por consequência, diminuindo a potência do dispositivo.

A Figura 2.11 mostra a influência da resistência série em um módulo. O que se observa é uma redução na inclinação da curva característica na região da tensão de circuito aberto. Idealmente esta resistência deve ter um valor nulo.

A resistência paralela que, idealmente, deve ter resistência tendendo ao infinito, provoca uma redução na inclinação na curva na região de curto-circuito, conforme se observa

na Figura 2.12.

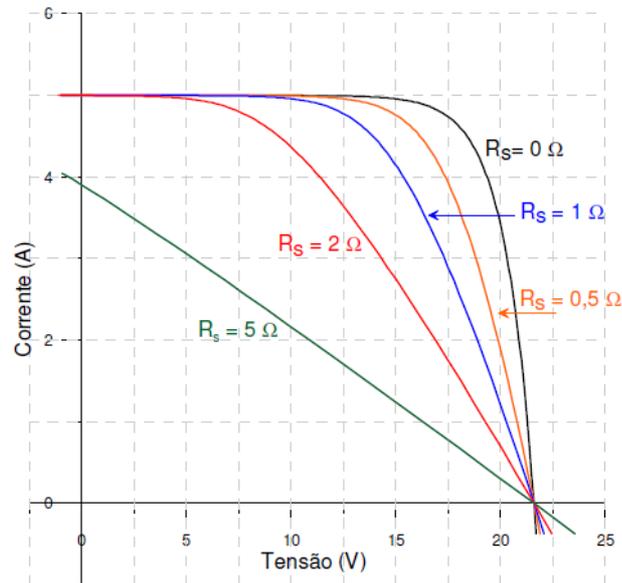


Figura 2.11 – Influência da resistência série na curva característica de um módulo.

Fonte: Gasparin, 2009.

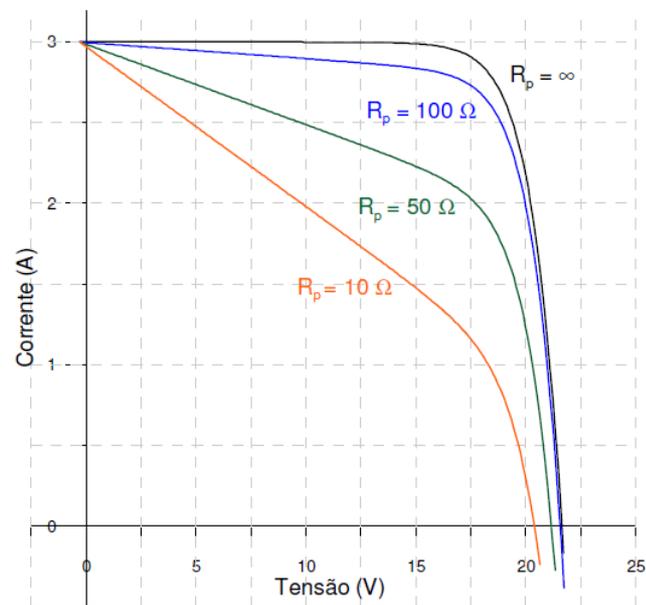


Figura 2.12 – Influência da resistência paralela na curva característica de um módulo.

Fonte: Gasparin, 2009.

2.9 Arranjo Fotovoltaico

Para a obtenção das características elétricas adequadas (tensão, corrente e potência)

em um sistema fotovoltaico, é necessário fazer ligações em série e/ou paralelo de módulos. A Figura 2.13 mostra as formas de associação de módulos.

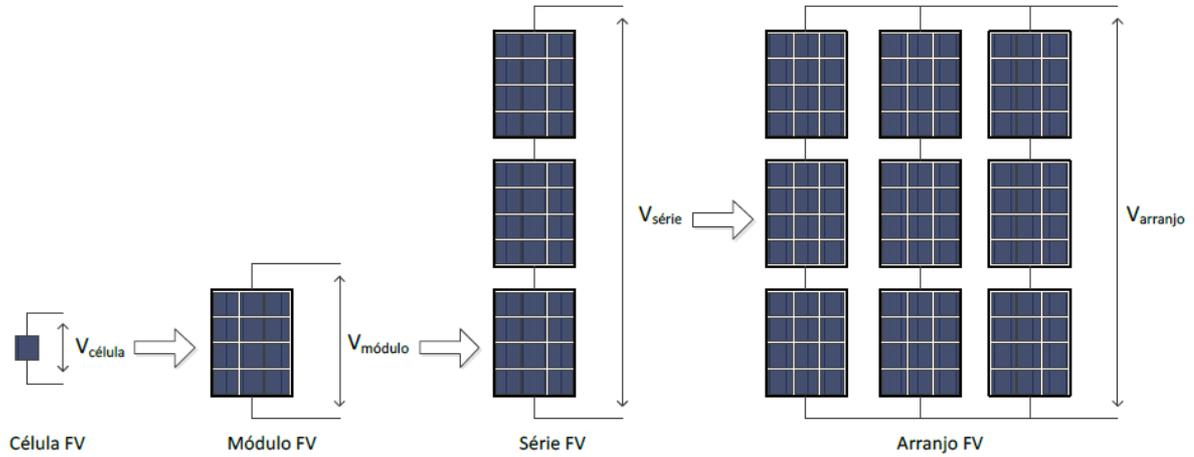


Figura 2.13 – Célula, módulo, série e arranjo fotovoltaico. Fonte: Almeida, 2012.

A tensão resultante da ligação em série de módulos é igual à soma da tensão individual de cada módulo, enquanto a corrente da associação é igual à corrente de um módulo, supondo módulos idênticos.

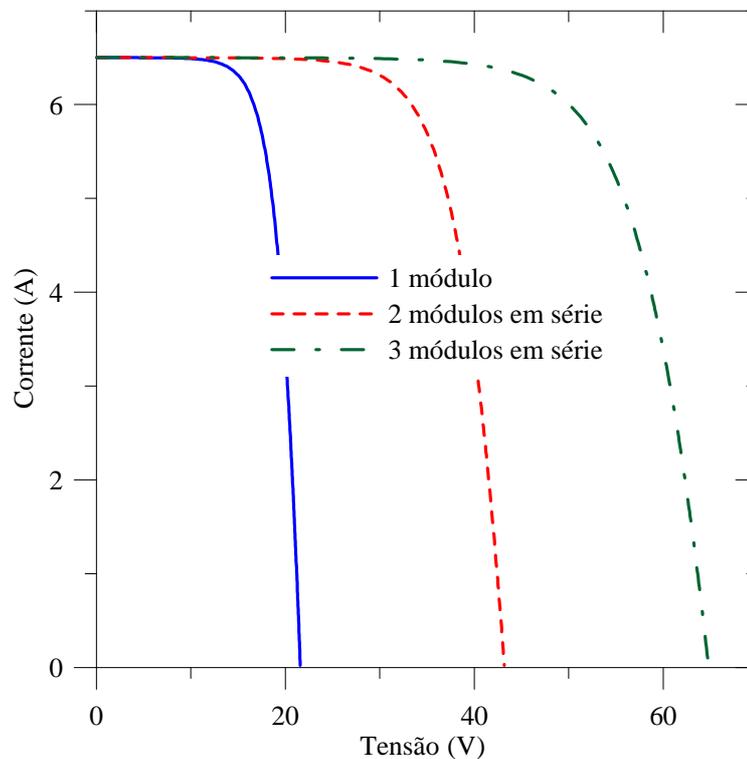


Figura 2.14 – Curva característica para 1 módulo, 2 módulos idênticos em série e 3 módulos idênticos em série.

Na prática não há identidade de células fotovoltaicas e, por consequência de módulos, portanto a corrente resultante da associação será a que estiver estabelecida no módulo que apresentar o menor valor individual de corrente (Krauter, 2006). A Figura 2.14 mostra as curvas características para 1 módulo e para 2 e 3 módulos idênticos em série.

Na associação em paralelo a corrente resultante será a soma das correntes estabelecidas em cada módulo e a tensão será, no caso de módulos idênticos, comum a cada um dos módulos. A Figura 2.15 mostra as curvas características para 1 módulo e para 2 e 3 módulos idênticos em paralelo.

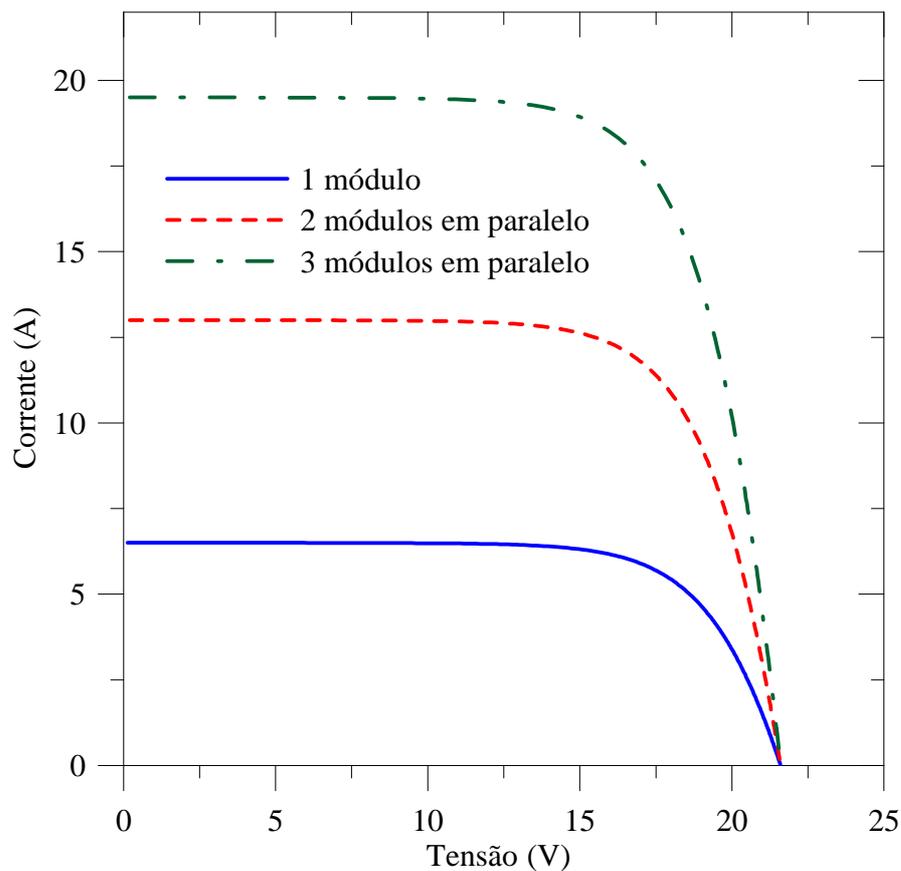


Figura 2.15 – Curvas características para 1 módulo, 2 módulos idênticos em paralelo e 3 módulos idênticos em paralelo.

O arranjo fotovoltaico é composto pela ligação em paralelo de séries de módulo, conforme mostra a Figura 2.16.

Para proteção do sistema gerador ainda são usados os diodos de *bypass*² e de bloqueio conforme pode ser visualizado na Figura 2.16. Os diodos de *bypass* evitam, por exemplo, que

² O diodo de *bypass* geralmente está integrado ao módulo conforme mostra a Figura 2.5.

uma célula ou um módulo em uma série se comporte como uma carga para o sistema quando o mesmo apresenta um defeito ou tem sua radiação incidente diminuída por sombreamento.

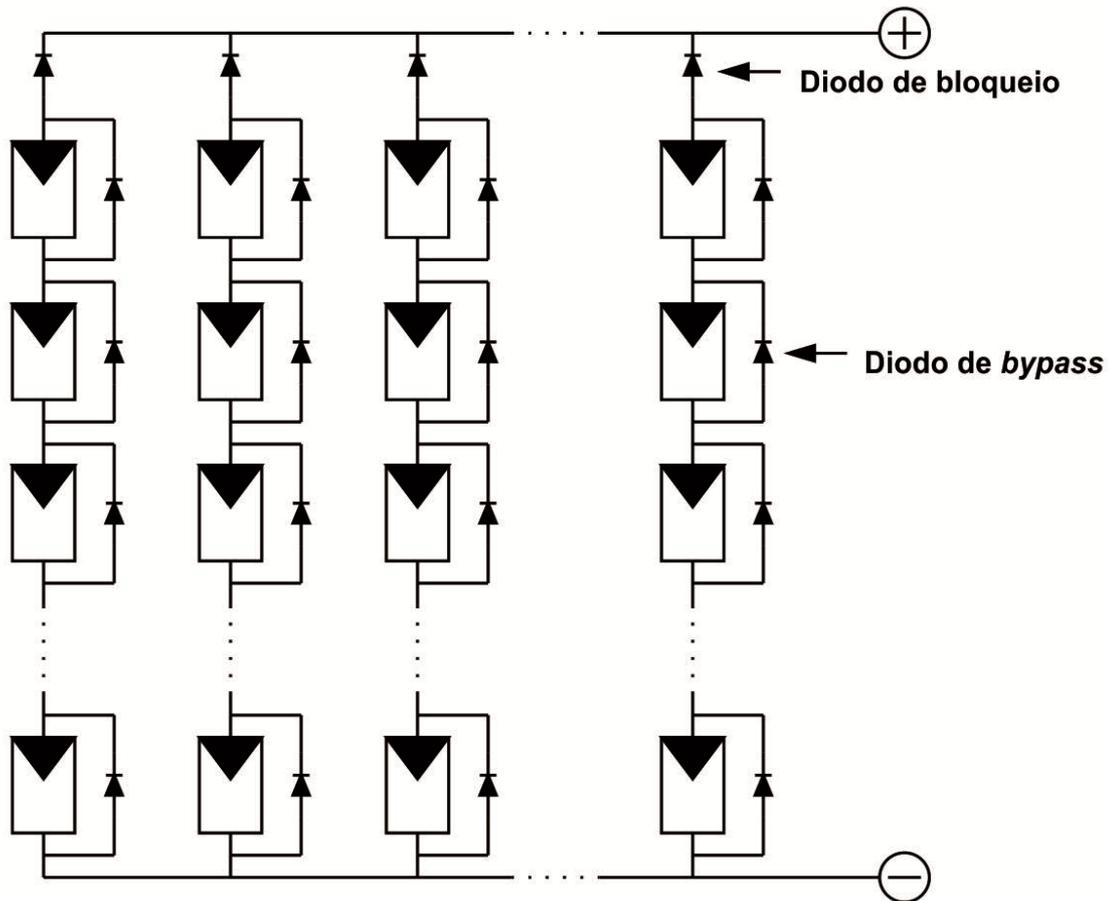


Figura 2.16 – Arranjo fotovoltaico exibindo diodos de *bypass* e de bloqueio.

Quando, por exemplo, a célula é parcialmente ou completamente sombreada, o diodo de *bypass* desvia a corrente, fazendo com que a célula não gere eletricidade e nem se comporte como uma carga. A função dos diodos de bloqueio é evitar que uma série de módulos injete corrente em outra série quando há desconformidade de irradiância solar, eventos que podem ocorrer principalmente no início e final do dia, ou quando os painéis das séries têm orientações diferentes.

3 SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS

Para levantar a curva característica I-V de uma célula, um módulo ou um arranjo fotovoltaico é necessário algum dispositivo que polarize estes conversores, enquanto iluminados, nos diversos pontos da curva e um equipamento para medir, em conjunto, os valores de corrente e tensão (pares I-V). Também é necessário saber informações sobre a irradiância e a temperatura do dispositivo que está sendo caracterizado.

Para a polarização é necessário algum dispositivo que permita a varredura completa dos pontos de operação do gerador fotovoltaico. Diversas técnicas podem ser aplicadas para esta tarefa como, por exemplo, o uso de carga resistiva, carga capacitiva, carga eletrônica, etc.. Com relação à aquisição dos dados podem ser aplicados osciloscópios, multímetros, módulos de aquisição de dados, etc..

Em Abete e Ferraro, 1990, foi proposto um método de aquisição da curva I-V de células (ou módulos), que usa uma ou mais células (ou módulos) como carga variável para o dispositivo sob teste. O princípio básico do método está em manter sob radiação constante a célula a ser caracterizada quando conectada a outra servindo de carga variável. Os pontos de polarização são mudados quando varia-se a radiação que incide sobre esta célula. Isto permite a varredura dos pontos de operação do dispositivo em teste sendo os mesmos registrados em multímetros digitais conectados a um computador. Na Figura 3.1 pode ser visto esquema básico do circuito utilizado pelos autores.

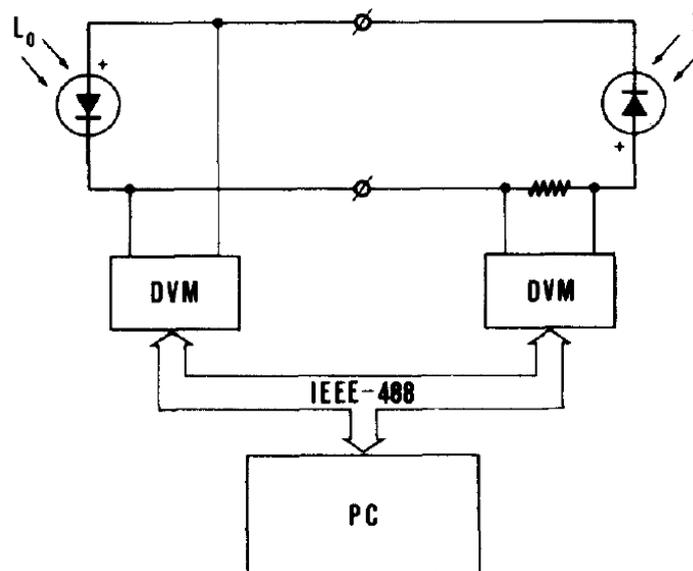


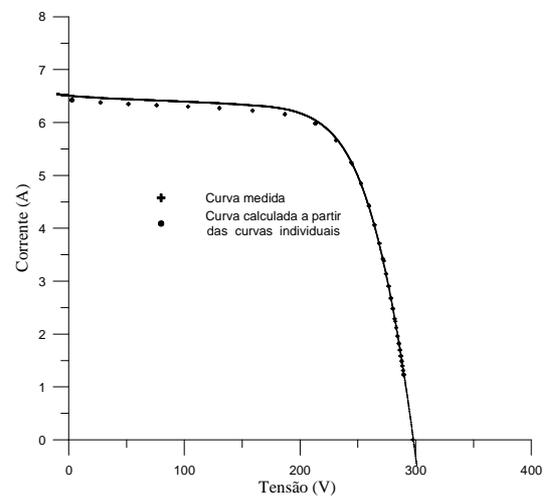
Figura 3.1 – Esquema de caracterização de células proposto Abete e Ferraro, 1990.

Fonte: Abete e Ferraro, 1990.

Uma carga resistiva variável também pode ser aplicada para a polarização de uma célula, módulo ou arranjo, desde que a potência dos resistores empregados seja compatível com a do dispositivo fotovoltaico. Um detalhe importante desta metodologia é que a polarização acontece em passos discretos limitados ao número de resistores empregados e consequentemente os pontos medidos ficam reduzidos. Um exemplo de aplicação desse método na caracterização de células pode ser visto em Malik e Damit, 2002. Em Prieb e Krenzinger, 2007, um resistor variável foi aplicado para levantar a curva I-V de um arranjo de 1,6 kW de potência nominal, permitindo polarizar o arranjo em 31 pontos. Na Figura 3.2 podem ser vistos o resistor variável e a curva medida no trabalho de Prieb e Krenzinger, 2007.



(a)



(b)

Figura 3.2 – (a) Resistor variável utilizado na medida da curva e (b) curva medida.

Fonte: Prieb e Krenzinger, 2007.

Uma carga capacitiva pode ser empregada para polarizar um gerador fotovoltaico, trazendo vantagens frente ao uso de carga resistiva como, por exemplo, a de polarizar de forma contínua em detrimento à resistiva. Um traçador de curvas I-V para arranjos, baseado em uma carga capacitiva, foi proposto por Warner e Cox, 1983.

Muñoz e Lorenzo, 2006, descrevem um traçador de curva I-V com a carga capacitiva sendo chaveada através de IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor* – Transistor Bipolar de Porta Isolada) permitindo a caracterização de arranjos com tensão de circuito aberto de até 800 V e corrente de curto-circuito limitada em 80 A. O circuito proposto pelos autores é exibido na Figura 3.3.

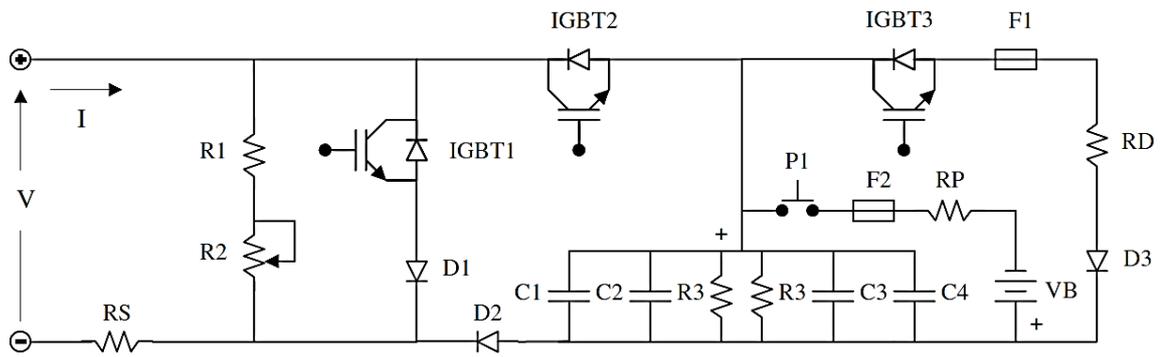


Figura 3.3 – Circuito proposto para um traçador de curvas baseado em carga capacitiva.

Fonte: Muñoz e Lorenzo, 2006.

Em Moretón, et al., 2013, uma carga capacitiva foi aplicada para caracterização de um arranjo de 500 kW, sendo usado um osciloscópio de 4 canais para a aquisição dos dados.

Em Zilles e Lorenzo, 1990, foi descrito uma carga eletrônica, para caracterização de módulos fotovoltaicos, que atua como uma resistência variável controlada por tensão. Podendo operar com tensões entre 0 e 30 V e correntes entre 0 e 5 A, porém com a potência máxima limitada em 100 W.

Kuai e Yuvarajan, 2006, propõem a polarização de um módulo com o uso de uma carga eletrônica simples baseada em um MOSFET operando nas regiões linear e de corrente constante. O diagrama simplificado do circuito pode ser visto na Figura 3.4.

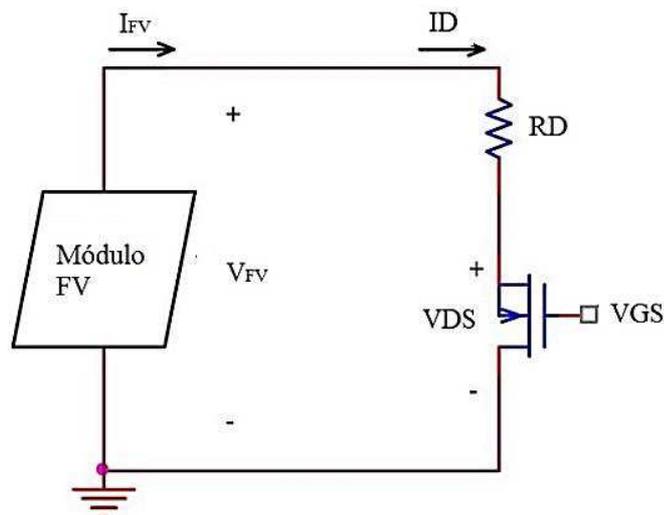


Figura 3.4 - Diagrama simplificado da carga eletrônica proposta por Kuai e Yuvarajan, 2006. Fonte: Adaptado de Kuai e Yuvarajan, 2006.

No trabalho de Prieb, 2002, uma fonte bipolar de 4 quadrantes é empregada para

polarizar os módulos no sistema traçador de curva desenvolvido pelo autor, que ainda emprega multímetros digitais sincronizados através de um programa de computador para medir os pares I-V, conforme mostra a Figura 3.5.

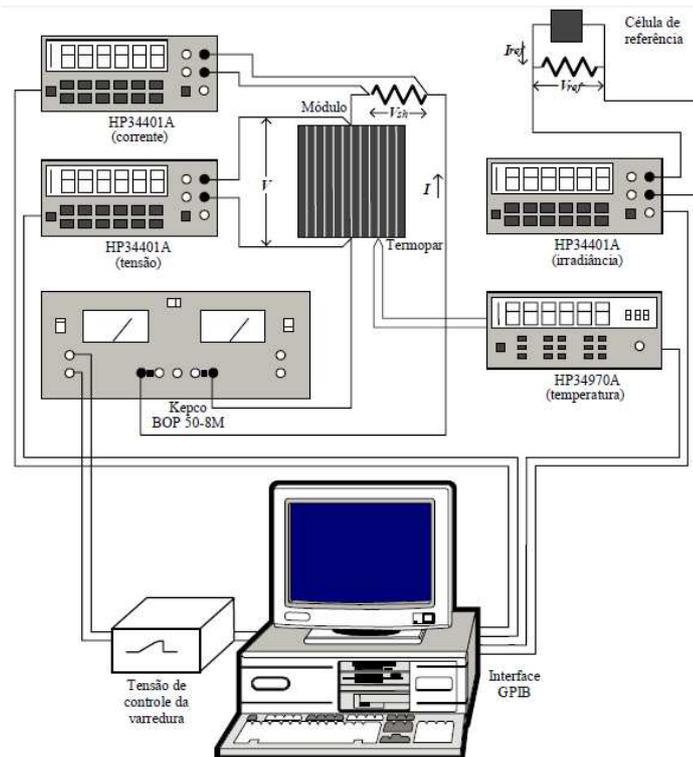


Figura 3.5 - Sistema de medição da curva característica proposto por Prieb, 2002.

Fonte: Prieb, 2002.

A carga eletrônica, a carga capacitiva e as fontes bipolares, polarizam os geradores fotovoltaicos de forma a permitir uma varredura contínua nos pontos de operação desses geradores, possibilitando a aquisição de inúmeros pares I-V, estando apenas limitados à velocidade de aquisição dos instrumentos de medida. O uso de dispositivos que promovam a polarização de modo a permitir a aquisição de um maior número de pontos é uma vantagem, pois o número de pontos mais elevado, por exemplo, permite determinar com maior precisão o ponto de máxima potência e visualizar defeitos ao longo da curva característica.

O uso de carga capacitiva em traçadores de curva I-V permite o desenvolvimento de equipamentos portáteis. Macêdo, 2006, construiu um equipamento portátil baseado em carga capacitiva, acondicionando o circuito em uma maleta de alumínio. O instrumento foi utilizado para caracterizar os geradores que compõem um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFRCR) de 12,3 KW instalado no prédio que abriga o Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE/USP). O equipamento desenvolvido pode ser visto na Figura 3.6.



Figura 3.6 - Carga capacitiva construída no IEE/USP. Fonte: Macêdo, 2006.

A carga capacitiva também é utilizada em equipamentos comerciais destinados à medida de curvas em campo como, por exemplo, o traçador de curvas modelo DS-1000, fabricado pela empresa Norte-Americana Daystar, que permite levantar a curva característica de arranjos fotovoltaicos com até 100 kW (Daystar, 2014). Seu painel pode ser visto na Figura 3.7 e algumas de suas características estão apresentadas abaixo:

- Necessita de um computador para ser operado.
- Possui 3 faixas selecionáveis de corrente: 1 A, 10 A e 100 A.
- Possui 3 faixas selecionáveis de tensão: 10 V, 100 V e 1000 V.
- Utiliza conversores analógico-digitais independentes para aquisição dos pontos de corrente e tensão.
- Aplica uma pré-carga reversa de 15 V antes de iniciar uma varredura de pontos I-V.
- Possui 4 valores de capacitância para carga capacitiva.

Outro exemplo, exibido na Figura 3.8, é o equipamento modelo PVPM1000C100, fabricado pela PVE, uma empresa Alemã, que também mede arranjos com até 100 kW (PVE, 2011). Algumas características deste traçador de curvas estão apresentadas abaixo:

- Pode operar no modo *stand-alone*.
- Possui 4 faixas de tensão (automático/manual): 25 V, 100 V, 500 V e 1000 V.
- Possui 4 faixas de corrente (automático/manual): 10 A, 20 A, 50 A e 100 A.
- Usa metodologia de 4 fios para evitar erros sistemáticos na medida da tensão.
- O tempo de varredura varia de 20 ms a 2 s.



Figura 3.7 – Traçador de curvas DS-1000. Fonte: Daystar, 2014.

Da pesquisa realizada entre equipamentos comerciais estes foram os dois únicos instrumentos capazes de medir até 100 A.

Existem outros modelos e fabricantes que oferecem traçadores de curva com menores potencias que também fazem uso da carga capacitiva como, por exemplo, o modelo MP-11 fabricado pela EKO Instruments, cujos limites são 1000 V e 30 A (Eko, 2014). Na Figura 3.9 pode ser visto o equipamento fabricado pela empresa. Algumas características deste equipamento estão listadas abaixo:

- Pode operar no modo *stand-alone*.
- Possui 3 faixas de tensão (automático/manual): 100 V, 600 V e 1000 V.
- Possui 3 faixas de corrente (automático/manual): 2 A, 10 A e 30 A.

- O tempo de varredura varia de 4 ms a 640 ms.



Figura 3.8 – Traçador de curvas PVPM1000C100. Fonte: PVE, 2011.



Figura 3.9 – Traçador de curvas MP-11. Fonte: Eko, 2014.

O resultado de testes de desempenho realizados em diversos equipamentos comerciais traçadores de curva I-V pode ser visto em Podewils e Bosworth, 2012.

Com base no que foi exposto, percebe-se que o emprego da carga capacitiva em um traçador de curvas para aplicação em sistemas de energia solar fotovoltaica é uma técnica utilizada por pesquisadores e pela indústria, trazendo confiabilidade no que diz respeito ao dispositivo de polarização dos arranjos sob teste.

4 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO

O protótipo desenvolvido no âmbito desse trabalho contempla uma instrumentação dedicada à caracterização elétrica de arranjos fotovoltaicos utilizando carga capacitiva. O sistema pode ser dividido em três subsistemas: sistema lógico programável, sistema de potência e sistema de medição.

4.1 Sistema Lógico Programável

O Sistema Lógico Programável é responsável pelo controle do sistema de potência e pela aquisição de dados. Este sistema está baseado na placa Arduino Due. O seu aspecto físico pode ser visto na Figura 4.1.

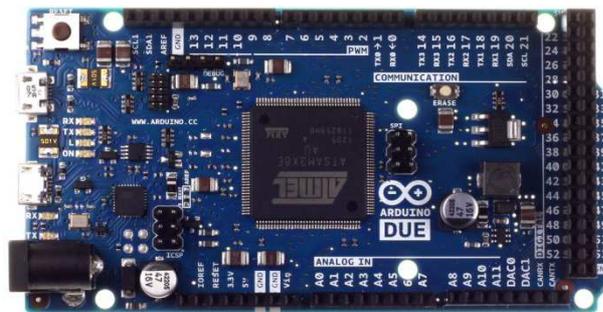


Figura 4.1 – Placa Arduino Due. Fonte: Arduino, 2015.

A placa Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre. Ela tem por componente principal um microcontrolador destinado a controlar as diversas entradas e saídas. No caso do modelo Due, o microcontrolador usado, é o SAM3X8E da fabricante Atmel (Arduino, 2015). Algumas características desta placa são exibidas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Algumas características da placa Arduino Due.

Característica	Valor
Tensão de operação	3,3 V
Entradas e saídas digitais	54 entradas/saídas
Entradas analógicas	12 entradas
Frequência de operação	84 MHz
Resolução do conversor A/D	10/12 bits (selecionável)
Dimensões	101,52 x 53,3 mm

A execução dos comandos é programada através de uma linguagem baseada em C++

no Ambiente Integrado de Desenvolvimento (IDE – *Integrated Development Environment*) específico para as placas Arduino. A janela do programa pode ser vista na Figura 4.2.

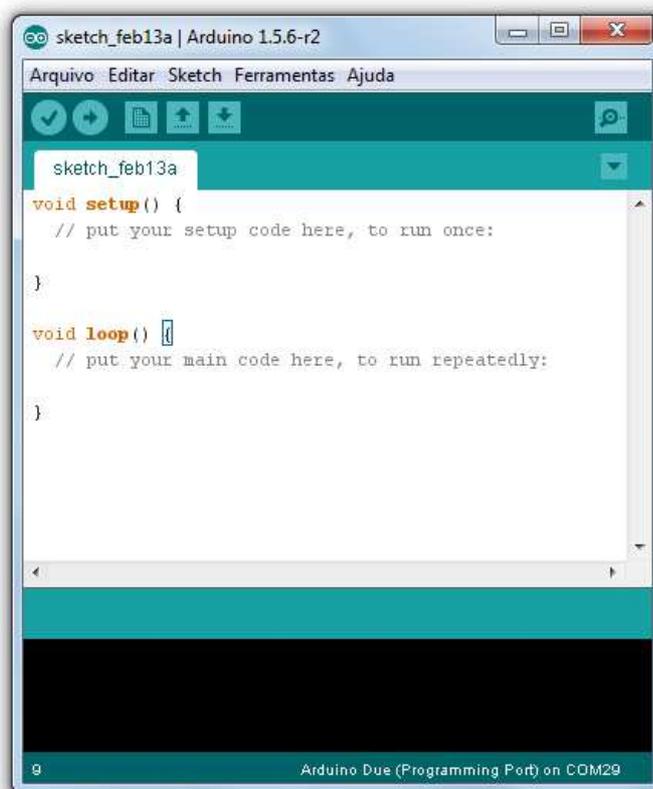


Figura 4.2 – Ambiente de desenvolvimento da placa Arduino.

A placa Arduino, nesse protótipo, controla o chaveamento da carga capacitiva e também faz a aquisição dos dados necessários para a caracterização de um gerador fotovoltaico: pares I-V, temperatura e irradiância. Estes dados são gravados em um cartão de memória e usados para posterior processamento e análise. Para tanto, foi escrita uma rotina específica para que a Arduino executasse estas funções de forma eficiente e funcional.

A opção do uso da placa Arduino reside principalmente na sua fácil utilização, programação e integração a periféricos como, por exemplo, cartão de memória e *display* de LCD.

4.2 Sistema de Potência

O sistema de potência faz uso de capacitores para polarizar o arranjo nos diversos pontos da curva característica, isto é, do ponto de curto circuito ($V=0$, $I=I_{SC}$) ao ponto de circuito aberto ($V=V_{OC}$, $I=0$). O chaveamento dos capacitores com o arranjo é realizado

através de transistores do tipo IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor* – Transistor Bipolar de Porta Isolada). Estes transistores apresentam as características de chaveamento por tensão do MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* – Transistor de Efeito de Campo de Semicondutor de Óxido Metálico) e a comutação rápida e alta potência dos transistores bipolares (Lander, 1996).

O uso do capacitor como carga para a tarefa de polarização de um arranjo baseia-se na propriedade dele se comportar, idealmente, como um curto circuito quando descarregado e de um circuito aberto quando carregado.

Quando conectado em uma fonte de corrente constante, Figura 4.3, o capacitor tem sua tensão incrementada de acordo com a Equação 4.1.

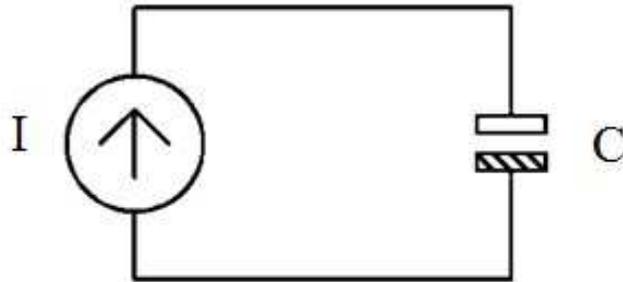


Figura 4.3 – Capacitor conectado a uma fonte de corrente.

Conforme apresenta a Equação 4.1, a tensão no capacitor tenderá ao infinito quando o tempo tender ao infinito, porém uma fonte de corrente constante real apresenta um valor limite de tensão devido a sua potência. Dessa forma, enquanto o capacitor estiver carregando com tensão abaixo deste limite a corrente se manterá constante e ao atingir este limite a corrente tenderá a zero.

$$v(t) = \frac{It}{C} \quad (4.1)$$

onde I é a corrente, t o tempo e C a capacitância.

A Figura 4.4 mostra um gráfico, obtido a partir da Equação 4.1, que ilustra o processo de carga de um capacitor de $470 \mu\text{F}$ em uma fonte de corrente limitada a 8 A e 50 V . O tempo de carga foi de, aproximadamente, 3 ms .

Na Figura 4.5 é apresentado o comportamento da corrente em função da tensão no circuito. Observa-se que a corrente torna-se nula quando a tensão no capacitor é de 50 V .

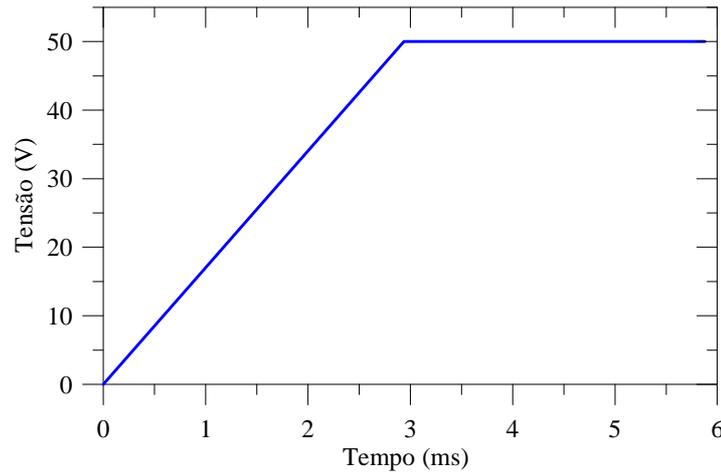


Figura 4.4 – Comportamento da tensão em função do tempo de um capacitor conectado a uma fonte de corrente.

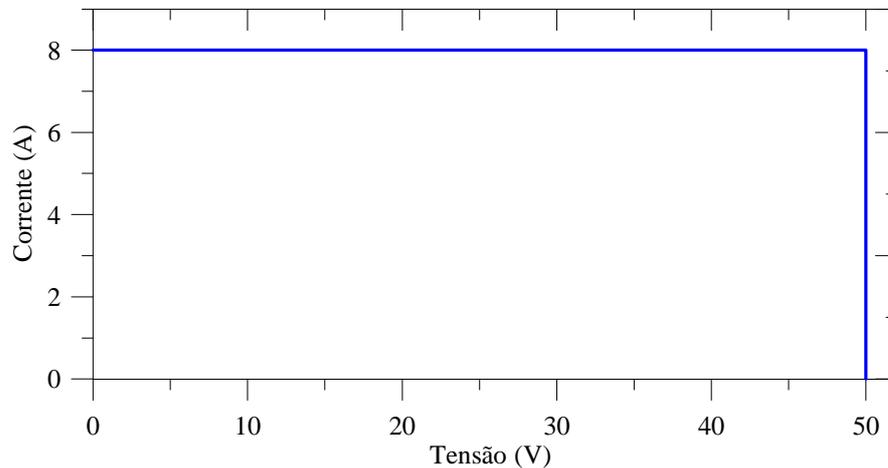


Figura 4.5 – Comportamento da corrente em função da tensão.

Tendo por princípio que uma célula fotovoltaica (por consequência, um módulo ou arranjo fotovoltaico) pode ser modelada como uma fonte de corrente não ideal, a obtenção de sua curva característica pode ser alcançada com o uso de uma carga capacitiva. No trabalho de Oliveira, et al., 2014, a curva característica de um arranjo composto por três séries de módulos ligadas em paralelo, foi obtida com auxílio de uma carga capacitiva que utilizava dois capacitores de $4700 \mu\text{F} \times 450 \text{V}$, associados em paralelo, equivalendo a uma capacitância de $9400 \mu\text{F}$. O resultado pode ser visto na Figura 4.6.

Para levantar a curva de um arranjo, o capacitor deve estar previamente descarregado para que inicialmente possa polarizar o arranjo no ponto em que $I=I_{SC}$. Entretanto isso não é o suficiente visto que é necessário compensar as quedas de tensão inerentes à resistência série do arranjo, à resistência dos cabos de conexão, etc. (Gasparin, 2009). Uma forma de contornar estas quedas de tensão é promover uma pré-carga reversa no capacitor.

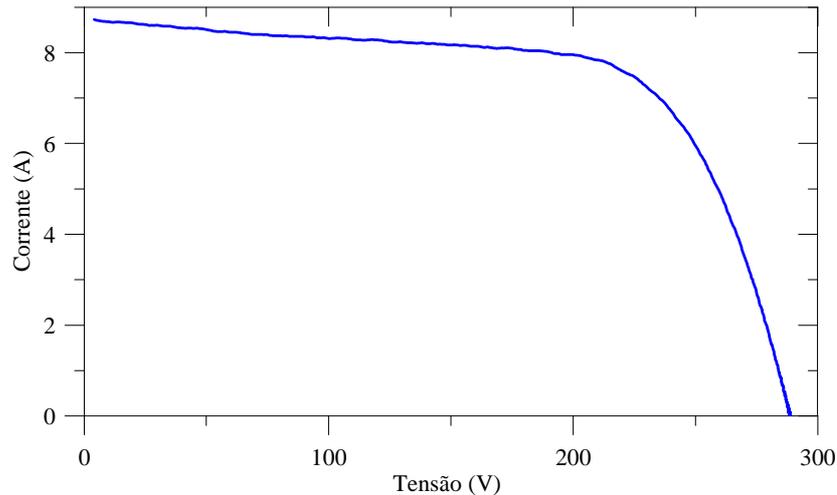


Figura 4.6 – Curva I-V de um arranjo com três séries de módulos em paralelo.

Fonte: Oliveira, et al., 2014.

O circuito de chaveamento usado neste trabalho é baseado no que foi desenvolvido por Muñoz e Lorenzo, 2006, cujo diagrama esquemático é exibido na Figura 4.7.

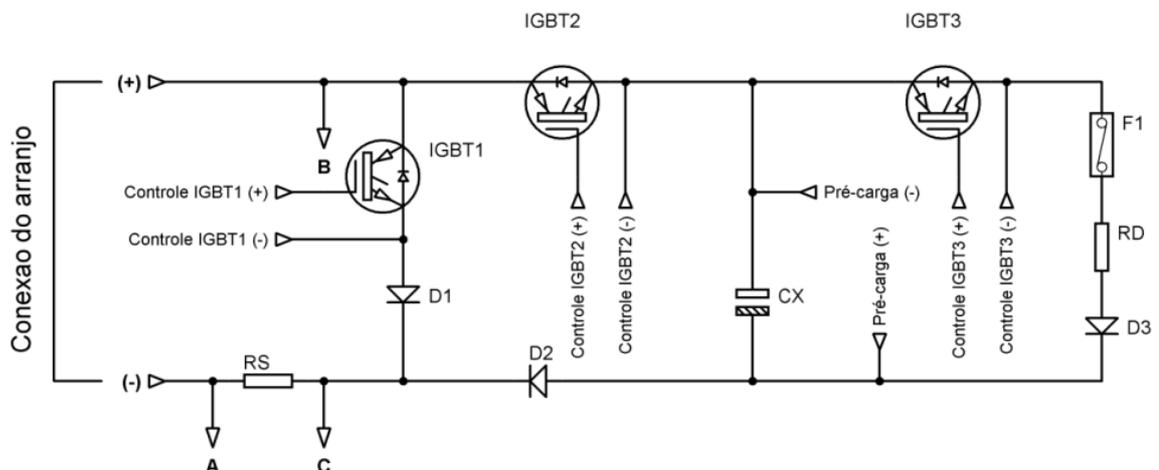


Figura 4.7 – Diagrama esquemático do circuito de potência.

Neste circuito, cada IGBT desempenha uma função: o IGBT 1 provoca um curto circuito no arranjo que estiver conectado (esta função tem o propósito de permitir a medida da corrente de curto circuito do arranjo, I_{SC} , sem, porém, iniciar uma varredura); o IGBT 2 conecta o arranjo ao capacitor permitindo a varredura dos pontos que compõem a curva característica; por fim, o IGBT 3 provoca a descarga do capacitor através do resistor RD. Com relação aos diodos: D1 evita algum dano ao IGBT 1 quando o arranjo é conectado ao circuito com a polaridade invertida; D2, pela mesma razão, evita um dano no IGBT 2 e o D3 evita que

o capacitor se descarregue, por RD, sua pré-carga.

Para a montagem do circuito dessa dissertação foram usados dois modelos de IGBT com características elétricas distintas. No caso do IGBT1 e do IGBT2 foi usado o modelo GT100DA120U, fabricado pela Vishay Semiconductors, que pode operar, em modo contínuo, com V_{CE} de 1200 V e I_C de 258 A em uma temperatura de junção de 25 °C (Vishay, 2012). Como IGBT3 foi utilizado o modelo IRG4PH40UD cujos valores de operação são $V_{CE}=1200$ V e $I_C=41$ A em uma temperatura de junção igual a 25 °C (International Rectifier, 2006).

A corrente do IGBT3 pode ser menor em relação aos outros, pois ela está limitada pela resistência RD composta por 3 resistores de 470 Ω e 100 W, totalizando uma resistência igual a 1,41 k Ω .

O tempo de carga do capacitor que é acoplado ao sistema fotovoltaico poder ser aproximado pelo valor obtido a partir da Equação 4.2. Esse valor é aproximado, pois nessa equação supõe-se que o sistema fotovoltaico seja uma fonte de corrente ideal (Munõs e Lorenzo, 2006).

$$t = \frac{V_{OC}}{I_{SC}} C \quad (4.2)$$

Considerando os dados medidos para a plotagem da curva da Figura 4.6, é possível construir o gráfico da corrente e tensão em função do tempo de varredura conforme publicado no trabalho de Oliveira, et al., 2014, e reproduzido na Figura 4.8.

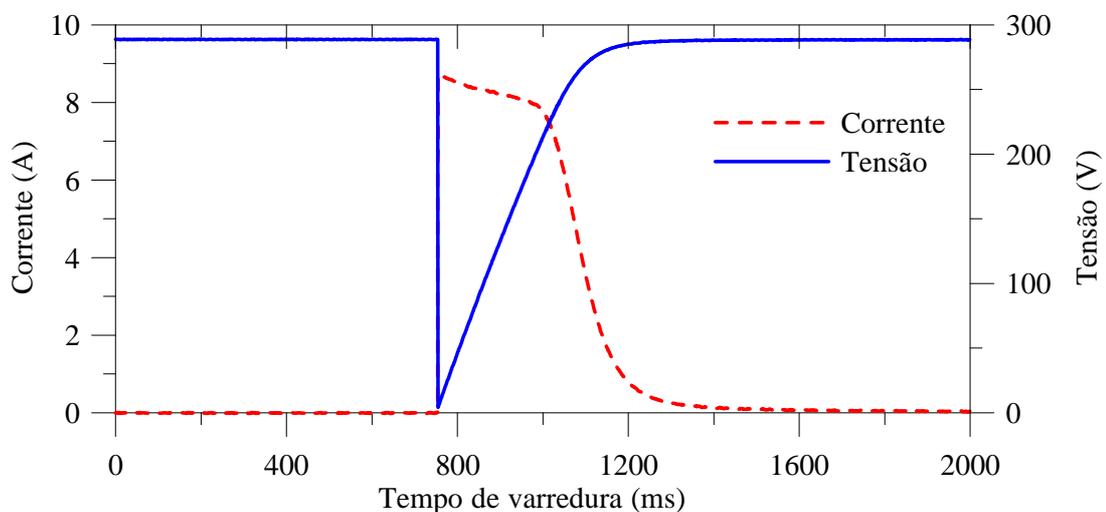
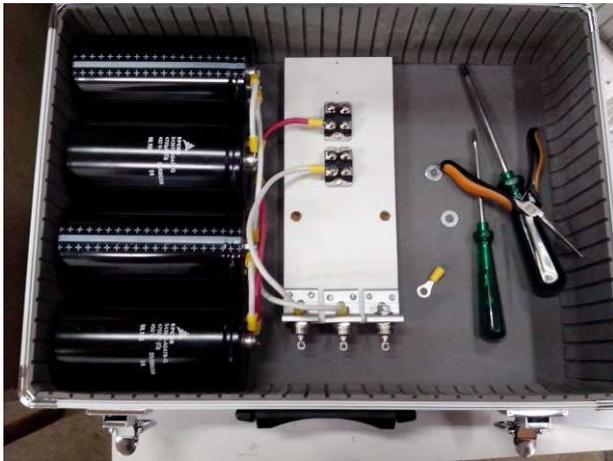


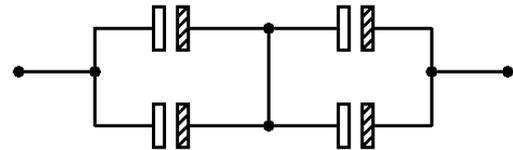
Figura 4.8 – Corrente e tensão em função do tempo de varredura.

Fonte: Adaptado de Oliveira, et al., 2014.

Nesta Figura percebe-se que o tempo de carga do capacitor é superior ao calculado através da Equação 4.2, que resulta no valor de 310 ms. A estimativa desse valor é importante para verificar a compatibilidade com o tempo de aquisição mínimo do sistema de medida. Ou seja, a escolha do capacitor a ser usado deve considerar a corrente e a tensão do arranjo e ainda o tempo de aquisição do sistema de medida. Nesta dissertação foi usada uma associação de 4 capacitores eletrolíticos de $4700\ \mu\text{F} \times 450\ \text{V}$, Figura 4.9, que resulta, nominalmente, em uma capacitância de $4700\ \mu\text{F}$ e um limite de tensão em $900\ \text{V}$.



(a)



(b)

Figura 4.9 – (a) Associação dos capacitores instalados na caixa que abriga o protótipo traçador de curvas e (b) diagrama esquemático da mesma associação.

O acionamento dos IGBTs utiliza um sistema baseado em relés e optoacopladores. Este sistema é necessário, tanto para a proteção dos IGBTs, quanto para a proteção do controlador lógico programável, responsável pela lógica de funcionamento deste sistema. O circuito utilizado é exibido na Figura 4.10 e o circuito montado em uma placa de circuito impresso está exibido na Figura 4.11.

No circuito da Figura 4.7, observa-se que não há nenhuma conexão elétrica em comum entre os IGBTs, dessa forma se faz necessário acionar cada um deles com uma fonte independente. Isto é obtido através dos relés do circuito da Figura 4.10 que são alimentados por duas baterias de $9\ \text{V}$ ligadas em série, resultando em uma tensão de $18\ \text{V}$. No mesmo circuito, os optoacopladores HCPL-3120 são responsáveis pelo correto chaveamento dos IGBTs.

A lógica de operação do circuito de acionamento é dada pela Tabela 4.2. Nesta tabela 0 significa desligado e 1 ligado.

Tabela 4.2 – Lógica de chaveamento dos IGBTs.

Pino digital (Arduino)					IGBT		
33	35	37	39	41	1	2	3
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	1	0	0
0	0	1	0	0	0	1	0
0	1	0	1	0	0	0	1

Conforme pode ser observado, o sistema de potência permite o acoplamento de sistemas fotovoltaicos com tensão de circuito aberto de até 800 V e corrente de curto circuito de até 100 A, considerando a margem de segurança dos IGBTs utilizados.

4.3 Sistema de Medição

O sistema de medição contempla as medidas de tensão, corrente, temperatura e irradiância. A medida de tensão é realizada entre os pontos B e C do diagrama da Figura 4.7 através de um divisor de tensão resistivo. Este divisor pode ser visto na Figura 4.12.

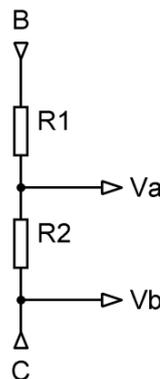


Figura 4.12 – Divisor de tensão resistivo para atenuar a tensão de entrada.

A função do divisor é atenuar a tensão de entrada, vinda do arranjo, em um valor seguro para o conversor analógico-digital (ADC) do controlador lógico programável. Essa atenuação é dada pela Equação 4.3.

$$A = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.3)$$

A determinação dos valores de R1 e R2 depende do valor da tensão de circuito aberto do gerador fotovoltaico, de forma a limitar a 3,3 V a tensão que chega à entrada analógica do controlador lógico programável.

A corrente é medida através da queda de tensão no resistor shunt, RS, ligado em série com o arranjo a ser medido, conforme mostra a Figura 4.7. Neste sistema o shunt usado deve ser dimensionado de acordo com a corrente de curto-circuito do arranjo a ser medido, porém a sua saída deve ser de 60 mV para o fundo de escala, pois o sinal do shunt é amplificado, por um fator fixo, antes de entrar no ADC, pelo circuito amplificador descrito no diagrama da Figura 4.13, cujo principal componente é o amplificador de instrumentação INA122, que possui baixa deriva térmica e baixo offset, sendo seu fator de amplificação (ganho) dado pela Equação 4.4 (Texas Instruments, 1997).

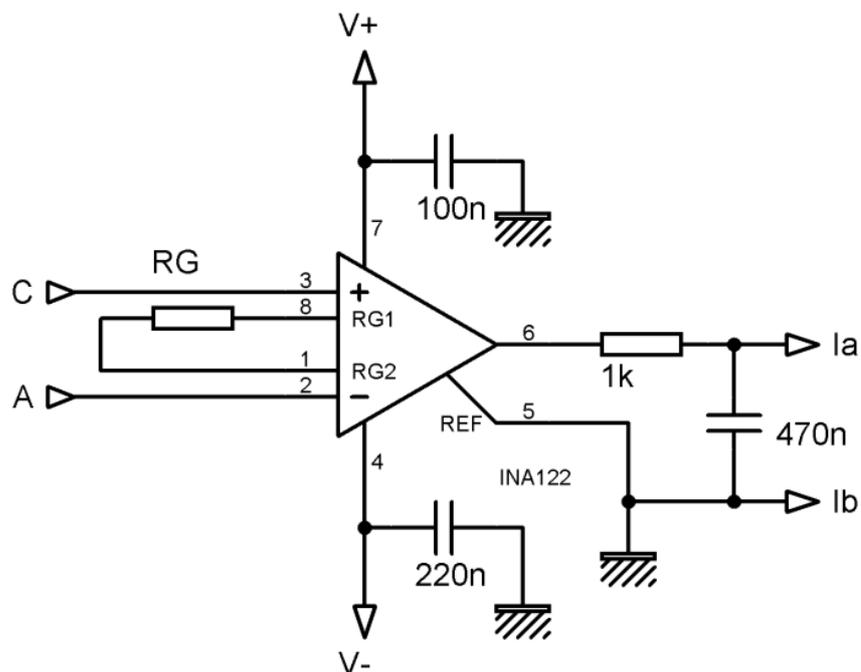


Figura 4.13 – Circuito de amplificação para medida da corrente do arranjo. Os pontos A e C são conectados aos pontos A e C do circuito da Figura 4.7.

Esta etapa de amplificação é necessária para que o fundo de escala do shunt seja o mais próximo possível do fundo de escala do ADC. O ADC usado nesta dissertação possui uma resolução de 10 bits, sendo o seu fundo de escala igual a 3,3 V, dessa forma, o menor valor lido³ pelo conversor é de, aproximadamente, 3,22 mV.

³ A resolução é dada por $3,3 \text{ V} / 1023$.

$$G_A = 5 + \frac{200k}{R_G} \quad (4.4)$$

Para este circuito definiu-se um ganho de, aproximadamente, 55 vezes utilizando-se um resistor R_G de resistência nominal igual a 4,02 K Ω .

A medida da irradiância é realizada com uma célula de referência calibrada, sendo sua constante de calibração igual 0,0459 mV/(W/m²).

Da mesma forma, que para a corrente do arranjo, o sinal elétrico da célula de referência deve ser amplificado, para isso utiliza-se o mesmo circuito da Figura 4.13, porém considerando um ganho de, aproximadamente, 44 vezes.

A placa dos amplificadores pode ser vista na Figura 4.14.

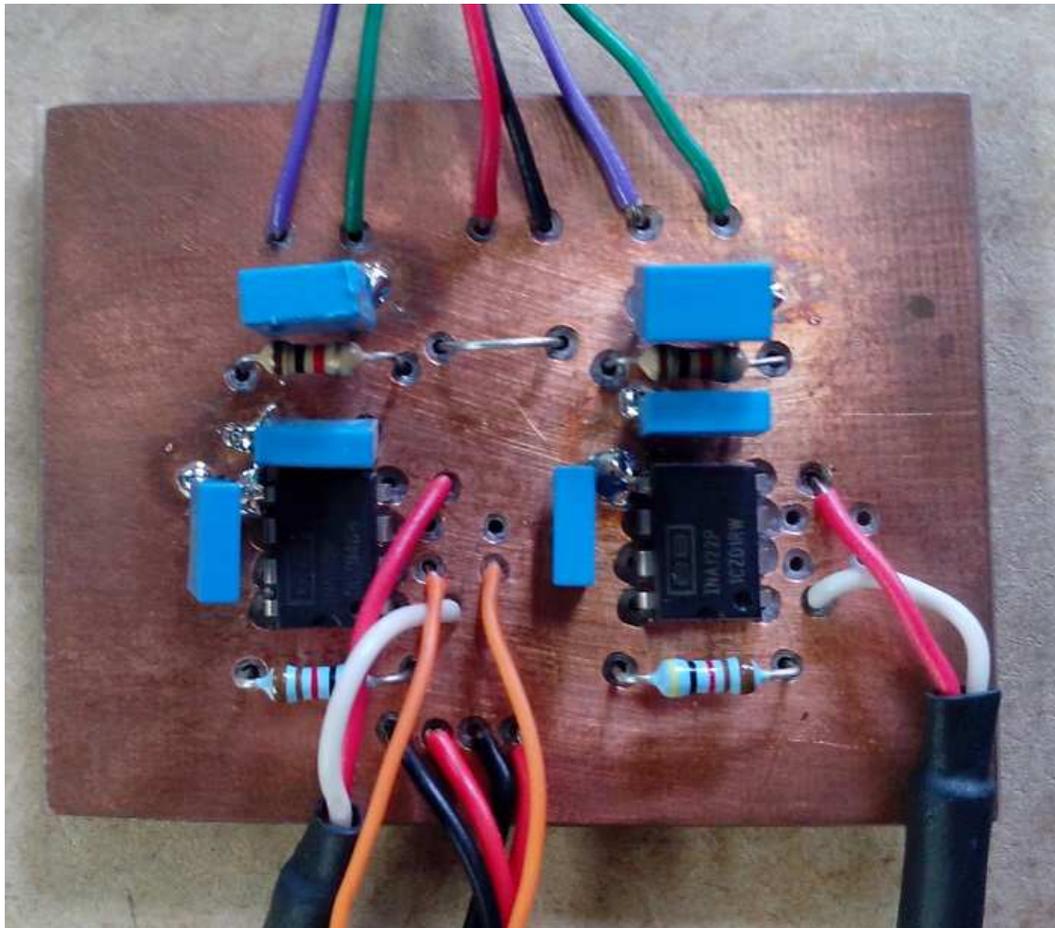


Figura 4.14 – Amplificadores para auxiliar na medida da corrente do gerador fotovoltaico e da irradiância.

Os resistores R_G para os dois amplificadores foram medidos a 4 fios através de um multímetro de 6 ½ dígitos da marca Agilent, modelo 34411A, cujos valores estão expressos

Tabela 4.4 – Descrição das funções dos menus.

Função	Descrição
[1] INÍCIO	Esta função promove a descarga do capacitor através da resistência RD, o tempo de descarga é igual ao produto $5 \times RD \times CX$.
[2] ISC	Esta função produz um curto-circuito no arranjo que esteja conectado e apresenta o valor de I_{SC} no display sem iniciar uma varredura.
[3] VOC	Esta função permite medir a tensão de circuito aberto do arranjo conectado ao sistema.
[4] TEMPERATURA	Esta função mede a temperatura da célula e apresenta o valor no display.
[5] IRRADIÂNCIA	Esta função mede a irradiância e apresenta o valor no display.
[6] NUMERO DE MEDIDAS	Esta função permite definir o número de pontos a serem gravados durante a varredura, variando de 50 a 1000 pontos.
[7] TEMPO	Esta função permite alterar o tempo entre 2 medidas consecutivas
[8] AQUISIÇÃO	Esta função permite fazer a aquisição dos pontos da curva característica. Antes da aquisição promove uma carga reversa no capacitor e depois da aquisição descarrega-o, permitindo que seja realizada uma nova aquisição. Os dados de cada aquisição são salvos no cartão de memória.
[9] SAIR	Volta para função início.



Figura 4.16 – Painel de controle do protótipo.

Os dados obtidos pela varredura, primeiramente, são salvos na memória interna da placa Arduino e posteriormente transferidos para o cartão de memória. Cada varredura grava um arquivo, no formato de valores separados por vírgulas (csv), com dados de tempo, tensão, corrente, temperatura e irradiância, usados posteriormente para processamento através de uma planilha eletrônica.

5 RESULTADOS

Os resultados apresentados neste capítulo abrangem dois aspectos: (1) a determinação dos erros sistemáticos e aleatórios do sistema de medida; (2) a comparação da curva medida com o protótipo do equipamento proposto com a medida usando um equipamento de referência.

5.1 Determinação dos Erros Sistemáticos e Aleatórios

Os erros sistemáticos e aleatórios foram determinados usando métodos estatísticos a partir de medições realizadas com o protótipo em comparação com valores medidos com instrumentos calibrados.

O erro sistemático tende a se manter constante, sendo seu efeito passível de ser compensado no resultado da medição, pois ele demonstra uma tendência do sistema de medição em atribuir um valor superior (ou inferior) ao valor verdadeiro do que está sendo medido. A tendência é a estimativa desse erro e pode ser obtida através de medidas sucessivas de um mensurando do qual se tem uma estimativa do seu valor verdadeiro – chamado valor verdadeiro convencional. A tendência é calculada a partir da diferença entre a média de medições repetitivas de um mensurado e o seu valor verdadeiro convencional. A correção do erro sistemático é atingida trocando-se o sinal da tendência e somando à indicação do sistema de medição (Albertazzi e Souza, 2008).

A combinação de diversos fatores aleatórios no processo de medição resulta no erro aleatório. A incerteza-padrão é a medida da intensidade deste erro e corresponde ao desvio-padrão σ de uma distribuição normal. Outro indicativo do erro aleatório é a repetitividade, também chamada de incerteza expandida U , que corresponde a metade do valor da faixa em que este erro é esperado. A repetitividade é associada a uma probabilidade que indica as chances do erro aleatório estar nesta faixa. Para a distribuição normal a faixa correspondente a $\pm 2\sigma$, indica que há a probabilidade de 95,45 % do erro aleatório estar contido nessa faixa.

O desvio-padrão experimental u é uma estimativa do desvio-padrão da população e é obtido a partir de um número finito de medições repetidas, sendo a incerteza-padrão, neste caso, associada ao número de graus de liberdade, que corresponde ao número de medidas repetidas menos 1. Neste caso a incerteza expandida é determinada usando-se o coeficiente t_S de Student de acordo com a Equação 5.1 (Albertazzi e Souza, 2008).

$$U = t_s \cdot u \quad (5.1)$$

onde t_s é o coeficiente da distribuição t de Student.

5.1.1 Determinação dos Erros para Tensão

Para determinar os erros sistemáticos e aleatórios para tensão, utilizou-se uma fonte Kepco, modelo BOP 100-10MG, operando como fonte de tensão e a leitura da tensão foi realizada com um multímetro Agilent, modelo 34411A de 6 ½ dígitos. O valor da leitura do multímetro foi considerado o valor verdadeiro convencional para tensão V_{VC} .

Foram realizadas 1000 medidas para cada uma das 10 faixas de tensão (10 V a 100 V) usadas para o levantamento dos dados e, a partir desses, determinam-se: o valor médio da tensão $V_{médio}$, a incerteza-padrão u_V , a tendência Td_V , a correção C_V e a incerteza expandida U_V para o intervalo de confiança de 95,45 %. Estes resultados estão resumidos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Resumo dos dados estatísticos para a tensão.

V_{VC} [V]	$V_{médio}$ [V]	u_V [V]	Td_V [V]	C_V [V]	U_V [V]
10,00	9,68	0,14	- 0,32	0,32	0,28
20,00	19,62	0,14	- 0,38	0,38	0,28
30,00	29,58	0,13	- 0,42	0,42	0,26
40,00	39,54	0,13	- 0,46	0,46	0,26
50,00	49,54	0,14	- 0,46	0,46	0,28
60,00	59,51	0,15	- 0,49	0,49	0,30
70,00	69,52	0,14	- 0,48	0,48	0,28
80,00	79,53	0,13	- 0,47	0,47	0,26
90,00	89,50	0,12	- 0,50	0,50	0,24
100,00	99,50	0,14	- 0,50	0,50	0,28

O valor da tensão V , considerando os erros sistemáticos e aleatórios, é determinado a partir da Equação 5.2.

$$V = V_{medido} + C_V \pm U_V \quad (5.2)$$

onde V_{medido} é a leitura dada pelo protótipo.

Para abranger o valor máximo dos erros inerentes ao instrumento, considerou-se o valor médio da correção $C_V=0,45$ V e a maior incerteza expandida $U_V=0,30$ V obtidos a partir

dos dados coletados. O erro sistemático está expresso pela correção C_V e o erro aleatório pela incerteza expandida U_V .

É possível observar que o maior erro relativo apresentado reside na faixa de tensão mais baixa, sendo igual a 4,6% e o menor, 0,46% na faixa mais alta, portanto a incerteza expandida do sistema será expressa em valores absolutos de tensão.

5.1.2 Determinação dos Erros para Corrente

Para determinar os erros para a corrente, os mesmos instrumentos empregados para tensão foram utilizados, porém com a fonte operando no modo corrente, e, ainda, um resistor shunt da marca Yokogawa de $0,01 \Omega$, classe 75 ppm, no qual foi medida a queda de tensão. Da mesma forma que para tensão, a leitura do multímetro é considerada como valor verdadeiro convencional, porém para a corrente, denominado I_{VC} . A Tabela 5.2 resume os dados estatísticos para 1000 medidas de corrente para cada uma das 10 faixas (1 A a 10 A) considerando o intervalo de confiança de 95,45 %.

Tabela 5.2 – Resumo dos dados estatísticos para a corrente.

I_{VC} [A]	$I_{médio}$ [A]	u_I [A]	Td_I [A]	C_I [A]	U_I [A]
1,00	0,99	0,03	- 0,01	0,01	0,06
2,00	1,99	0,02	- 0,01	0,01	0,04
3,00	3,00	0,01	0,00	0,00	0,02
4,00	4,01	0,01	0,01	- 0,01	0,02
5,00	5,01	0,02	0,01	- 0,01	0,04
6,00	6,02	0,03	0,02	- 0,02	0,06
7,00	7,02	0,05	0,02	- 0,02	0,10
8,00	8,03	0,06	0,03	- 0,03	0,12
9,00	9,03	0,07	0,03	- 0,03	0,14
10,00	10,04	0,09	0,04	- 0,04	0,18

Com base nos dados da Tabela 5.2, define-se a incerteza expandida igual ao maior valor apresentado $U_I=0,18$ A. A correção, por ter um valor abaixo da incerteza expandida, será desconsiderada.

$$I = I_{medido} \pm U_I \quad (5.3)$$

O valor da corrente fica determinado de acordo com a Equação 5.3, onde I_{medido} é a

leitura de corrente fornecida pelo protótipo.

5.1.3 Determinação dos Erros para Temperatura

Na determinação dos erros para temperatura, foi utilizado um banho termostático da marca Lauda, modelo Eco-RE 620, onde foi imerso o sensor de temperatura. Considerou-se como valor verdadeiro convencional de temperatura T_{VC} , o fornecido por este equipamento. Neste ensaio utilizaram-se 9 faixas (10 °C a 90 °C), sendo medidos 1000 pontos em cada uma delas. A Tabela 5.3 fornece o resumo dos dados estatísticos referentes à temperatura considerando o intervalo de confiança de 95,45 %.

Tabela 5.3 – Resumo dos dados estatísticos para a temperatura.

T_{VC} [°C]	$T_{médio}$ [°C]	u_T [°C]	Td_T [°C]	C_T [°C]	U_T [°C]
10,0	8,9	0,2	- 1,1	1,1	0,4
20,0	19,1	0,2	- 0,9	0,9	0,4
30,0	29,1	0,2	- 0,9	0,9	0,4
40,0	39,2	0,2	- 0,8	0,8	0,4
50,0	49,3	0,2	- 0,7	0,7	0,4
60,0	59,3	0,1	- 0,7	0,7	0,2
70,0	69,3	0,1	- 0,7	0,7	0,2
80,0	79,5	0,2	- 0,5	0,5	0,4
90,0	89,5	0,2	- 0,5	0,5	0,4

De acordo com a tabela, ficou definido como correção $C_T=0,8$ °C, que se refere às médias das correções obtidas, e a incerteza expandida $U_T=0,4$ °C. Dessa forma o valor da temperatura fica expresso através da Equação 5.4.

$$T = T_{medido} + C_T \pm U_T \quad (5.4)$$

onde T_{medido} é a leitura dada pelo protótipo.

5.1.4 Determinação dos Erros para Irradiância

A determinação dos erros relacionados à medida da irradiância é realizada a partir do levantamento da incerteza elétrica desse canal de medição, composto pelo amplificador de instrumentação e o conversor analógico-digital da placa Arduino e pela incerteza da célula utilizada como sensor.

Para determinar a incerteza elétrica do canal de medição, foi utilizada uma fonte de precisão e um multímetro de 6 ½ dígitos. Como o canal utilizado mede tensão, foram medidos 1000 pontos para cada uma das 10 faixas de tensão (5 mV a 50 mV), onde a leitura dada pelo multímetro é considerada como valor verdadeiro convencional, $V_{VC,G}$. Na Tabela 5.4 estão resumidos os dados estatísticos obtidos para o canal de medição da irradiância considerando o intervalo de confiança de 95,45 %.

Tabela 5.4 – Resumo dos dados estatísticos para o canal de medição do canal da irradiância.

$V_{VC,G}$ [mV]	$V_{médio,G}$ [mV]	u_G [mV]	Td_G [mV]	C_G [mV]	U_G [mV]
5,00	4,71	0,04	- 0,29	0,29	0,08
10,00	9,81	0,03	- 0,19	0,19	0,06
15,00	14,88	0,04	- 0,12	0,12	0,08
20,00	19,91	0,04	- 0,09	0,09	0,08
25,00	24,99	0,03	- 0,01	0,01	0,06
30,00	30,03	0,03	0,03	- 0,03	0,06
35,00	35,08	0,03	0,08	- 0,08	0,06
40,00	40,11	0,04	0,11	- 0,11	0,08
45,00	45,14	0,04	0,14	- 0,14	0,08
50,00	50,19	0,04	0,19	- 0,19	0,08

Por conveniência, na análise de erros desse canal de medição, será considerado o erro máximo, cujo valor é $E_{máx}=0,37$ mV. Este valor expressa a incerteza elétrica absoluta.

A incerteza da célula de referência, utilizada nessa dissertação, é igual a 2 % e sua constante de calibração é de 45,9 mV a 1000 W/m^2 . Dessa forma sua incerteza absoluta é 0,92 mV. Associando as duas incertezas, chega-se a incerteza de $\omega_G=22 \text{ W/m}^2$ para a irradiância. A Equação 5.5 expressa o valor da irradiância.

$$G = G_{medido} \pm \omega_G \quad (5.5)$$

onde G_{medido} é a leitura dada pelo protótipo.

Dispositivos fotovoltaicos tem sua resposta dependente do espectro da radiação incidente, sendo assim outra fonte de erro é o descasamento espectral entre a célula de referência e o dispositivo fotovoltaico e sua correção necessita de informações sobre espectro da radiação que incide além da necessidade de conhecer a resposta espectral tanto da célula de

referência como do dispositivo fotovoltaico que está sendo caracterizado. Neste trabalho de dissertação este erro foi desconsiderado, pois foi empregada uma célula de referência de mesma tecnologia dos módulos usados para os testes.

5.2 Comparação de Resultados na Curva Característica e na Potência

Para analisar o comportamento do protótipo desenvolvido na medição de curvas I-V, foi montado um sistema de geração fotovoltaica composto por uma série de 3 módulos da marca Yingli Solar, modelo YL245P-29b, cujas especificações elétricas para condição de $G=1000 \text{ W/m}^2$, $T_{\text{Cel}}=25 \text{ }^\circ\text{C}$ e espectro AM 1,5, estão listadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Parâmetros elétricos informados pelo fabricante do módulo YL245P-29b.

Parâmetro	Valor
P_M	245 W
V_{OC}	37,8 V
I_{SC}	8,63 A
V_{MP}	30,2 V
I_{MP}	8,11 A

A série de módulos foi instalada no terraço do prédio que abriga o simulador solar do LABSOL, conforme mostra a Figura 5.1.

A energia elétrica gerada pela série foi conduzida para o interior do prédio por 4 condutores que são ligados a 4 bornes numa caixa de conexão, permitindo fácil acoplamento com o sistema de medição, conforme mostra a Figura 5.2.

A fim de comparar as medidas realizadas com o protótipo, foi utilizado o sistema traçador de curvas adotado no LABSOL para ensaios *outdoor* de módulos fotovoltaicos submetidos à certificação junto ao INMETRO. Este sistema, descrito no trabalho de Gasparin, 2009, foi desenvolvido de forma a atender a norma técnica NBR 12136 (ABNT, 1991), sendo assim, suas medidas foram consideradas como referência neste capítulo. Na Figura 5.3 podem ser vistos os equipamentos que integram este sistema.

O sistema traçador de curvas do LABSOL foi projetado para ensaiar módulos usando a metodologia de 4 fios, isto é, usa 2 condutores para polarizar o módulo e outros 2 para medir a tensão ao longo do traçado da curva. Esta metodologia permite reduzir erros sistemáticos na medida da tensão.



Figura 5.1 – Instalação da série de módulos usada para testes (3 módulos da fileira inferior).

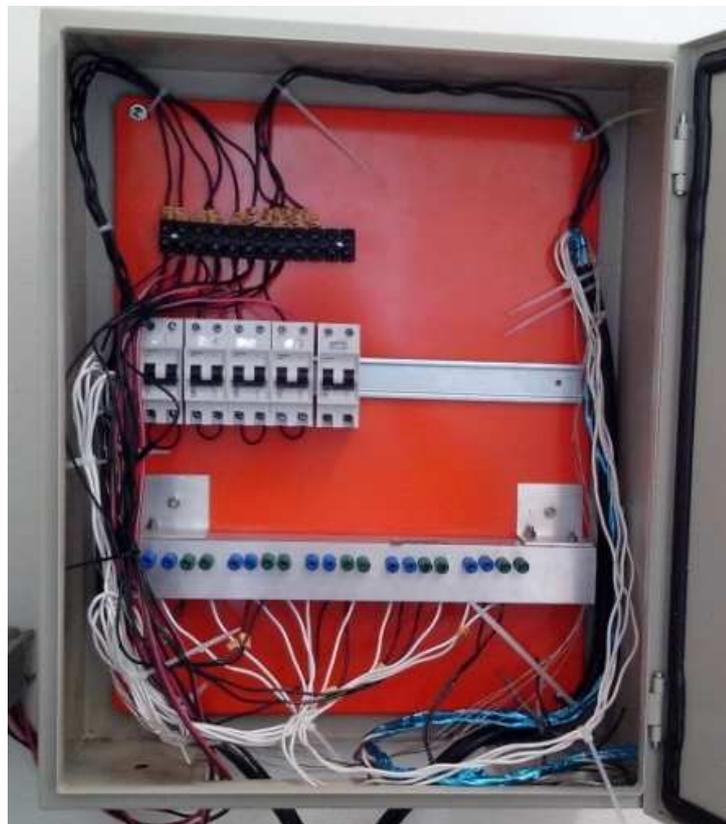


Figura 5.2 – Bornes de conexão.



Figura 5.3 – Sistema de medição de curvas características de módulos fotovoltaicos utilizado no LABSOL. Fonte: Gasparin, 2009.

Entretanto o protótipo desenvolvido nesta dissertação utiliza apenas 2 fios para o traçado da curva característica, mas não é por este fato que sua qualidade é diminuída, pois seu propósito é medir curvas de arranjos fotovoltaicos em campo, onde a utilização de 4 fios para medição se torna, em alguns casos, inviável frente ao fato que, muitas vezes, o acesso elétrico ao sistema gerador está em uma *string box*, ou na caixa de conexões do inversor. A Figura 5.4 um exemplo de *string box* e a Figura 5.5 esquematiza a ligação de um traçador de curvas comercial quando o acesso está na caixa de conexões do inversor.

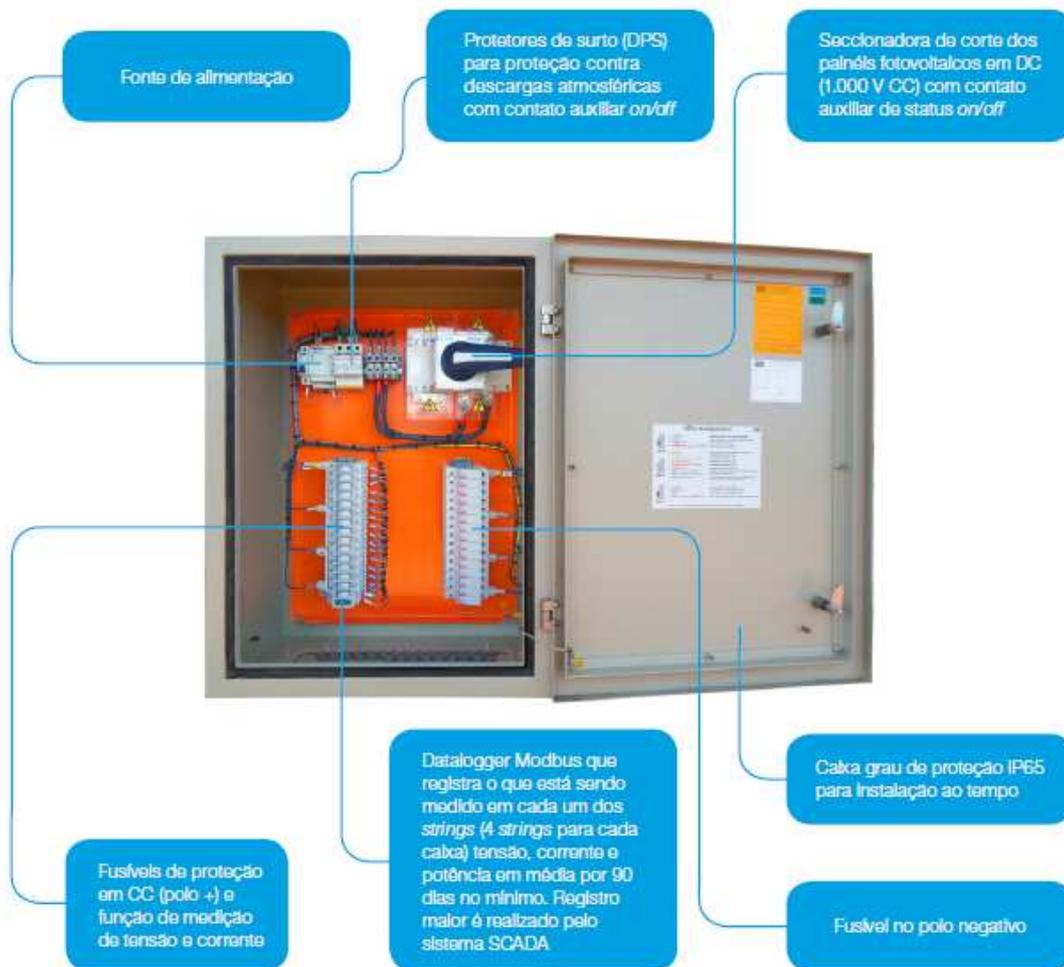


Figura 5.4 – Exemplo de uma *String Box* . Fonte: WEG, 2014.

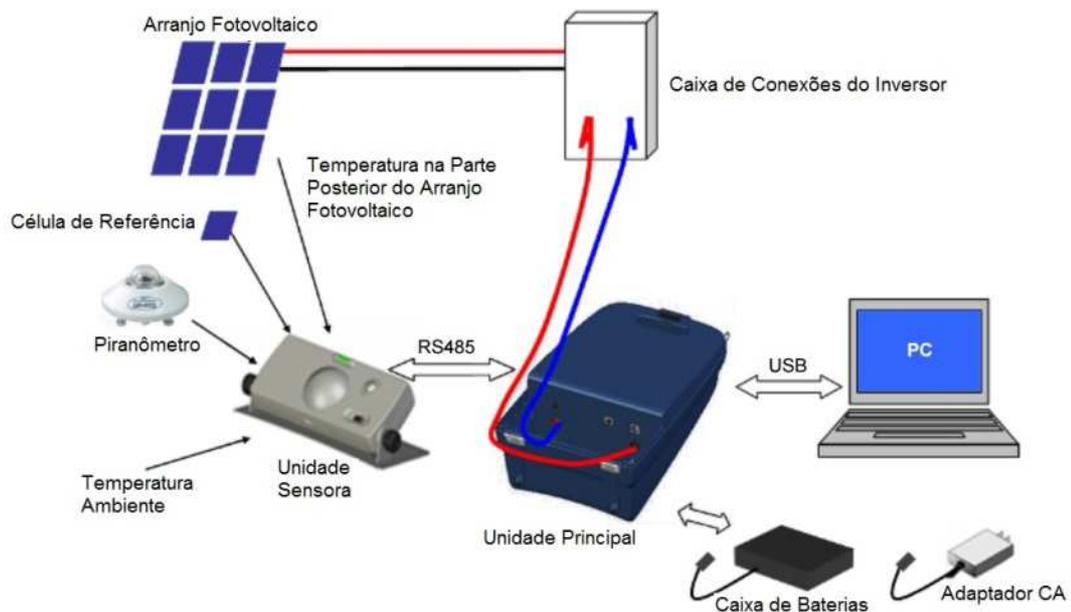


Figura 5.5 – Esquema de conexão do traçador de curvas MP-11 para medição da curva I-V de um arranjo fotovoltaico. Fonte: Adaptado de Eko, 2014.

Para os testes, já que a instalação permitiu, foram levantadas as curvas da série de módulos com o sistema do LABSOL usando tanto a metodologia de 4 fios como a de 2 fios e estas foram comparadas com a levantada pelo protótipo, que utiliza 2 fios. Ainda, para que a caracterização fosse completa, foram instaladas duas células de referência no mesmo plano dos módulos, sendo uma para cada sistema traçador de curva e também foram instalados os sensores de temperatura na face posterior do módulo central da série de módulos.

A Figura 5.6 e a Figura 5.7 mostram as curvas I-V e P-V, respectivamente, levantadas com os dois sistemas no dia 19 de março de 2015. Este dia foi escolhido porque apresentou-se sem nebulosidade, entretanto por estar medindo-se o mesmo conjunto de módulos, as medidas não foram simultâneas entre os dois sistemas e dessa forma ocorreu uma pequena variação na irradiância necessitando que as curvas fossem normalizadas para a comparação.

De forma qualitativa percebe-se que os dois sistemas, quando medem a 2 fios, apresentam uma boa aproximação entre os pontos medidos, diferente do que acontece quando ambas medidas são comparadas com a medida a 4 fios realizada pelo sistema do LABSOL, onde percebe-se, nitidamente, um incremento da potência. Isso é devido à metodologia a 4 fios compensar a queda de tensão ao longo dos condutores quando a série esta sendo polarizada durante a varredura.

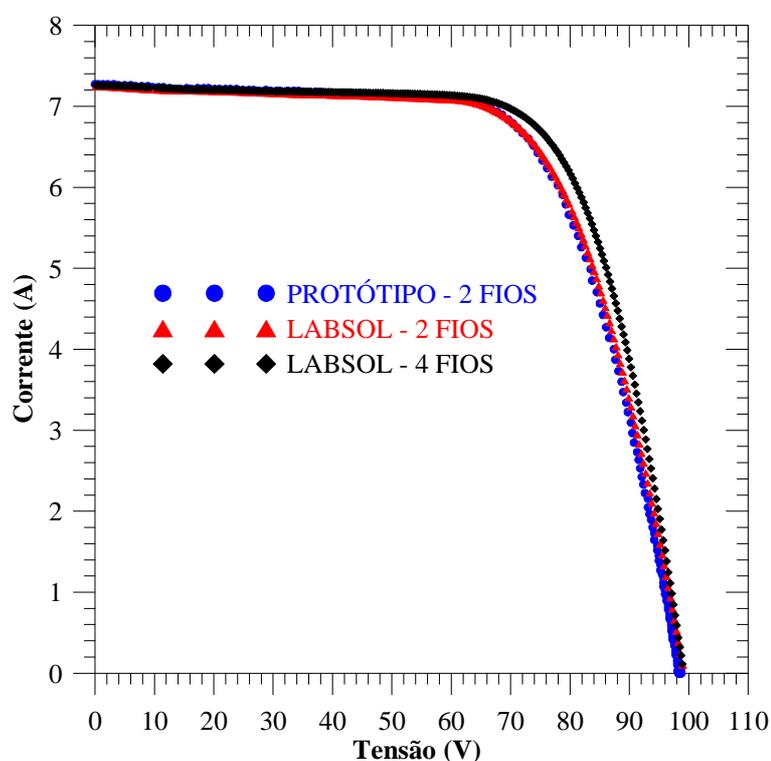


Figura 5.6 – Curvas I-V medidas com o PROTÓTIPO, o sistema do LABSOL a 2 fios e a 4 fios sob as mesmas condições de temperatura, irradiância e espectro solar.

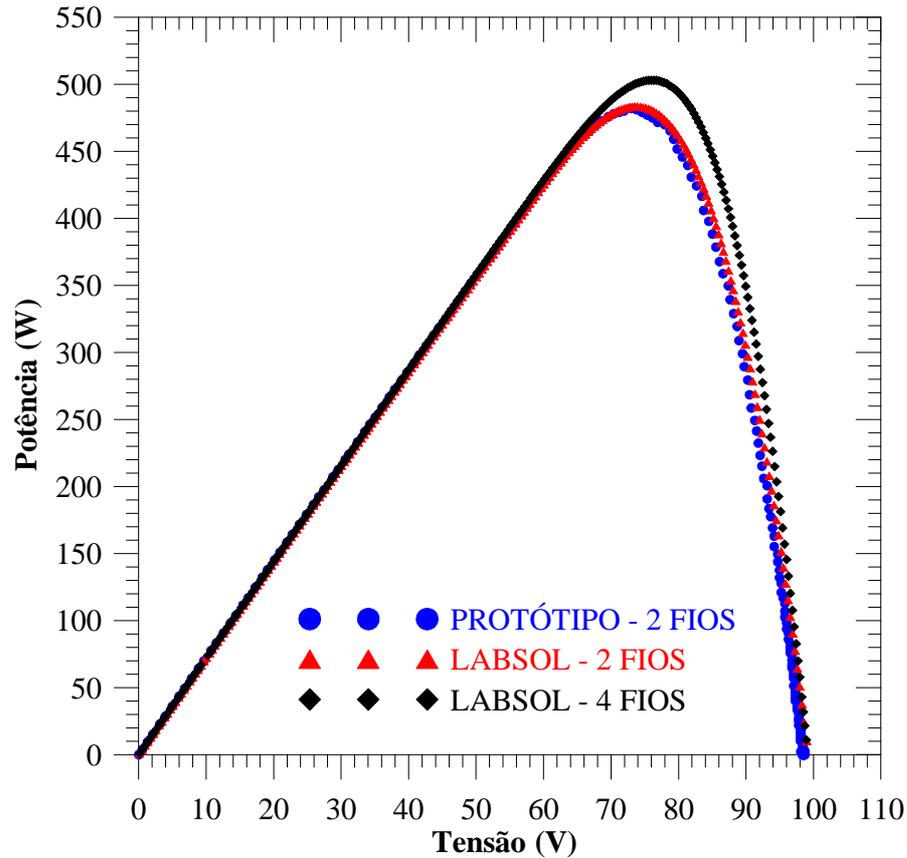


Figura 5.7 – Curvas P-V obtidas com o PROTÓTIPO, o sistema do LABSOL a 2 fios e a 4 fios sob as mesmas condições de temperatura, irradiância e espectro solar.

A Tabela 5.6 traz a comparação dos resultados obtidos com o sistema LABSOL a 2 fios e o protótipo.

Tabela 5.6 – Comparação entre as características elétricas da série de módulos levantadas com o sistema do LABSOL a 2 fios e o protótipo nas condições de $G=815 \text{ W/m}^2$,

$T_{\text{Cel}}=58,9 \text{ }^\circ\text{C}$ e AM 1,5.

	LABSOL (2 Fios)	PROTÓTIPO	Diferença
I_{SC}	7,24 A	7,27 A	0,41 %
V_{OC}	99,24 V	98,64 V	0,60 %
V_{M}	73,48 V	72,67 V	1,10 %
I_{M}	6,58 A	6,61 A	0,45 %
P_{M}	483,42 W	480,63 W	0,57 %
FF	0,67	0,67	---

A Tabela 5.7 traz a comparação dos resultados obtidos com o sistema LABSOL a 4

fios e o protótipo

Tabela 5.7 – Comparação entre as características elétricas da série de módulos levantadas com o sistema do LABSOL a 4 fios e o protótipo nas condições de $G=815 \text{ W/m}^2$, $T_{\text{Cel}}=58,9 \text{ }^\circ\text{C}$ e AM 1,5.

	LABSOL (4 Fios)	PROTÓTIPO	Diferença
I_{SC}	7,26 A	7,27 A	0,13 %
V_{OC}	99,17 V	98,64 V	0,53 %
V_M	75,78 V	72,67 V	4,10 %
I_M	6,64 A	6,61 A	0,45 %
P_M	503,20 W	480,63 W	4,48 %
FF	0,70	0,67	---

Através dos resultados apresentados pela Tabela 5.6, percebe-se que nenhum parâmetro elétrico de importância da curva I-V da série de módulos apresentou uma diferença superior 2 % entre a medição com o sistema de referência (usando 2 fios) e o protótipo, o que se demonstra razoável, dada a proposta de construção e o objetivo de aplicação do equipamento. Pela análise da Tabela 5.7, entretanto, verifica-se uma diferença significativa entre a máxima potência, próxima a 5 %, obtida com o sistema do LABSOL (usando 4 fios) e o protótipo.

Certamente que utilizar 4 fios em um equipamento traçador de curvas traz mais confiabilidade na caracterização de um sistema fotovoltaico de geração, mas em uma usina fotovoltaica se o interesse for verificar o comportamento do gerador fotovoltaico na entrada do inversor, o sistema traçador a 2 fios é satisfatório.

5.3 Comparação de Resultados na Correção da Curva para uma Condição de Referência

Para fazer uma comparação com a curva I-V e de potência em outro momento, por exemplo, para comparar com a potência no dia da instalação dos módulos, é necessário transladar os pontos da curva a serem comparados para condições de irradiância e temperatura comuns. Assim, para que a determinação da curva característica tenha plena validade é necessário registrar temperatura e irradiância como condição de medida.

Esta translação pode ser executada através de *softwares* especializados que incluem algoritmos para calcular ponto a ponto a curva característica em outras condições

operacionais. Um equipamento traçador de curvas comercial deveria ser acompanhado de um *software* apropriado para executar esta tarefa.

5.4 Comparação de Curvas com Anomalias

Outro teste de desempenho do protótipo foi de avaliar a capacidade de acompanhar mudanças bruscas e suaves no traçado da curva I-V. Para isso foram sombreadas algumas células parcialmente e outras completamente nos módulos que compõem a série de módulos usada nesta dissertação. A Figura 5.8 mostra o comportamento da curva I-V medida com o protótipo e o sistema do LABSOL, tanto a 2 fios, como a 4 fios.

Conforme se observa na Figura 5.8 o protótipo apresenta uma boa concordância com o traçado da curva levantada com o sistema do LABSOL a 2 fios e de forma geral se mostra adequado para verificar defeitos na curva I-V.

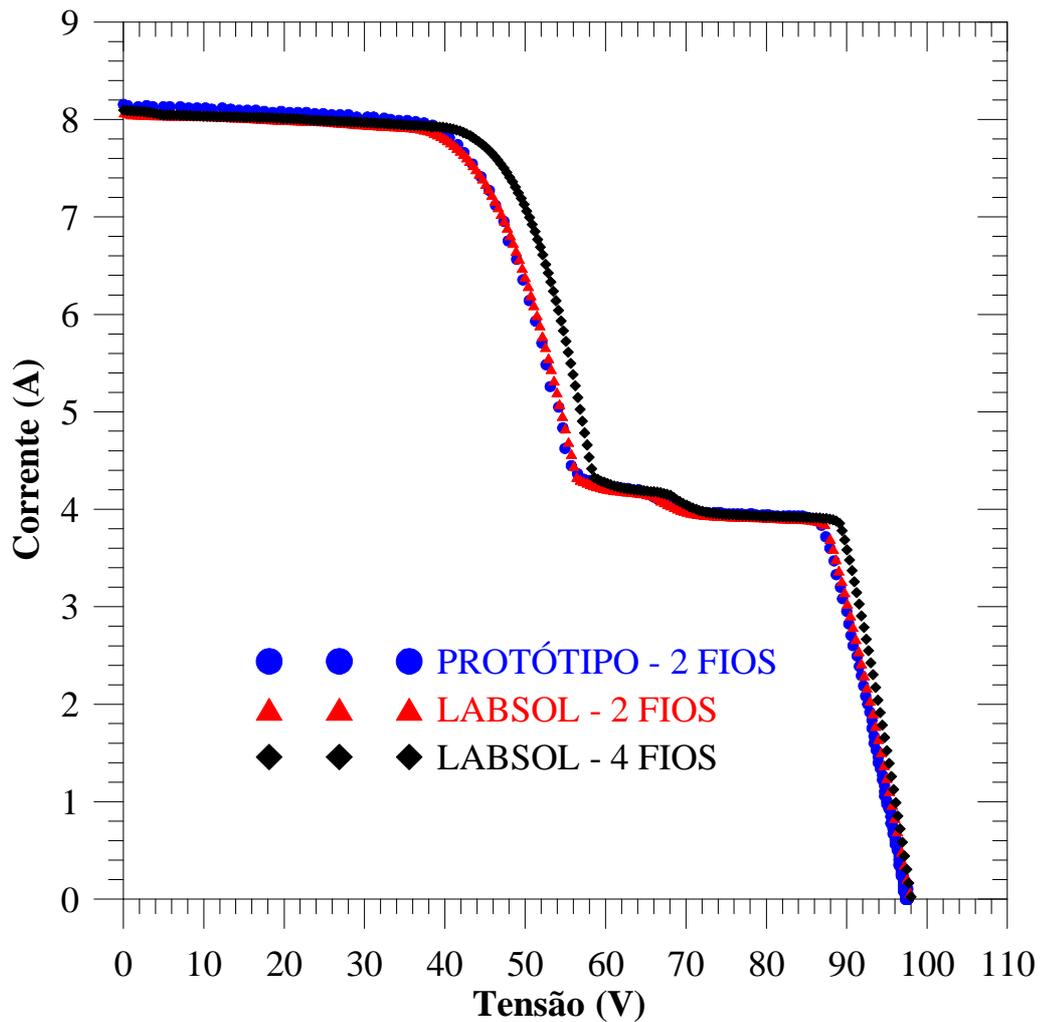


Figura 5.8 – Curvas medidas quando causado sombreamento nas células dos módulos que compõem a série.

A Figura 5.9 destaca o comportamento da curva I-V medida com o protótipo.

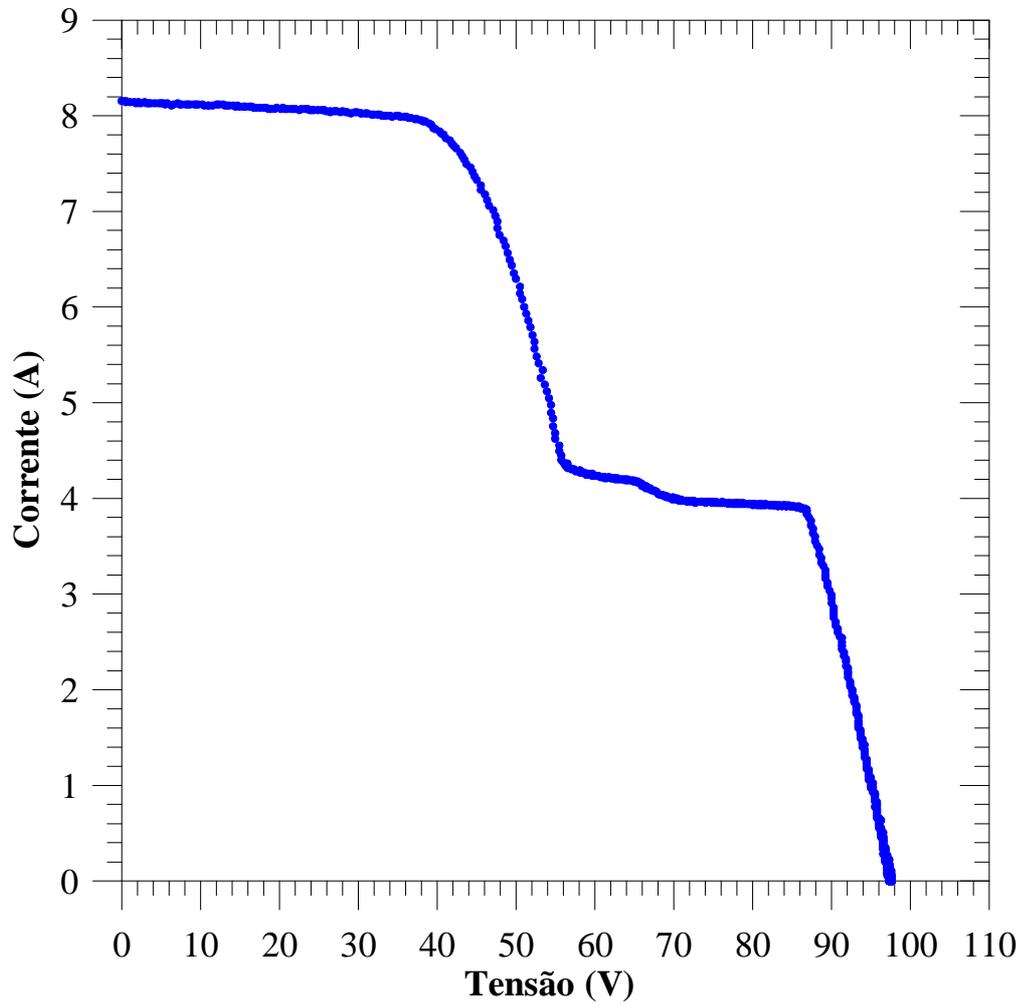


Figura 5.9 – Curva medida com o protótipo quando causado sombreamento nas células dos módulos que compõem a série.

6 CONCLUSÕES

Esta dissertação descreveu a construção de um protótipo destinado a medir a curva I-V de arranjos fotovoltaicos em campo, tendo como atributos a portabilidade, a capacidade de ser operado sem uso do computador além de apresentar qualidade no que tange ao diagnóstico e detecção de falhas.

Como técnica de polarização para geradores fotovoltaicos, foram usados capacitores chaveados por transistores IGBT, que, de acordo com os testes realizados, se mostrou eficaz, permitindo que fossem adquiridos pontos desde a corrente de curto-circuito até a tensão de circuito aberto.

O controle dos IGBTs foi realizado através da placa Arduino, onde uma rotina de operação foi implantada, tornando o uso do protótipo fácil e intuitivo.

Para completa caracterização, foram construídos circuitos para auxiliar na medida da irradiância e o sensor LM35 foi aplicado na medida da temperatura, trazendo resultados satisfatórios em ambas as medidas.

Para a aquisição de dados, a mesma placa Arduino foi aplicada, mostrando-se eficiente e sendo capaz de medir 1000 pontos em, aproximadamente, 200 ms com razoável qualidade quando comparados com um sistema que adota multímetros comerciais de alta exatidão.

As curvas medidas de uma série de módulos instalada em um dos prédios do LABSOL, apresentaram boa concordância com as medidas com o sistema utilizado no LABSOL para ensaios *outdoor* de módulos. As diferenças entre os dois sistemas foram inferiores a 2 % quando a curva levantada pelo protótipo foi comparada com o sistema do laboratório medindo a 2 fios e inferior a 5 % quando comparada com a medida a 4 fios.

O protótipo mostrou-se capaz de acompanhar mudanças bruscas e suaves no traçado da curva I-V, quando na série de módulos foram sombreadas algumas células, havendo boa concordância com o sistema do LABSOL.

De forma geral, pode-se concluir que o protótipo desenvolvido, embora necessitando melhorias para se tornar um instrumento comercial, apresenta resultados confiáveis e adequados para a medida em campo da curva I-V de arranjos fotovoltaicos.

Para continuidade em trabalhos futuros, algumas sugestões são apresentadas abaixo:

- Testar outros sistemas de controle e aquisição de dados diferentes da placa

Arduino.

- Substituir o shunt utilizado para medir a corrente por outro dispositivo que desacople o sistema de medida do arranjo e da mesma forma para a tensão, substituindo o divisor resistivo.
- Implantar um sistema de mudança de faixa de tensão e corrente de acordo com a necessidade de cada medida.
- Mudar a configuração do sistema e permitir a opção de medida a 4 fios.
- Implantar um sistema que permita visualizar a curva I-V e seus parâmetros sem a necessidade de processamento posterior dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abete, A.; Ferraro, G. A Method for Measurements of the Photovoltaic Cell or Module Current-Voltage Characteristics. **Solar Cells**, v.28, p. 335-342, 1990.

Albertazzi, A.; Sousa, A. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. 1.ed. Barueri: Manole, 2008.

Almeida, M. **Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. São Paulo: Dissertação de Mestrado, 2012.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Banco de Informações de Geração: capacidade de geração do Brasil**. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 14 março 2015.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Chamada N° 013/2011**: projeto estratégico: arranjos técnicos comerciais para inserção da geração fotovoltaica na matriz energética brasileira. Brasília, DF, 2011. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/PeD_2011-ChamadaPE13-2011.pdf>. Acesso em: 02 março 2015.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa N° 482, de 17 de abril de 2012. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 76, 19 abril 2012. Seção 1, p. 53. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/pubren2012482.pdf>>. Acesso em: 02 março 2015.

Arduino. **Arduino Due**. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDue>>. Acesso em: 02 março 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 12136**: Módulos fotovoltaicos – determinação de características fotoelétricas – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 16274**: Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho. Rio de Janeiro, 2014.

Boylestad, R.; Nashelsky, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 6.ed. [SI]: Livros Técnicos e Científicos, 1999.

BRASIL. **Decreto nº 5.025, de 30 de março de 2004**. Regulamenta o inciso I e os §§ 1º, 2º, 3º, 4º e 5º do art. 3º da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, no que dispõem sobre o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica - PROINFA, primeira etapa, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5025.htm>. Acesso em: 02 março 2015.

Bühler, A. **Estudo de Técnicas de Determinação Experimental e Pós-Processamento de Curvas Características de Módulos Fotovoltaicos**. Porto Alegre: Tese de Doutorado, 2011.

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Info Leilão**: 6º leilão de energia de reserva. [S.l.], 2014. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br>>. Acesso em: 02 março 2015.

Daystar. **DS-1000 PV I-V Curve Tracer User Manual**. New México, 2014. Disponível em: <<http://www.daystarpv.com/DS1000.pdf>>. Acesso em: 02 março 2015.

Eko Instruments. **I-V Curve Checker MP-11 Instruction Manual**. Tokyo, 2014. Disponível em: <<http://eko-eu.com/files/MP-11Manual20141113V4.pdf>>. Acesso em: 02 março 2015.

ELETROBRAS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Medição das Usinas do Proinfra: geração líquida mensal rateada por contrato**. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://www.eletrabras.com/elb/Proinfra/data/Pages/LUMISABB61D26PTBRIE.htm>>. Acesso em: 02 março 2015.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2022**. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/PDEE/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202022.pdf>>. Acesso em: 04 dezembro 2014.

EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas. **Resenha Mensal do Mercado de Energia**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/ResenhaMensal/Resenha%20Mensal%20do%20Mercado%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%20-%20Dezembro%202014.pdf>>. Acesso em: 07 maio 2015.

Gasparin, F.P. **Desenvolvimento de um Traçador de Curvas Características de Módulos Fotovoltaicos**. Porto Alegre: Dissertação de Mestrado, 2009.

International Rectifier. **Insulated Gate Bipolar Transistor With Ultrafast Soft Recovery Diode IRG4PH40UD Data Sheet**. Kansas, 2006. Disponível em: <<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irg4ph40ud.pdf>>. Acesso em: 02 março 2015.

Krauter, S. **Solar Electric Power Generation: Photovoltaic Energy Systems**. New York: Springer, 2006.

Kuai, Y.; Yuvarajan, S. An Electronic Load for Testing Photovoltaic Panels. **Journal of Power Sources**, v. 154, p. 308-303, 2006.

Lander, C. **Eletrônica Industrial: teoria e aplicações**. 2.ed. São Paulo: Makron Books, 1996.

Macêdo, W. N. **Análise do Fator de Dimensionamento do Inversor Aplicado a Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. São Paulo: Tese de Doutorado, 2006.

Malik, A.Q.; Damit, S.J.B.H. Outdoor Testing of Single Crystal Silicon Solar Cells. **Renewable Energy**, v. 28, p. 1433-1445, 2003.

Moretón, R.; Lorenzo, E.; Muñoz, J. A 500-kW PV Generator I-V Curve. **Progress in Photovoltaics**, v. 22, p. 1280-1284, 2013.

Muñoz, J.; Lorenzo, E. Capacitive Load Based on IGBTs for On-Site Characterization of PV Arrays. **Solar Energy**, v. 80, p. 1489-1497, 2006.

Neher, C. **Termelétricas Pesam no Bolso do Consumidor Brasileiro**. [S.l.], 05 fev. 2015. Disponível em: <<http://dw.de/p/1EWEm>>. Acesso em: 02 março 2015.

NEOENERGIA inaugura usina solar Itaipava Arena Pernambuco. **Neoenergia**, São Paulo, 11 dezembro 2013. Disponível em: <<http://www.neoenergia.com/Noticias/Pages/neoenergia-inaugura-usina-solar-da-itaipava-arena-pernambuco.aspx>>. Acesso em: 02 março 2015.

Oliveira, F.S.; Rampinelli, G. A.; Krenzinger, A.; Gasparin, F. P. **Uso de Carga Capacitiva para Levantamento da Curva I-V de Arranjos Fotovoltaicos**. V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife, 2014.

Patterson, J.; Bailey, B. **Solid-State Physics: introduction to theory**. 2.ed. New York: Springer, 2010.

Pinho, J.; Galdino, M. (Org.). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, 2014.

Podewils, C; Bosworth, M. The learning curve. **Photon Magazine**, [S.l.], n. 8, p. 52-71, 2012.

Prieb, C.W. **Desenvolvimento de um Sistema de Ensaio de Módulos Fotovoltaicos**. Porto Alegre: Dissertação de Mestrado, 2002.

Prieb, C.W.; Krenzinger, A. **Determinação de Curva Característica de Arranjo Fotovoltaico**. I Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, 2007.

PVE – Photovoltaik Engineering. **PVPM – 1000C100 Data Sheet**. Iserlohn, 2011. Disponível em: <<http://www.pv-engineering.de/en/products/pvpm100c.html>>. Acesso em: 02 março 2015.

Ruschel, C.S. **Desenvolvimento de Software para Supervisão de Usinas Solares Fotovoltaicas**. Porto Alegre: Dissertação de Mestrado, 2015.

Texas Instruments. **Single Supply MicroPower Instrumentation Amplifier INA 122 Data Sheet**. Dallas, 1997. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina122.pdf>>. Acesso em: 02 março 2015.

Vishay Semiconductors. **Insulated Gate Bipolar Transistor GT100DA120U Data Sheet**. Selb, 2012. Disponível em: <<http://www.test.vishay.com/docs/93196/gt100da1.pdf>>. Acesso em: 02 março 2015.

Warner, T. H.; Cox, C.H. A High Power Current-Voltage Curve Tracer Employing a Capacitive Load. **Solar Cells**, v. 7, p. 175-181, 1983.

WEG. **Soluções em Energia Solar**. Jaraguá do Sul, 2014. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-solucoes-em-energia-solar-50038865-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 12 maio 2015.

Zilles, R.; Lorenzo, E. **Medidas Outdoor da Característica I-V de Módulos Fotovoltaicos**. V Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, 1990.