

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Facultade de Engenharia Elétrica e de Computação



RAFAEL ESPINO CAMPOS

**DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM
PROTÓTIPO DE TRAÇADOR ELETRÔNICO DE
CURVA I-V PARA A ANÁLISE DE MÓDULOS E
STRINGS FOTOVOLTAICOS**

Campinas
2019

RAFAEL ESPINO CAMPOS

**DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM
PROTÓTIPO DE TRAÇADOR ELETRÔNICO DE
CURVA I-V PARA A ANÁLISE DE MÓDULOS E
STRINGS FOTOVOLTAICOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na Área de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Gradella Villalva

Este exemplar corresponde à versão final da dissertação defendida pelo aluno Rafael Espino Campos, e orientada pelo Prof. Dr. Marcelo Gradella Villalva.

Campinas
2019

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

C157d Campos, Rafael Espino, 1987-
Desenvolvimento e construção de um protótipo de traçador eletrônico de curva I-V para a análise de módulos e strings fotovoltaicas / Rafael Espino Campos. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: Marcelo Gradella Villalva.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sistemas de energia fotovoltaica. 2. Energia solar. 3. Eletrônica de potência. I. Villalva, Marcelo Gradella, 1978-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Development and construction of an electronic I-V curve tracer prototype for the analysis of photovoltaic modules and strings

Palavras-chave em inglês:

Photovoltaic power systems

Solar energy

Power electronics

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Marcelo Gradella Villalva [Orientador]

Tárcio André dos Santos Barros

Paulo Sergio Nascimento Filho

Data de defesa: 18-07-2019

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: 0000-0002-3042-0917

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/1364969658384172>

Comissão Julgadora - Dissertação de Mestrado

Candidato: Rafael Espino Campos

RA: 192694

Data da Defesa: 18 de Julho de 2019

Título da Tese: “DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE TRAÇADOR ELETRÔNICO DE CURVA I-V PARA A ANÁLISE DE MÓDULOS E STRINGS FOTOVOLTAICOS”.

Prof. Dr. Marcelo Gradella Villalva (Presidente, FEEC/UNICAMP)

Prof. Dr. Tárcio André dos Santos Barros (FEM/UNICAMP)

Dr. Paulo Sergio Nascimento Filho (Consultoria)

A ata de defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontrase no SIGA (Sistema de Fluxo de Tese) e na secretaria de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela vida e a oportunidade concedida para realizar este trabalho, aos meus pais, minha irmã e minha namorada por todo o suporte e incentivo fornecido, ao meu orientador pela confiança depositada em mim, aos meus amigos antigos e novos pelo companheirismo, apoio e impulso oferecido. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

O rápido crescimento do mercado de energia solar requer a implantação de equipamentos capazes de fornecer medições precisas dos módulos fotovoltaicos, seja para verificar o funcionamento da instalação ou encontrar problemas ocasionais. Neste cenário, destaca-se o traçador de curva I-V (curva de corrente versus tensão), utilizado para descrever o comportamento elétrico do sistema fotovoltaico através de todas as possibilidades de operação de corrente e tensão. No entanto, esse equipamento tem um custo elevado para pequenos instaladores. Neste trabalho, são apresentados o desenvolvimento e os resultados experimentais de um traçador de curva I-V capaz de fazer medições de corrente, tensão e potência de até 10 A, 600 V e 1 kW respectivamente, com boa precisão (1 % em toda a faixa de medição para cada um desses parâmetros elétricos), utilizado para examinar e caracterizar módulos e strings fotovoltaicos, contribuindo com um equipamento para testes de instalações fotovoltaicas de geração distribuída de energia elétrica. Para tanto, são apresentadas as características principais de uma fonte fotovoltaica, uma revisão bibliográfica dos métodos mais comuns para obter as curvas I-V e uma comparação entre esses métodos. Posteriormente, foram definidas as características que devem ter o equipamento proposto, o qual está baseado em uma carga eletrônica. As simulações realizadas para o controle da carga variável são apresentadas, em conjunto, com os circuitos de aquisição e de potência projetados e construídos. Além disso, foi implementado o *software* do sistema embarcado, que inclui a interface homem-máquina e os procedimentos para tratar os dados adquiridos. Foram feitos testes de funcionamento, calibração e testes de campo sob diferentes condições, utilizando como referência um equipamento comercial. Os resultados obtidos pelo protótipo desenvolvido foram favoráveis, pois o erro de comparação no ponto da potência máxima para os dados obtidos depois do processamento (transferido para a condição de teste padrão) foi inferior a 0,9 %. Finalmente, também são propostas as melhorias necessárias para futuros desenvolvimentos.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Eletrônica de Potência, Traçador de Curva I-V, Carga Variável.

Abstract

The rapid growth of the solar energy market requires the insertion of equipment capable of providing accurate measurements of the photovoltaic modules, either to verify the operation of the installation or to find occasional problems. In this scenario, the I-V curve tracer (current versus voltage curve) is used to describe the electrical behavior of the photovoltaic system through all possibilities of current and voltage operation. However, this equipment has a high cost for small installers. This work presents the development and experimental results of an I-V curve tracer, capable of making current, voltage and power measurements up to 10 A, 600 V and 1 kW respectively, with good accuracy (1% over the entire measurement range for each of these electrical parameters), used to examine and characterize photovoltaic modules and strings, contributing with equipment to test photovoltaic installations of distributed generation of electric energy. For this, the main characteristics of a photovoltaic source, a bibliographical review of the most common methods to obtain the I-V curves and a comparison between these methods are presented. Subsequently, the characteristics of the proposed equipment, which is based on an electronic load, were defined. The simulations performed for variable load control are presented, together, the acquisition and power circuits designed and built. In addition, embedded software has been implemented, which includes the human-machine interface and the procedures for processing the acquired data. Functioning, calibration and field tests were performed under different conditions, using commercial equipment as a reference. The results obtained by the developed prototype were favorable because the comparison error at the maximum power point for the data obtained after processing (moved to standard test condition) was less than 0.9%. Finally, we also proposed the improvements needed for future developments.

Keywords: Photovoltaic Solar Energy, Power Electronics, I-V Curve Tracer, Variable Load.

Listas de Figuras

1.1	Capacidade global de geração de energia (por fonte) nos últimos anos. Adaptado de [1].	17
1.2	Capacidade solar fotovoltaica global e adições anuais nos últimos anos. Adaptado de [1].	18
1.3	Sistema fotovoltaico instalado na Prefeitura de Curitiba [2].	18
1.4	Usina fotovoltaica de Pirapora, a maior usina solar na América Latina [3].	19
2.1	a) Célula FV; b) representação interna de uma célula FV sob luz solar.	21
2.2	a) Módulo FV de silício monocristalino; b) módulo FV de silício policristalino; c) parte posterior de um módulo FV. [4, 5]	22
2.3	Modelo de uma célula FV.	23
2.4	Curva característica I-V e P-V de um módulo FV.	25
2.5	Curvas I-V para diferentes valores de irradiância.	26
2.6	Curvas I-V para diferentes valores de temperatura.	26
2.7	Curvas I-V para diferentes valores da resistência em série.	27
2.8	Curvas I-V para diferentes valores da resistência <i>Shunt</i> .	27
2.9	Curvas I-V de quatro módulos em série com sombreamento parcial (azul) e sem sombreamento (vermelho).	28
2.10	Curvas P-V de quatro módulos em série com sombreamento parcial (azul) e sem sombreamento (vermelho).	28
3.1	Esquema geral de um traçador de curva I-V.	33
3.2	a) Traçadores de curva I-V comerciais [6–8]; b) módulos auxiliares [9–11].	34
3.3	Simulação de uma resistência variável como carga, considerando uma boa dispersão de pontos.	35
3.4	Configurações das resistências: a) seleção em paralelo; b) seleção em série.	35
3.5	Carga resistiva fixa através de um conversor CC-CC.	36
3.6	Pontos de operação de uma fonte FV para diferentes valores do ciclo de trabalho de um conversor CC-CC.	37
3.7	Principais tipos de carga eletrônica.	38
3.8	Curva característica do MOSFET e do módulo FV.	39

3.9	Área de operação segura: a) do MOSFET IRFP260N [12]; b) do IGBT STGWA25H120DF2 [13].	40
3.10	Curvas de corrente e tensão no capacitor inicialmente descarregado, utilizando um módulo FV como fonte.	40
3.11	Configurações de carga capacitiva: a) com resistência para a descarga; b) com uma fonte de tensão para a pré-carreaga e resistência para a descarga.	41
3.12	Diagrama básico de um módulo FV com uma carga variável.	42
3.13	Arranjo de resistências conectadas em paralelo.	43
3.14	Sinais de controle de cada uma das chaves (em cima), e formas de onda da tensão e da corrente do módulo FV (em baixo).	43
3.15	Curva I-V (vermelho) e curva P-V (azul) do módulo FV, mostrando os pontos correspondentes aos valores de resistências selecionadas.	44
3.16	Módulo FV conectado a um conversor SEPIC com carga resistiva.	44
3.17	Esquema de controle do conversor SEPIC.	45
3.18	Sinal que representa o valor do ciclo de trabalho do conversor (em cima). Formas de onda de tensão e de corrente do módulo FV (em baixo).	45
3.19	Curva I-V (vermelho) e curva P-V (azul) do módulo FV, mostrando os pontos correspondentes a alguns ciclos de trabalho do conversor.	46
3.20	Módulo FV e MOSFET como carga eletrônica.	46
3.21	Sinal de controle do MOSFET (em cima). Formas de onda da tensão e da corrente do módulo FV (em baixo).	47
3.22	Curva I-V (vermelho) e curva P-V (azul) do módulo FV.	47
3.23	Módulo FV e circuito com carga capacitiva e chaves para carregar e descarregar o capacitor.	48
3.24	Sinal de controle das chaves para a carga e a descarga do capacitor (em cima). Formas de onda da tensão e da corrente do capacitor em função do tempo (em baixo).	48
3.25	Formas de onda da tensão e da corrente do módulo FV em função do tempo.	49
3.26	Curva I-V (vermelho) e curva P-V (azul) do módulo FV.	49
4.1	Esquema do traçador de curva I-V desenvolvido.	53
4.2	Esquema de um IGBT como carga eletrônica aplicando um sinal de controle.	55
4.3	Sinal de controle do IGBT (em cima), formas de onda da tensão e da corrente do módulo FV (em baixo).	55
4.4	Curva I-V (vermelho) e curva P-V (azul) do módulo FV, a partir dos pontos da tabela 4.3.	56
4.5	Circuito de condicionamento do sinal do DAC e driver para o controle do IGBT, conectado com uma string de 3 módulos fotovoltaicos.	57

4.6	Sinal de controle e sinais condicionados (em cima). Formas de onda da corrente e tensão da string FV (em baixo).	58
4.7	Diagrama esquemático do circuito para o controle do IGBT.	59
4.8	Círcito de aquisição para os sinais de tensão e corrente.	59
4.9	Reguladores de tensão e conversores CC-CC utilizadas no protótipo.	60
4.10	Isolador digital indicando os pinos utilizados para a comunicação SPI.	61
4.11	Parte interna do protótipo desenvolvido, mostrando os componentes e os circuitos impressos projetados.	61
4.12	Fluxograma do equipamento.	62
4.13	Apresentação da tela de ajustes.	63
4.14	Fluxograma da função de Aquisição.	64
4.15	Protótipo depois de fazer a aquisição.	65
4.16	Apresentação das curvas I-V nas condições descritas.	65
4.17	Apresentação das curvas P-V nas condições descritas.	66
4.18	Apresentação da tabela com os parâmetros principais nas condições descritas.	66
4.19	Curva I-V a partir das medições (curva azul na esquerda) e curva I-V depois do primeiro procedimento (curva vermelha na direita).	67
4.20	Curva I-V do primeiro procedimento (curva azul na esquerda) e curva I-V depois do último procedimento (curva vermelha na direita).	68
4.21	Curva I-V depois de descartar os pontos medidos com pouca precisão (curva azul na esquerda) e curva I-V obtida para a OPC (curva vermelha na direita).	68
4.22	Resumo dos procedimentos para tratar os dados na OPC.	69
4.23	Curvas I-V em diferentes condições de operação.	70
4.24	Curvas I-V na OPC, na STC e a curva corrigida da OPC para a STC.	71
4.25	Curvas I-V na OPC, na STC e a curva corrigida da OPC para a STC aplicando o algoritmo proposto.	73
4.26	Resumo do método proposto para o translado dos dados medidos na OPC para a STC.	73
4.27	Teste para verificar os circuitos projetados e os algoritmos de aquisição.	74
4.28	Teste para obter o tempo que toma o sinal de controle desde o valor mínimo até o valor máximo.	75
4.29	Tempo necessário para fazer uma única variação da carga variável e obter as medições de corrente e tensão.	75
4.30	Teste para obter a corrente mínima I_C do IGBT quando o sinal de controle é mínima.	76
4.31	Teste para obter a tensão mínima V_{CEsat} do IGBT quando o sinal de controle é máxima.	76
4.32	Equipamento Solar I-Ve (esquerda), protótipo desenvolvido (direita) e módulos de uma string FV localizada no CIS Guanabara-UNICAMP.	78

4.33 Sensor de irradiação coplanar com um módulo FV (direita) e sensor de temperatura colocado na parte traseira de um módulo FV (esquerda).	78
4.34 Curvas características I-V e P-V, obtidas pelo equipamento comercial e pelo equipamento desenvolvido, de a) um módulo FV, b) dois módulos em série, c) quatro módulos em série e d) cinco módulos em série.	79
4.35 Curvas características I-V e P-V, obtidas pelo equipamento comercial e pelo equipamento desenvolvido, depois de fazer o ajuste, de a) um módulo FV, b) dois módulos em série, c) quatro módulos em série e d) cinco módulos em série.	81
4.36 Primeiro perfil de sombreamento (direita) e segundo perfil de sombreamento (esquerda).	82
4.37 Curvas características I-V e P-V, obtidos pelo equipamento desenvolvido e o equipamento comercial para o a) Primeiro perfil de sombreamento e b) segundo perfil de sombreamento.	82
4.38 Curvas características I-V e P-V do equipamento desenvolvido (azul) e do equipamento comercial (vermelho).	84
4.39 Curvas características I-V e P-V do equipamento desenvolvido em OPC, na STC, e principais pontos nominais.	84
4.40 Curvas características I-V e P-V do equipamento comercial na OPC, na STC e as curvas nominais.	85
 B.1 Capa superior da placa de potência.	97
B.2 Vista do lado superior da placa de potência.	97
B.3 Capa inferior da placa de potência.	98
B.4 Vista do lado inferior da placa de potência.	98

Lista de Tabelas

2.1	Parâmetros elétricos do módulo CS6K-270P em STC.	29
2.2	Parâmetros elétricos do módulo CS6K-270P em NOCT.	30
2.3	Características térmicas do módulo CS6K-270P.	30
3.1	Características elétricas do módulo CS6K-270P [14].	42
3.2	Comparativa das cargas variáveis.	51
4.1	Características elétricas do IGBT IXH82N120C3 [15].	54
4.2	Características elétricas do equipamento proposto.	54
4.3	Tensões aplicadas na porta do IGBT.	56
4.4	Valores de temperatura e irradiância consideradas na simulação.	70
4.5	Diferenças de potência máxima entre as medições dos dois equipamentos. .	80
4.6	Diferenças de potência máxima entre as medições dos dois equipamentos com o ajuste proposto.	80
4.7	Parâmetros elétricos do módulo FV STP190S-24/Ad+ na STC e em NOCT.	83
4.8	Parâmetros elétricos adquiridos pelos equipamentos nas condições de operação.	83
4.9	Comparação dos parâmetros elétricos adquiridos pelos dois equipamentos. .	85
A.1	Lista de módulos e circuitos integrados.	95
A.2	Lista de componentes passivos.	96
A.3	Lista de conectores e componentes adicionais.	96
A.4	Lista de preços parciais e preço total (sem impostos).	96

Listas de abreviaturas e siglas

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	- <i>Analog-to-Digital Converter</i> (conversor analógico-digital)
ARM	- <i>Advanced RISC Machines</i>
BJT	- <i>Bipolar Junction Transistor</i> (Transistor de junção bipolar)
CC	- Corrente contínua
DAC	- <i>Digital-to-Analog Converter</i> (conversor digital-analógico)
I-V	- Corrente - Tensão
IEC	- <i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Eletrotécnica Internacional)
IGBT	- <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> (Transistor bipolar de porta isolada)
FPU	- <i>Float Point Unit</i> (Unidade de ponto flutuante)
IHM	- Interface Homem-Máquina
MCU	- <i>MicroController Unit</i> (microcontrolador)
MOSFET	- <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> (transistor de efeito de campo metal - óxido)
NBR	- Normas Brasileiras
NOCT	- <i>Nominal Operating Cell Temperature</i> (temperatura nominal de operação da célula)
NMOT	- <i>Nominal Module Operating Temperature</i> (temperatura nominal de operação do módulo)
OPC	- <i>Operation conditions</i> (condição de operação)
P-V	- Potência - Tensão
PVC	- <i>Polyvinyl chloride</i> (policloreto de vinila)
PWM	- <i>Pulse Width Modulation</i> (modulação por largura de pulso)
PPM	- Ponto da potência máxima
REN	- Resolução Normativa
STC	- <i>Standard Test Conditions</i> (condição de teste padrão)
SPI	- <i>Serial Peripheral Interface</i> (interface periférica serial)
TFT-LCD	- textitthin film transistor liquid crystal display (pantalla de cristal líquido de transistor de película fina)
UART	- <i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i> (transmissor-receptor assíncrono universal)

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Energia solar fotovoltaica	16
1.2	Objetivos e justificativas	20
2	Fontes Fotovoltaicas	21
2.1	Caracterização de um módulo FV	23
2.1.1	Modelo equivalente	23
2.1.2	Curvas características I-V e P-V	24
2.1.3	Fatores que alteram o desempenho de uma fonte FV	25
2.2	Avaliação de um módulo FV comercial	29
2.2.1	Características elétricas a partir da folha de dados	29
2.2.2	Correção da OPC para a STC	30
3	Traçadores de curva I-V	32
3.1	Características de um traçador de curva I-V	32
3.2	Revisão dos principais métodos para obter as curvas características	34
3.2.1	Carga resistiva variável	34
3.2.2	Conversor CC-CC com carga resistiva	36
3.2.3	Carga eletrônica	38
3.2.4	Carga capacitativa	40
3.3	Análise dos métodos descritos	42
3.3.1	Simulação dos quatro tipos de carga	42
3.3.2	Comparação entre os métodos	49
4	Projeto de um traçador de curva I-V	52
4.1	Características do equipamento	52
4.1.1	Características gerais	52
4.1.2	Características do IGBT	54
4.2	Simulação do IGBT como carga variável	55
4.3	Construção do <i>hardware</i> do equipamento	58
4.4	Implementação do <i>software</i> do equipamento	62

4.4.1	Estados de funcionamento	62
4.4.2	Tratamento dos dados medidos na OPC	66
4.4.3	Translado dos dados medidos na OPC para a STC	69
4.5	Resultados experimentais	74
4.5.1	Testes de funcionamento e calibração	74
4.5.2	Testes de campo com uma string FV	77
5	Conclusões e trabalhos futuros	86
5.1	Conclusões e contribuições do presente trabalho	86
5.2	Propostas para trabalhos futuros	87
A	Lista de componentes	95
B	<i>Layout</i> do circuito impresso	97
C	Principais Algoritmos	99

Capítulo 1

Introdução

1.1 Energia solar fotovoltaica

A energia elétrica é considerada uma necessidade básica da sociedade moderna devido a sua dependência para um desenvolvimento econômico sustentável. Como consequência do uso das fontes de energia fóssil, houve sérios e crescentes impactos ambientais negativos, como emissões de dióxido de carbono (CO_2), aquecimento global, poluição do ar, desmatamento e degradação ambiental. Devido às preocupações crescentes sobre seu impacto na mudança climática e às reservas cada vez menores, os combustíveis fósseis não deveriam ser explorados como no passado. No entanto, como o preço das energias convencionais está em aumento, alternativas novas e limpas começaram a emergir e tornaram-se cada vez mais competitivas [16]. Em consequência, considerando um desenvolvimento sustentável, uma das medidas adotadas para a preservação do meio ambiente e a mitigação das alterações ambientais, foi a expansão do uso de fontes de energia renováveis [17], caracterizada por ser obtida a partir de fontes naturais praticamente inesgotáveis.

Na década de 2000, a tendência de crescimento médio das emissões globais de CO_2 relacionadas à energia proveniente de combustíveis fósseis foi de 2,2 %. O incremento do uso de energias renováveis, adicionado às melhorias na eficiência energética e a redução do uso de carvão a nível mundial, mantiveram as emissões globais de CO_2 praticamente estáveis entre os anos 2014 e 2016, crescendo apenas 0,2 % [18]. No entanto, em razão do aumento da demanda de energia devido ao alto crescimento econômico global dos últimos anos, as emissões CO_2 aumentaram cerca de 1,4 % e 1,7 % nos anos 2017 e 2018 respectivamente [1, 19]. Apesar do crescimento notável da capacidade global de energia renovável, que atingiu aproximadamente 2378 GW em 2018, os combustíveis fósseis ainda sustentam a maior parte do total do consumo de energia global [1, 20].

As principais fontes de energia renovável são: energia hidroelétrica, energia eólica, energia solar fotovoltaica e a energia de biomassa. Enquanto, outras fontes renováveis que contribuem em menor escala são: concentração de energia solar térmica, energia oceânica

e a energia geotérmica. Dentre as fontes citadas, a hidroelétrica tem a maior capacidade de geração de energia, enquanto as instalações da energia solar fotovoltaica possuem o maior crescimento. Pode-se destacar que em 2018, pelo quarto ano consecutivo, as energias renováveis incrementaram mais capacidade de produção em relação aos combustíveis fósseis e a energia nuclear combinadas, onde a energia solar fotovoltaica representou o 55 % de aquelas adições, seguido pela energia eólica (28 %) e a energia hidroelétrica (11 %) [1]. Na Fig. 1.1 mostra-se a capacidade global de geração de energia entre os anos de 2008 e 2018.

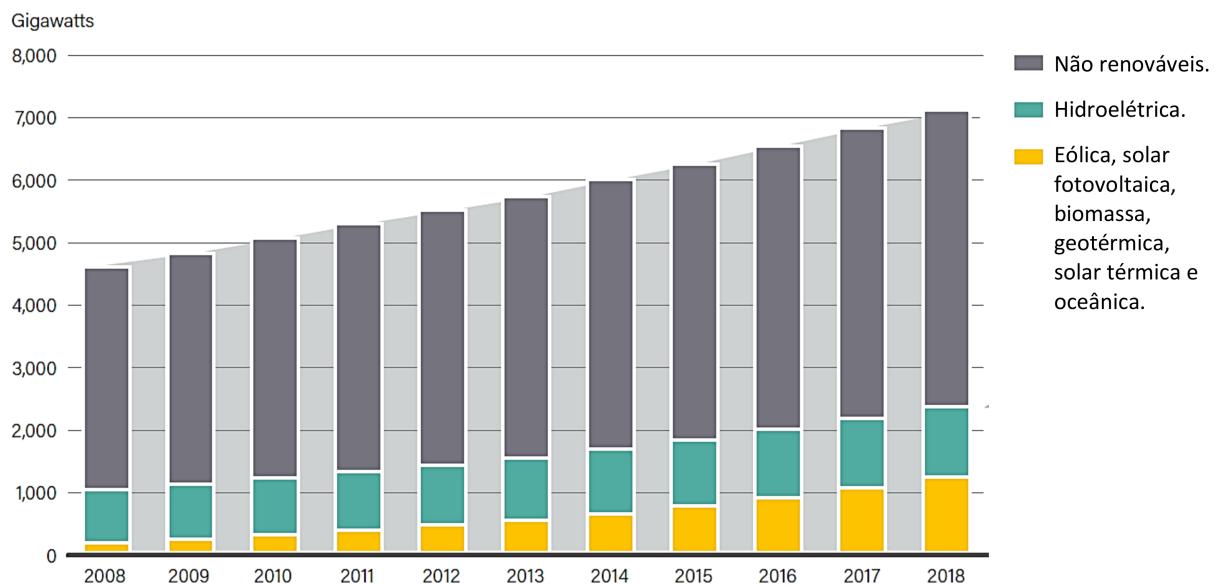


Figura 1.1: Capacidade global de geração de energia (por fonte) nos últimos anos. Adaptado de [1].

Em 2018, o incremento da capacidade global de energia solar fotovoltaica ultrapassou o nível de 100 GW pela primeira vez, seja em sistemas conectados à rede ou em sistemas isolados, conseguindo aumentar a capacidade cumulativa para pelo menos 505 GW. A maior parte desse desenvolvimento fotovoltaico (FV) aconteceu na China, enquanto os seguintes mercados foram a Índia, os Estados Unidos, Japão e Austrália. Por outro lado, devido às condições favoráveis, seja em recursos solares como no clima político, em vários países da América Latina e do Caribe também foi observado um crescimento substancial na capacidade solar fotovoltaica [1]. Na Fig. 1.2 pode-se observar o aumento da capacidade solar fotovoltaica a nível mundial, destacando-se as adições anuais feitas entre os anos de 2008 e 2018.

A rápida expansão do mercado FV ocorreu devido a fatores como os incentivos financeiros e regulamentações governamentais, a predisposição para reduzir as emissões de CO_2 , a competitividade dos preços das tecnologias fotovoltaicas e a crescente demanda por eletricidade nos países em desenvolvimento [1, 19]. Da mesma forma, muitos países têm um interesse cada vez maior em produzir eletricidade em pequena escala em forma de

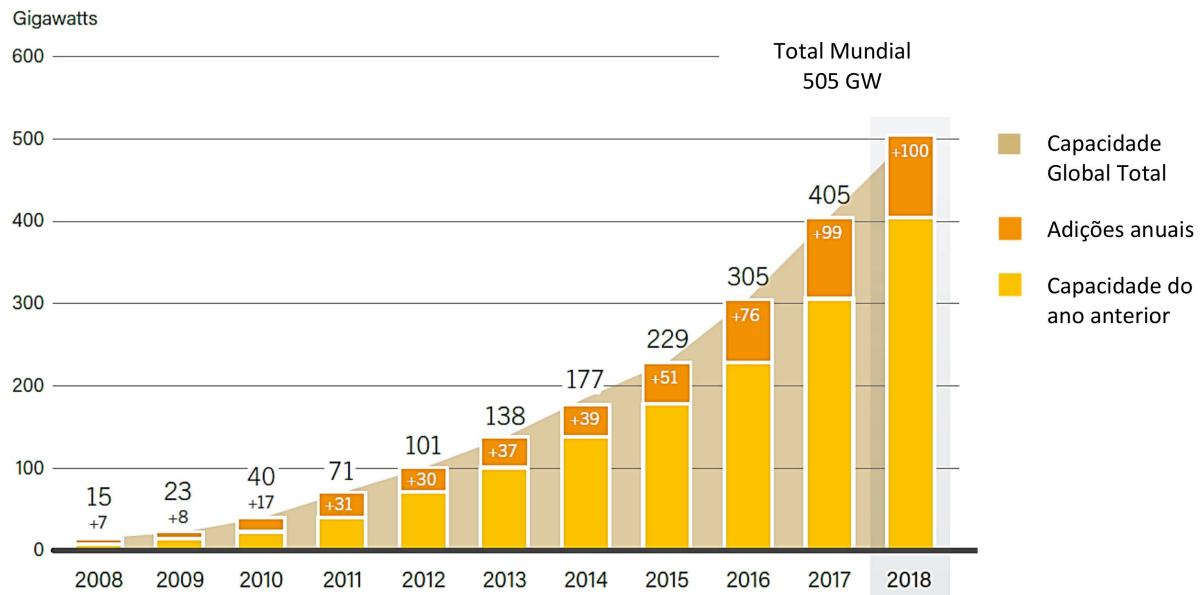


Figura 1.2: Capacidade solar fotovoltaica global e adições anuais nos últimos anos. Adaptado de [1].

geração distribuída, caracterizada pelo uso de pequenos geradores de energia conectados ao sistema elétrico e localizados próximos aos locais de consumo. Sendo as fontes fotovoltaicas as melhores em adaptar-se, pois é possível instalar esses sistemas nos telhados das casas, centros comerciais, empresas ou outros prédios, com baixo impacto ambiental [21]. A Fig. 1.3 mostra uma instalação fotovoltaica em um prédio público na cidade de Curitiba.



Figura 1.3: Sistema fotovoltaico instalado na Prefeitura de Curitiba [2].

A maior parte da capacidade instalada na América Latina, ocorreu por meio de contratos de compra de energia em grande escala, embora, a energia solar fotovoltaica distribuída tenha tido um importante crescimento, particularmente no Brasil [1]. Atualmente (até julho do 2019), segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a capacidade solar fotovoltaica instalada em forma de geração centralizada no Brasil é de aproximadamente 2,1 GW, também tem empreendimentos em construção com potência projetada de 775 MW e empreendimentos com construção não iniciada com potência projetada de 2,2 GW aproximadamente [22]. Além disso, a capacidade solar fotovoltaica atual instalada em forma de geração distribuída também é apreciável, sendo de aproximadamente 919,9 MW [23]. A Fig. 1.4 apresenta a maior usina solar em operação na América Latina, localizada na cidade de Pirapora.



Figura 1.4: Usina fotovoltaica de Pirapora, a maior usina solar na América Latina [3].

A quantidade de módulos utilizados em um sistema FV depende da sua capacidade de geração. Por exemplo, na instalação da Fig. 1.3, a qual possui uma capacidade aproximada de 144 kW, foram utilizados 439 módulos [2]. Enquanto, na usina da Fig. 1.4 foram utilizados mais de 1,2 milhões de módulos, pois ela possui uma capacidade instalada de 400 MW [3]. Vale ressaltar que, além das precauções a serem tomadas durante o transporte e o processo de montagem dos módulos, para evitar danificá-los, também é necessário fazer uma inspeção visual, ensaios de comissionamento, avaliação de desempenho e manutenção periódica subsequente do sistema FV, principalmente no caso de instalações grandes ou complexas. Os testes mencionados possuem o intuito de realizar uma avaliação minuciosa da instalação, analisando todos os fatores que podem influenciar em seu desempenho e na segurança.

Os testes de desempenho do sistema FV devem ser realizados em condições es-

pecificadas pelas normas regulamentadores internacionais, as quais exigem fazer os testes sob certas condições de tempo, relacionados principalmente com os valores de irradiação e temperatura presente, a fim de não afetar as medições de corrente e tensão gerados pelo sistema FV. Tal exigência gera empecilhos no processo de comissionamento, pois as condições são atingidas apenas em horários próximos do meio-dia e devido às nuvens, a irradiação incidida nos módulos pode variar muito rapidamente, fazendo com que este procedimento possa demorar vários dias. Devido a estes fatores, é essencial o uso de equipamentos de medição especializados, que forneçam resultados confiáveis, agilizando os procedimentos de verificação e permitindo uma imediata identificação de problemas na instalação.

1.2 Objetivos e justificativas

Considerando o grande número de módulos FVs instalados e a tendência de aumento, em particular no Brasil, tem-se tornando essencial o uso de equipamentos de medição específicos, para fazer testes de funcionamento nas instalações, verificar o funcionamento do sistema FV e conseguir identificar problemas que podem ocorrer ao longo do seu ciclo de vida. Além disso, a rápida expansão das instalações fotovoltaicas e a preferência de gerar maior energia usando um menor espaço, fomentou a criação de novos produtos e tecnologias cada vez mais eficientes, sendo também importante o desenvolvimento de instrumentos especializados capazes de suprir os requerimentos, cumprindo as normas vigentes.

Atualmente, há uma variedade de equipamentos comerciais especializados conhecidos como “Traçadores de curva I-V”, os quais são capazes de fornecer a informação mais completa possível de um sistema FV, pois revelam o que acontece com uma fonte fotovoltaica sob carga, além de apresentar medidas quantitativas e uma representação visual qualitativa do seu desempenho [24]. Além disso, facilitam e tornam mais seguras as medições, cumprindo padrões de qualidade e segurança, fazendo medições com um alto grau de precisão, justificando, portanto, o alto custo associado a estes equipamentos, sendo por exemplo, o custo de um dos equipamentos mais comuns, em torno dos 3000 dólares [25].

O objetivo deste projeto de pesquisa está focado no desenvolvimento de um traçador de curva I-V de custo acessível (apêndice A) e com um alto grau de precisão, detalhando suas principais características, o método escolhido, baseado em uma carga eletrônica variável, bem como o processo da sua implementação. Para isso, foi feito um estudo das características de um módulo FV e dos fatores que podem alterar sua operação, seguido de uma revisão do funcionamento de um traçador de curva I-V e dos principais métodos em que eles estão baseados. Além disso, têm-se como objetivos adicionais a elaboração de algoritmos para transferir as curvas obtidas para as condições de medição padrão e fazer uma análise apropriada dos dados.

Capítulo 2

Fontes Fotovoltaicas

Uma fonte FV é um dispositivo capaz de gerar energia elétrica a partir da energia luminosa, sendo a célula FV a unidade fundamental encarregada desse processo de conversão. As células mais comuns consistem em um conjunto de junções P-N conectadas em paralelo, as quais geram corrente contínua (CC) quando incidem fótons (energia luminosa) na sua superfície, sendo esta, do material do tipo N. Os fótons absorvidos geram pares elétron-lacuna móveis, onde os elétrons excitados fluem facilmente através do material do tipo N, enquanto as lacunas fluem através do material do tipo P. A presença de elétrons e lacunas criam cargas negativas e positivas respectivamente, que induzem um campo elétrico na região próxima da junção. Enquanto, a energia elétrica é coletada por contatos metálicos (eletrodos) em frente e atrás da célula FV. [16, 26, 27]. A Fig. 2.1 mostra uma célula FV e sua representação sob luz solar.

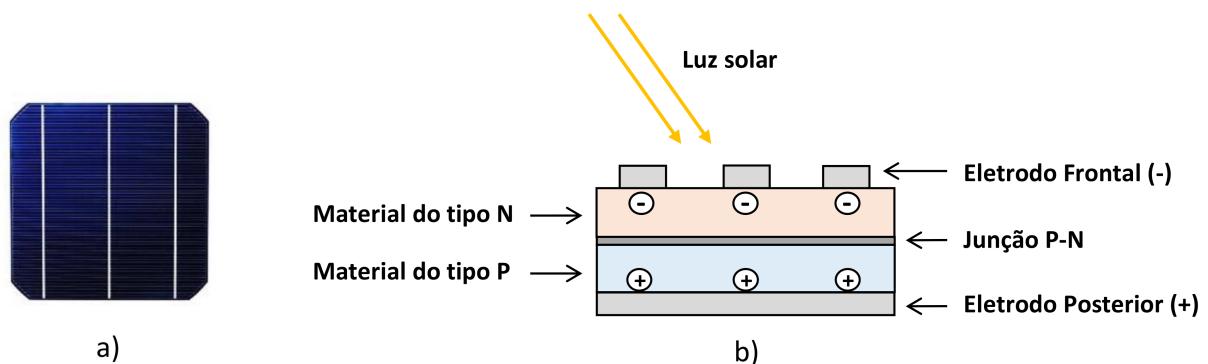


Figura 2.1: a) Célula FV; b) representação interna de uma célula FV sob luz solar.

A tecnologia ou método de fabricação da célula FV depende da aplicação onde esta será utilizada, optando-se por utilizar tecnologias mais avançadas para aplicações espaciais como em instalações fotovoltaicas terrestres, sendo o princípio de operação similar para todos os casos. As tecnologias mais utilizadas no mercado fotovoltaico, devido a sua maior consolidação, eficiência e durabilidade, são baseados em silício monocristalino e silício policristalino, sendo encontradas em grande escala comercial. Atualmente, os sistemas

fotovoltaicos comerciais que são baseados em células com tais tecnologias, possuem eficiência na faixa de 15 a 20 %, oferecendo garantias de até 20 ou 25 anos, sendo a célula de silício monocristalino a de maior eficiência, a qual apresenta um custo de produção mais elevado [16, 27, 28].

Devido à baixa potência de uma única célula FV, um módulo FV é composto tipicamente de 36, 60 ou 72 células conectadas eletricamente em série, sendo montadas e encapsuladas de forma especial para protegê-las das condições climáticas, proporcionar isolamento elétrico e resistência mecânica. Cabe ressaltar que, além de conectar todas as células em série, também são conectados diodos de *bypass* em paralelo para cada grupo de células, os quais ajudam a melhorar o rendimento do módulo FV no caso que fatores externos influem negativamente nele, evitando que a geração seja interrompida como em condições de sombreamento parcial. Os diodos e os terminais das conexões elétricas das células encontram-se dentro de uma caixa de junção, onde também são conectados os cabos elétricos externos do módulo FV [27, 29]. A Fig. 2.2 mostra os módulos das tecnologias mencionadas previamente.

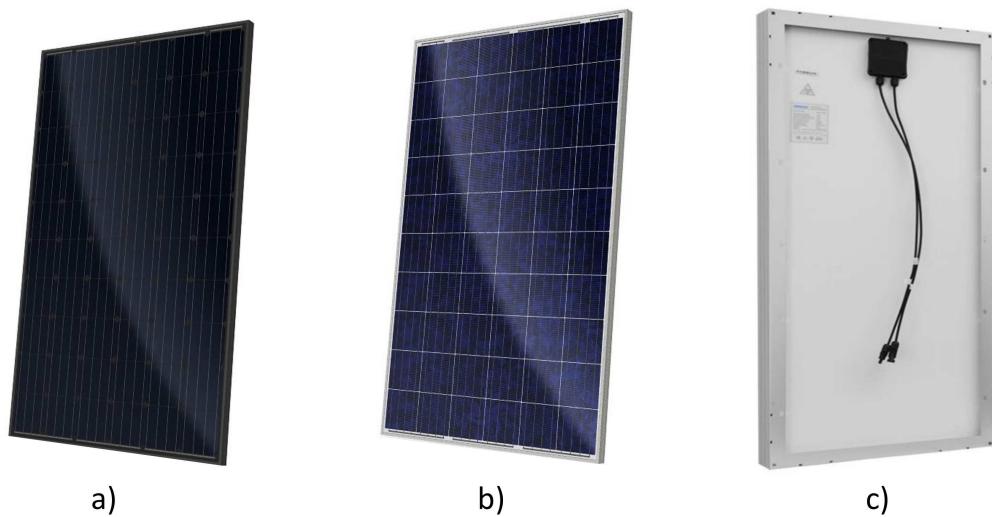


Figura 2.2: a) Módulo FV de silício monocristalino; b) módulo FV de silício policristalino; c) parte posterior de um módulo FV. [4, 5]

Como em uma instalação fotovoltaica, a potência de um módulo FV não é usualmente suficiente para suprir a demanda energética de uma carga ou equipamento, é possível agrupá-los em uma string (módulos em série) ou em um arranjo FV (módulos em série e em paralelo), ressaltando que o valor da tensão eleva-se quando os módulos são conectados em série e o valor da corrente aumenta quando são conectados em paralelo. Além disso, a potência, tensão e corrente resultante variam de acordo com o número de módulos conectados.

2.1 Caracterização de um módulo FV

2.1.1 Modelo equivalente

Devido ao fato de uma célula FV ser uma fonte de energia elétrica (pelo efeito fotoelétrico) e possuir características elétricas similares aos diodos de junção P-N, o desempenho de uma célula ideal pode ser representado como o equivalente elétrico de uma fonte de corrente (I_{ph}) em antiparalelo com um diodo, sendo a fonte de corrente dependente da irradiância à qual a célula está sujeita [26]. A irradiância é a intensidade de energia solar impactando uma unidade de superfície, que é um valor instantâneo de energia, cuja unidade é expressado em watts por metro quadrado (W/m^2).

A modelagem circuital de um painel fotovoltaico é essencial para a sua análise. Em sua topologia, são consideradas resistências parasitas, uma resistência em série (R_s) e uma resistência em paralelo, também chamada resistência *Shunt* (R_{sh}). A resistência em série representa a resistência do material semicondutor somado à resistência dos contatos e interconexões metálicas e a resistência entre os contatos metálicos e o semicondutor. Enquanto, a resistência *Shunt* é causada pelo vazamento através da junção P-N, devido aos defeitos no cristal e às impurezas na região de junção [16]. A Fig. 2.3 mostra o modelo circuital da célula FV, onde I e V são a corrente e a tensão geradas.

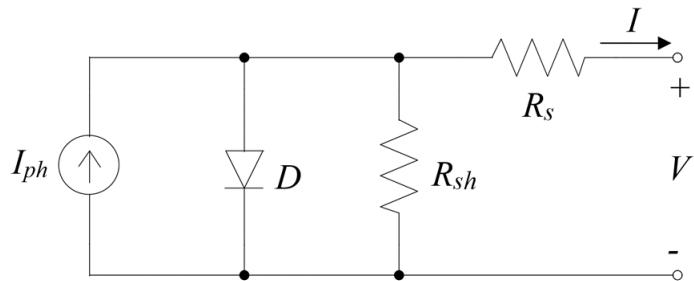


Figura 2.3: Modelo de uma célula FV.

No circuito da Fig. 2.3, aplicando a lei de Kirchhoff, a corrente da célula FV será obtida pela equação 2.1, onde I_d é a corrente do diodo D e I_{Rsh} é a corrente na resistência *Shunt*, as quais são dadas pelas equações 2.2 e 2.3 respectivamente.

$$I = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \quad (2.1)$$

$$I_d = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot V_d}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

$$I_{Rsh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

Da equação 2.2, I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo ou corrente de fuga, n é a constante de idealidade do diodo, q é a carga do elétron ($1,602 \times 10^{-19}$ C), k é a constante de Boltzmann ($1,38065 \times 10^{-23}$ J/K), e T é a temperatura da junção P-N (temperatura da célula FV em operação), expressa em Kelvin [28,30]. Enquanto, a tensão no diodo V_d é mostrada na equação 2.4.

$$V_d = V + I.R_s \quad (2.4)$$

Substituindo a equação 2.4 nas equações 2.2 e 2.3, e em seguida, substituindo estas equações na equação 2.1, obtém-se que a corrente da célula FV é representado pela equação 2.5.

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V + I.R_s)}{n.k.T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \quad (2.5)$$

De maneira análoga, para um módulo FV de N_s células em série, idealmente sendo todas idênticas e sob um mesmo nível de irradiação, a corrente do módulo FV será obtida pela equação 2.6, onde as resistências parasitas equivalentes série e *Shunt* do módulo serão $R'_s = R_s.N_s$ e $R'_{sh} = R_{sh}.N_s$, respectivamente [31].

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V + I.R'_s)}{N_s.n.k.T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I.R'_s}{R'_{sh}} \quad (2.6)$$

2.1.2 Curvas características I-V e P-V

Um módulo FV não possui tensão ou corrente de saída constante, pois esses parâmetros são mutuamente dependentes e determinados pela carga ou equipamento conectado em seus terminais [27]. Portanto, a melhor forma de medir suas características elétricas é traçando a curva característica I-V, pois ela mostra todos os possíveis pontos de operação, representando seu comportamento sob determinadas condições de temperatura e irradiação. Além disso, a partir desta curva, pode-se obter também a representação da curva característica P-V (potência versus tensão), onde se pode observar a potência máxima fornecida pela fonte nessas condições, sendo o ponto de maior interesse. As duas curvas são mostradas na Fig. 2.4, onde se pode destacar os seguintes pontos importantes:

- (I_{SC}): corrente de curto-círcuito, que é a corrente máxima gerada pelo módulo FV quando a tensão entre seus terminais é zero.
- (V_{OC}): tensão de circuito aberto, que é a tensão máxima gerada pelo módulo FV quando não tem corrente através dele (corrente zero).
- (P_{max}): potência máxima.

- (V_{mp}) : tensão de potência máxima, que é o valor de tensão obtido quando a potência gerada é máxima.
- (I_{mp}) : corrente de potência máxima, que é o valor de corrente obtido quando a potência gerada é máxima.

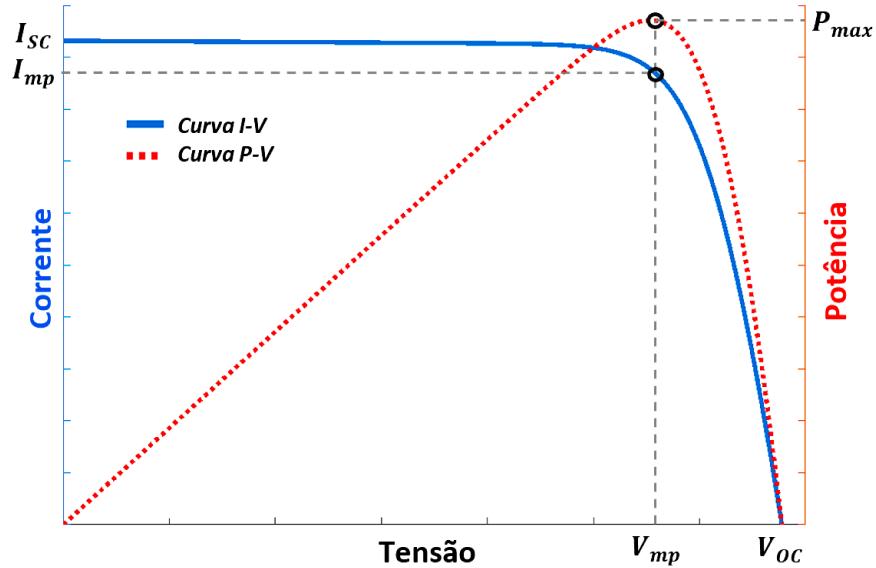


Figura 2.4: Curva característica I-V e P-V de um módulo FV.

Como se pode observar na Fig. 2.4, uma curva I-V típica tem uma trajetória suave e contínua, onde o valor da corrente sempre vai decrescendo conforme a tensão aumenta e para cada valor de tensão corresponde um único valor de corrente, considerando os outros parâmetros constantes. Além disso, na curva I-V, podem ser diferenciadas três regiões, uma região levemente inclinada no início da curva, quando a tensão é baixa e a corrente alta, uma curva ou “joelho” perto do ponto da máxima potência e uma região muito inclinada, quando os valores de tensão estão perto da tensão máxima [32]. Estas características são muito úteis no momento de examinar as condições de um módulo FV.

2.1.3 Fatores que alteram o desempenho de uma fonte FV

A partir da equação 2.6, pode-se observar que a corrente gerada pelo módulo FV depende de vários parâmetros, principalmente fatores ambientais, como a irradiação e a temperatura, ou fatores próprios como as resistências parasitas, as quais podem variar dependendo das condições do módulo.

A Fig. 2.5 mostra o desempenho de um módulo FV para diferentes valores de irradiação ($G_1 - G_4$), podendo-se observar uma maior influência no valor da corrente, a qual aumenta quando a irradiação é maior. Enquanto a Fig. 2.6 mostra as curvas características I-V para diferentes valores de temperatura ($T_1 - T_4$), onde se observa que a

temperatura tem uma maior influência na tensão, variando de forma inversamente proporcional, ou seja, a tensão diminui quando a temperatura aumenta. Além disso, embora em menor grau, a temperatura também influí no valor da corrente, a qual aumenta quando a temperatura é maior. Deve-se notar que a temperatura refere-se à temperatura do módulo FV, a qual é diferente da temperatura ambiente. Além disso deve-se considerar que a temperatura de operação do módulo FV pode ser influenciada pela velocidade do vento, a irradiação, a umidade, e as características térmicas das capas protetoras do módulo [26].

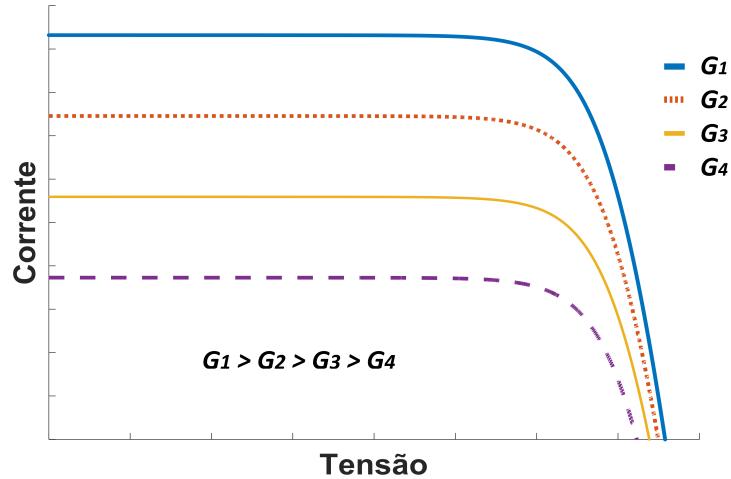


Figura 2.5: Curvas I-V para diferentes valores de irradiação.

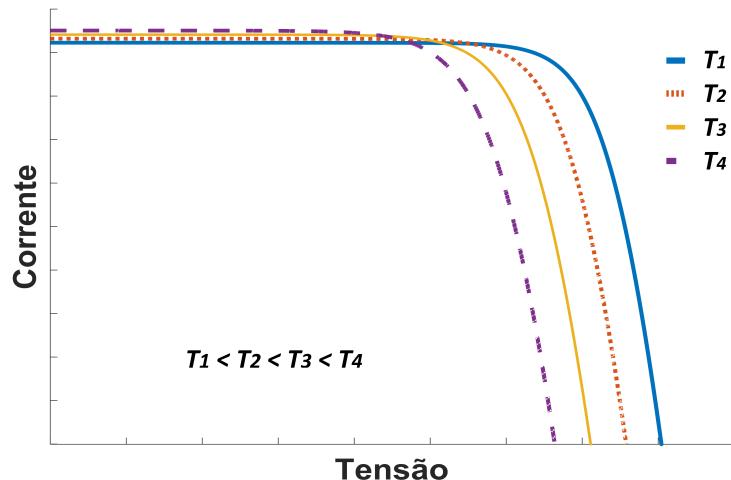


Figura 2.6: Curvas I-V para diferentes valores de temperatura.

O aumento do valor da resistência em série (R_s) também muda o desempenho do módulo FV, principalmente na região próxima da tensão máxima, diminuindo o declive da curva nessa região, tal como é mostrado na Fig. 2.7. Enquanto, na Fig. 2.8 pode-se observar que a diminuição da resistência Shunt (R_{sh}) afeta principalmente a região no início da curva, apresentando um declive mais acentuado quando o valor dessa resistência é

menor. O incremento do valor da resistência em série pode ser devido a certos mecanismos de degradação, como a corrosão de terminais metálicos nos conectores do módulo FV, na caixa de junções, ou nas interconexões entre as células. Além disso, as conexões elétricas ao longo do circuito também podem influenciar nesse valor. A diminuição da resistência *Shunt* tipicamente está associada a defeitos dentro de alguma célula PV ou nas interconexões das células [32]. Tanto a diminuição da resistência *Shunt* (em paralelo) quanto o aumento da resistência em série, causam uma maior dissipação de potência em forma de calor na célula FV, podendo causar a degradação prematura e permanente do módulo FV.

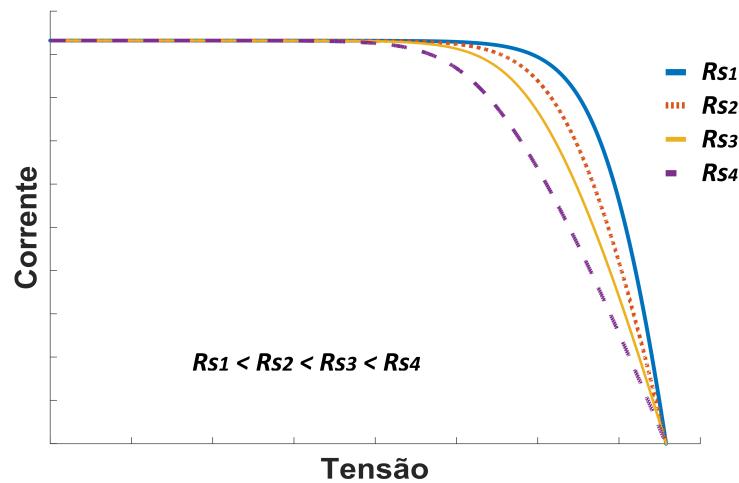


Figura 2.7: Curvas I-V para diferentes valores da resistência em série.

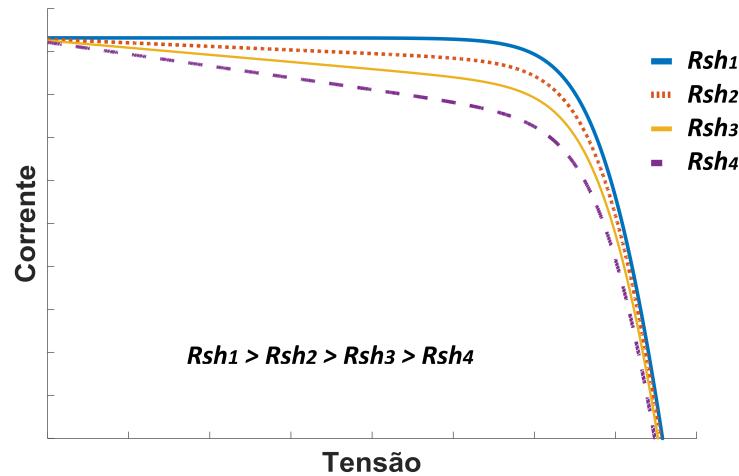


Figura 2.8: Curvas I-V para diferentes valores da resistência *Shunt*.

Finalmente, dado que os módulos de um sistema FV estão sempre ao ar livre, é possível que a irradiância, a qual incide sobre todas as células ou módulos, não seja homogênea, devido à sujeira irregular, sombreamento parcial ou em casos nos quais a inclinação ou orientação de alguns dos módulos sejam diferentes. Além disso, em casos em

que o sistema FV seja de grande porte, como em usinas, os módulos poderiam apresentar temperaturas de operação diferentes em razão da distribuição não uniforme de calor pelo sistema. Todos esses fatores, incluindo as diferenças de fábrica para um mesmo modelo de módulo FV e a degradação não uniforme no longo prazo, contribuem para que os módulos operem sob diferentes condições, consequentemente, o desempenho individual será diferente, gerando perdas por incompatibilidade (*mismatch losses*).

Nestes tipos de situação, a curva resultante será diferente da curva ideal apresentada na Fig. 2.4, tornando-se mais difícil localizar o ponto em que a fonte fornece a potência máxima, pois nestes casos, a curva I-V pode apresentar mais de um joelho, como é mostrado na Fig. 2.9. Consequentemente, a curva P-V apresenta mais de um pico de potência, onde apenas uma é a potência máxima, como pode-se observar na Fig. 2.10.

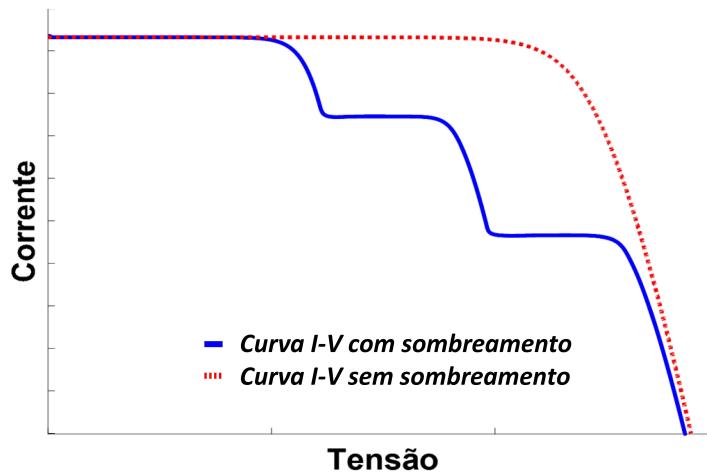


Figura 2.9: Curvas I-V de quatro módulos em série com sombreamento parcial (azul) e sem sombreamento (vermelho).

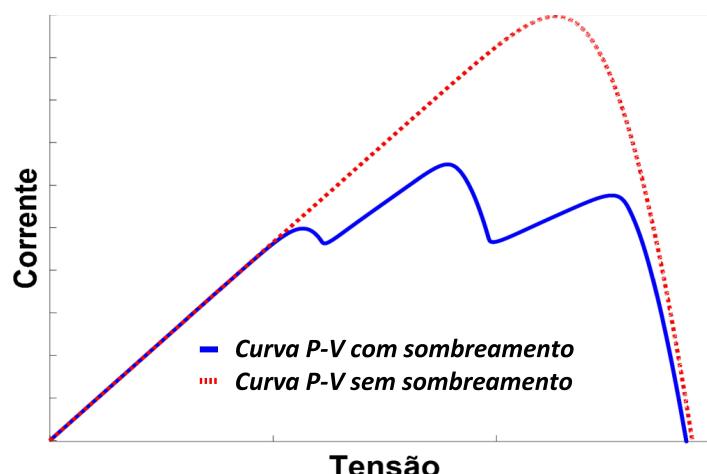


Figura 2.10: Curvas P-V de quatro módulos em série com sombreamento parcial (azul) e sem sombreamento (vermelho).

A partir da curva I-V obtida, é possível obter um parâmetro relevante para o comissionamento de um módulo FV, chamado fator de preenchimento ou *Fill Factor (FF)*. Ele é definido como a divisão da área formada pela tensão e corrente no ponto da potência máxima (V_{mp} e I_{mp}), entre a área formada pela tensão de circuito aberto V_{OC} e a corrente de curto-circuito I_{SC} , tal como é mostrado na equação 2.7. Devido ao fato que ele é afetado de forma direta pelos valores das resistências parasitas R_s e R_{sh} , é útil para medir a qualidade do módulo FV, dependendo da sua tecnologia.

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.7)$$

2.2 Avaliação de um módulo FV comercial

2.2.1 Características elétricas a partir da folha de dados

O fabricante proporciona uma folha de dados, também conhecido como *datasheet*, do módulo FV onde, além das características físicas, mecânicas e suas certificações, também apresenta características elétricas sob determinadas condições de irradiação e temperatura.

Nessa folha de dados, pode-se encontrar uma tabela com os principais parâmetros elétricos, como a potência máxima, a corrente e tensão no ponto de máxima potência, a tensão de circuito aberto, a corrente de curto-circuito e a eficiência do módulo (η), em condições de teste padrão (STC), sendo condições de teste padronizadas por organismos internacionais feitos no laboratório com a finalidade de comparar módulos diferentes sob os mesmos critérios [27]. Nestas condições, considera-se uma irradiação de 1000 W/m^2 e uma temperatura da célula FV de 25°C . A Tabela 2.1 mostra os parâmetros elétricos mencionados de um módulo FV em STC.

Tabela 2.1: Parâmetros elétricos do módulo CS6K-270P em STC.

	STC	CS6K-270P
P_{max}	270 W	
V_{mp}	30,8 V	
I_{mp}	8,75 A	
V_{OC}	37,9 V	
I_{SC}	9,32 A	
η	16,5 %	

A folha de dados também contém outra tabela, onde são apresentados os mesmos parâmetros elétricos mas em uma condição diferente, sendo na temperatura de operação normal da célula NOCT (ou temperatura nominal de operação do módulo NMOT), a qual representa condições mais próximas ao funcionamento real do módulo FV [27]. Nestas

condições considera-se uma irradiância de 800 W/m^2 , uma temperatura ambiente de 20°C e uma temperatura da célula FV entre 42°C ou 45°C , geralmente com um margem de $\pm 2^\circ\text{C}$. A Tabela 2.2 mostra os principais parâmetros elétricos de um módulo FV em NMOT (ou NOCT).

Tabela 2.2: Parâmetros elétricos do módulo CS6K-270P em NOCT.

	NOCT	CS6K-270P
P_{max}	199 W	
V_{mp}	29,3 V	
I_{mp}	7,01 A	
V_{OC}	35,3 V	
I_{SC}	7,52 A	

Outros parâmetros importantes apresentados pela folha de dados são as características térmicas do módulo PV, os quais são muito úteis para avaliar o comportamento do módulo quando há variações de temperatura [27]. A Tabela 2.3 abaixo apresenta as características térmicas do módulo CSK-270P, sendo elas, a faixa de temperatura de operação, o coeficiente de temperatura relacionado à potência máxima (γ), o coeficiente de temperatura relacionado à tensão de circuito aberto (β) e o coeficiente de temperatura relacionado à corrente de curto-círcuito (α).

Tabela 2.3: Características térmicas do módulo CS6K-270P.

Especificação	Dado
Temperatura de operação	- $40 - 85^\circ\text{C}$
Coeficiente γ	- $0,40 \text{ \%}/^\circ\text{C}$
Coeficiente β	- $0,31 \text{ \%}/^\circ\text{C}$
Coeficiente α	$0,05 \text{ \%}/^\circ\text{C}$

Além disso, é necessário ressaltar o desempenho do módulo FV operando em condições de baixa irradiância, apresentando uma eficiência média superior a 95% para irradiancias entre 200 W/m^2 e 1000 W/m^2 , segundo as informações presentes em sua folha de dados.

2.2.2 Correção da OPC para a STC

O desempenho de um sistema FV ao longo do seu tempo de vida é determinado pela comparação entre a medição da energia produzida e a produção esperada, considerando as condições ambientais registradas no momento das medições [33]. Com isso, para realizar uma devida comparação entre as características de um módulo FV no local da instalação e as proporcionadas pelo fabricante desse módulo, os testes devem ser realizados em condições ambientais similares. Para isso, é necessário levar em conta os procedimentos indicados nas normas IEC 60904-1, IEC 61829 e IEC 60891.

A norma IEC 60904-1 descreve os procedimentos para realizar as medições de tensão e corrente de um dispositivo FV (uma célula FV, arranjo de células ou um módulo FV) sob luz solar natural ou artificial, estabelecendo requisitos básicos para as medições e mostrando as práticas para minimizar a incerteza de medição [34]. A norma IEC 61829 especifica os procedimentos para fazer a medição das características do arranjo FV no local da instalação e das condições meteorológicas associadas, bem como o uso destes dados para transferi-lo às condições STC (com base na norma IEC 60891) [33].

A norma regulamentadora IEC 60891 define três diferentes procedimentos para fazer as correções de temperatura e irradiação das medições de corrente e tensão obtidos experimentalmente, para outras condições, além dos procedimentos usados para determinar os fatores relevantes para estas correções. De acordo com a norma, o “Método 2” apresenta melhores resultados para valores de correção de irradiação superiores a 20 %. Este método é baseado no modelo simplificado de um diodo (descrito na subseção 2.1.1), onde as equações de transferência semi-empíricas contêm cinco parâmetros de correção, que podem ser determinados pela medição das curvas I-V em diferentes condições de temperatura e irradiação [35].

Neste método, além dos coeficientes de temperatura do módulo FV (α e β), é usado um coeficiente de temperatura adicional (κ), para explicar as mudanças da resistência interna em série (R_s) e do fator de preenchimento (FF) com a temperatura. O procedimento de correção é definido pelas equações 2.8 e 2.9, para a corrente e a tensão respectivamente. Onde a é o fator de correção da irradiação para a tensão de circuito aberto. I_1 e V_1 são a corrente e tensão medidas nas condições de irradiação e temperatura também medidas G_1 e T_1 . Entanto, I_2 e V_2 são a corrente e tensão corrigidas às condições de temperatura e irradiação G_2 e T_2 , respectivamente.

$$I_2 = I_1 \cdot (1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)) \cdot \frac{G_2}{G_1} \quad (2.8)$$

$$V_2 = V_1 + V_{OC1} \cdot \left(\beta \cdot (T_2 - T_1) + a \cdot \ln \left(\frac{G_2}{G_1} \right) \right) - R_s \cdot (I_2 - I_1) - \kappa \cdot I_2 \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.9)$$

A medição da curva I-V no lugar da instalação e o uso dos procedimentos propostos pelas normas internacionais permitem caracterizar apropriadamente o sistema FV, e a partir desses dados, verificar o desempenho da potência instalada em relação às especificações do projeto, detectando possíveis diferenças entre as características do módulo testado e os indicados na folha de dados e, também, descobrir possíveis falhas como degradação dos módulos, strings e/ou arranjos fotovoltaicos em relação ao estado inicial.

Capítulo 3

Traçadores de curva I-V

O traçado da curva I-V é uma avaliação fundamental e necessária em toda a indústria fotovoltaica, tanto em ambientes internos de fabricação de células ou módulos fotovoltaicos, quanto em ambientes externos para os testes dos módulos, strings ou arranjos fotovoltaicos em uma instalação. O formato da curva I-V fornece um diagnóstico imediato para um especialista, e além disso, combinado com os dados associados de irradiação e temperatura, fornece uma comparação quantificada do desempenho esperado [24].

3.1 Características de um traçador de curva I-V

Para traçar a curva I-V de uma fonte FV, tipicamente são utilizadas cargas variáveis que permitem explorar todos os pontos de operação da fonte, alterando a corrente gerada entre seus limites, isto é, entre o ponto de curto-circuito (I_{SC}) e o ponto de circuito aberto (V_{OC}), fazendo as medições de corrente e tensão de maneira simultânea para cada variação, visto que o par forma um ponto da curva [36], ressaltando que, um maior número de pontos assegura uma melhor resolução do gráfico.

Geralmente, o equipamento destinado para fazer essa função tem uma carga variável, um bloco de aquisição e condicionamento dos sinais analógicos, um bloco de processamento e controle, bem como outros componentes externos necessários, como sensores de temperatura e irradiação. Além disso, para visualizar os dados ou ter o controle do equipamento, também é frequente o uso de uma interface homem-máquina (IHM) no computador ou no mesmo equipamento, usando botões e uma tela. A Fig. 3.1 mostra um esboço geral destes equipamentos.

Em relação aos sensores de corrente e tensão, bem como os circuitos para o condicionamento desses sinais, a maioria dos equipamentos comerciais têm a capacidade de fazer medições dessas grandezas elétricas com boa precisão de até 15 A e 1000 V respectivamente [6, 8, 37]. Também, em alguns casos, conseguem fazer medições de corrente até 30 A [7, 38], e os equipamentos mais recentes possuem uma faixa de medição de tensão de até 1500 V [39, 40], sendo este o valor máximo de tensão admitido pela norma brasileira

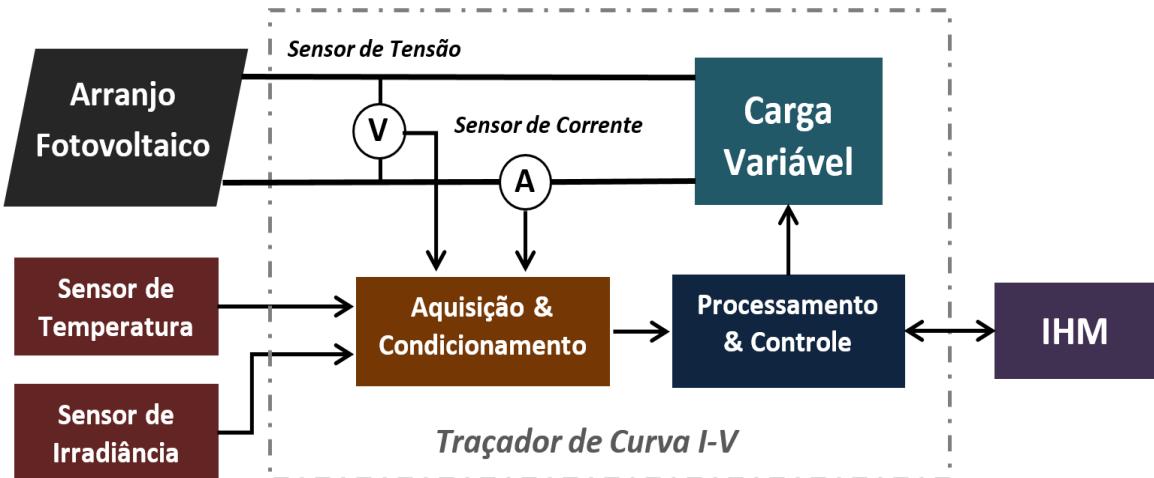


Figura 3.1: Esquema geral de um traçador de curva I-V.

ABNT NBR 5410 [41].

Para mensurar as condições ambientais, são utilizados sensores de irradiância e temperatura. A respeito do sensor de irradiância, utilizam-se principalmente células solares de referência, conseguindo medir valores de até 1400 W/m^2 [10]. Quanto às medições de temperatura, são utilizados termopares ou outros tipos de sensores especiais para medir esse parâmetro. Geralmente, estes sensores são conectados diretamente ao equipamento, no entanto, também é comum o uso de acessórios externos que realizam as medições de irradiância, temperatura e, em alguns casos, a inclinação dos módulos solares, os quais possuem uma conexão sem fio com o equipamento principal, a fim de facilitar as medições [9, 11].

Existem quatro diferentes tipos de cargas variáveis [36], sendo elas: carga resistiva variável, conversor CC-CC com carga resistiva, carga eletrônica e carga capacitiva. Não há muita informação sobre a carga variável utilizada nos equipamentos comerciais, mas geralmente os equipamentos de teste de campo utilizam cargas resistivas ou capacitivas, enquanto os sistemas de teste de referência I-V em instalações de pesquisa tendem a usar cargas eletrônicas [24]. Além disso, os conversores CC-CC com carga resistiva também são muito utilizados em pesquisas acadêmicas.

Finalmente, com relação à interface homem-máquina (IHM), todos os equipamentos comerciais possuem um aplicativo seja para o computador ou para tablet, onde é possível visualizar a curva I-V e fazer análises detalhadas dos dados obtidos. Parte desses equipamentos também possui uma tela onde é possível mostrar as principais grandezas elétricas, as curvas características e gerar uma análise capaz de fornecer soluções para problemas comuns em um sistema FV, como sujeiras, problemas de conexão, e falhas nos módulos. A Fig. 3.2 mostra alguns traçadores de curva I-V comerciais, as interfaces que utilizam e alguns dos acessórios utilizados para medir a irradiância e a temperatura.

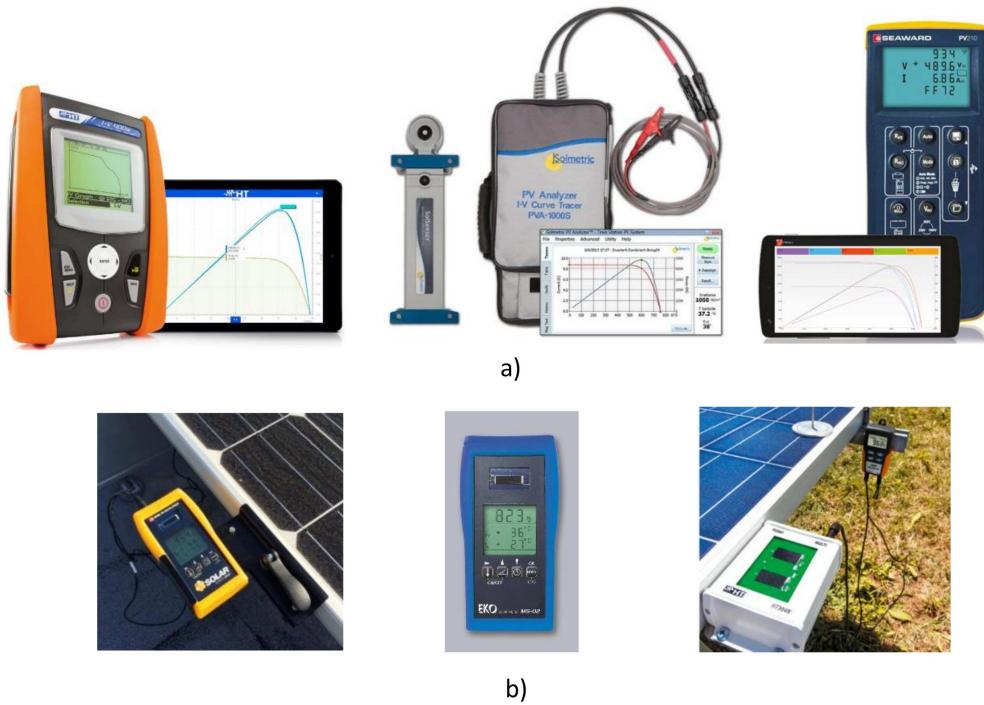


Figura 3.2: a) Traçadores de curva I-V comerciais [6–8]; b) módulos auxiliares [9–11].

3.2 Revisão dos principais métodos para obter as curvas características

Até agora, foram realizadas muitas pesquisas que mostram diferentes metodologias para caracterizar e traçar as curvas I-V e P-V de módulos, strings ou arranjos fotovoltaicos. Estes procedimentos se diferenciam na forma de aquisição e amostra dos dados, o tipo de carga variável ou os equipamentos de controle utilizados. Neste caso, as pesquisas foram agrupados de acordo com a carga utilizada, como em [36, 42], sendo elas: carga resistiva variável, conversor CC-CC com carga resistiva, carga eletrônica e carga capacitiva.

3.2.1 Carga resistiva variável

Idealmente, é possível traçar a curva característica perfeita de um módulo FV utilizando um potenciômetro que compreenda diferentes valores entre $R = 0$ e $R \approx \infty$, tal como é mostrado na Fig. 3.3. Mas na realidade, não há resistência variável com essas características e a potência dissipada pela resistência limitaria a caracterização do sistema. Outro fator relevante seria a variação do valor da resistência, pois teria de ser feita manualmente, dificultando a obtenção das mesmas medições em diferentes testes com o mesmo intervalo de tempo entre medições consequentes. No entanto, uma resistência variável poderia ser usada para testar células solares de baixa potência e sob condições controladas como em [43], cujos testes foram feitos em um simulador solar.

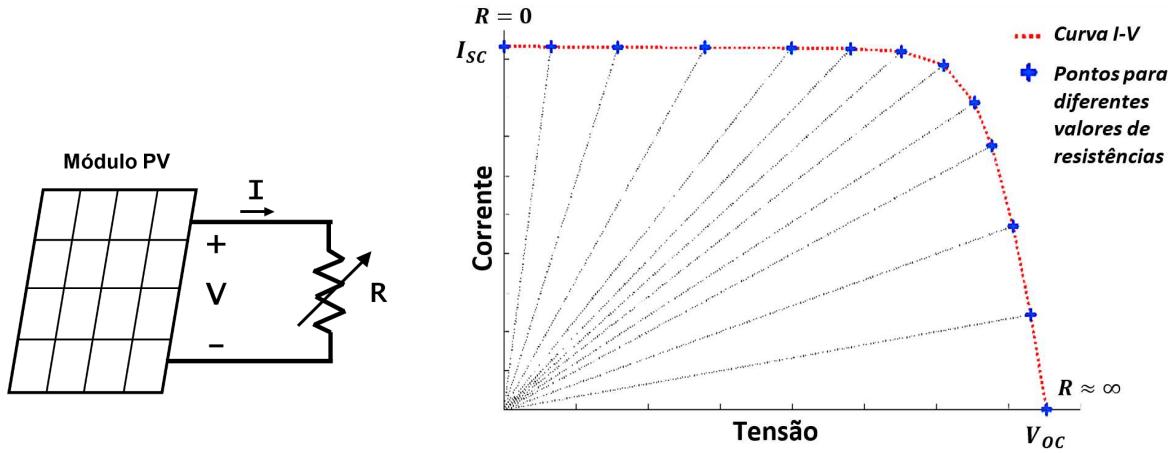


Figura 3.3: Simulação de uma resistência variável como carga, considerando uma boa dispersão de pontos.

Uma variação deste método, mais automatizado, é usando um arranjo de resistências de valores fixos que são selecionados de acordo com uma sequência de chaveamento, a fim de formar a curva característica. Em [44] foi usado um conjunto de resistências, onde cada uma delas possuía um relé, a fim de conseguir combinações, conectando-as independentemente ou em paralelo, considerando também um relé para a condição de curto-circuito. Já em [45] é mostrado com mais detalhes que, com 15 resistências foi possível ter um total de 48 pontos de medição diferentes, selecionados para obter uma boa distribuição de pontos ao redor do joelho da curva.

Analogamente, em [46] foi utilizado um conjunto de sete resistências, cada uma delas associada a um IGBT, mas a configuração citada permitiu que as combinações selecionassem as resistências de maneira independente ou conectadas em série, aferindo um total de 257 pontos de medição. Enquanto em [47], foram usadas apenas seis resistências, as quais são ativadas independentemente e em sequência por meio de relés mostrando a simplicidade da implementação deste método para obter curvas características suficientemente detalhadas de módulos fotovoltaicos de baixa potência. Na Fig. 3.4 são mostradas as duas configurações mencionadas para a seleção das resistências.

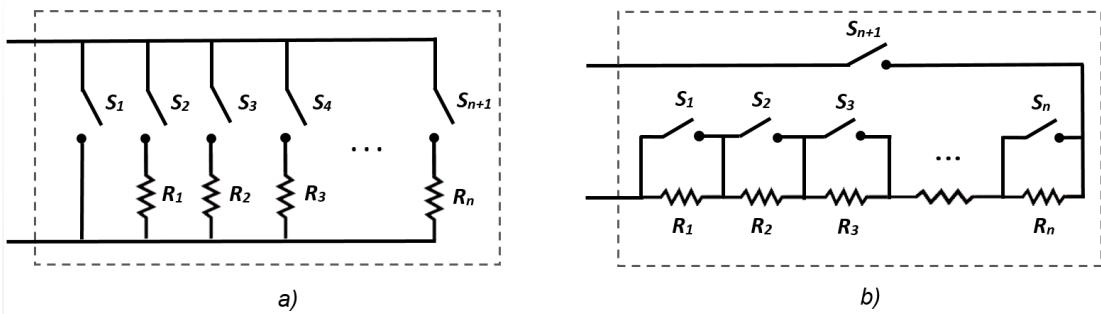


Figura 3.4: Configurações das resistências: a) seleção em paralelo; b) seleção em série.

3.2.2 Conversor CC-CC com carga resistiva

Um conversor CC-CC é um circuito eletrônico capaz de mudar o valor da tensão contínua de sua entrada para outro nível de tensão também contínua em sua saída, em função da largura do pulso do sinal de controle. Além disso, em geral, estes circuitos têm uma alta eficiência, transferindo a maior parte da potência de entrada para a saída. Se é conectada uma fonte FV na entrada do conversor e uma carga resistiva fixa em sua saída, como é mostrada na Fig. 3.5, é possível variar a potência na saída ao variar a tensão nela, causando uma mudança dos valores de corrente e tensão na fonte, obtendo-se assim sua curva característica. Portanto, o conversor e a resistência fixa podem se comportar como uma resistência variável cujo valor de resistência equivalente pode ser controlado através do sinal de controle do conversor.

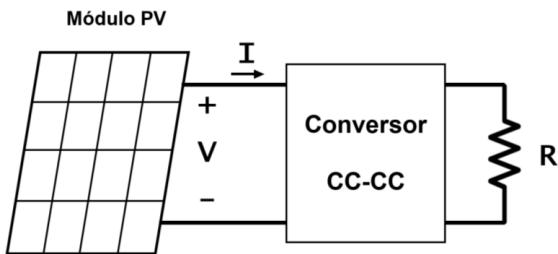


Figura 3.5: Carga resistiva fixa através de um conversor CC-CC.

Em [48], foi desenvolvido um protótipo baseado em um conversor CC-CC que possui dois modos de operação. No primeiro modo, o conversor possui a função de um *Buck*, sendo utilizado para medir as curvas características de módulos fotovoltaicos. Enquanto, no segundo modo, o conversor tinha a função de um *Boost*, utilizando-se para emular o comportamento dos geradores fotovoltaicos. Os resultados experimentais focados no primeiro mostram como o dispositivo proposto pode ajudar a investigar configurações ótimas para sistemas fotovoltaicos.

Em [49] foi feito uma comparação entre as resistências equivalentes de entrada dos conversores CC-CC, a fim de ser utilizados no traçado da curva característica de uma fonte FV. Menciona-se que o conversor *Buck- Boost* ou outras topologias derivadas dele (Zeta, Cuk e SEPIC), são capazes de varrer a curva inteira da fonte, validando-o com resultados de simulações. Em [50, 51] também foram feitas análises similares, mas neles é mencionado a importância de anular as possíveis ondulações na corrente fornecida pela fonte, causadas pelo conversor, mostrando as vantagens das topologias SEPIC e Cuk em relação às pequenas ondulações de corrente na entrada. É mencionado também que a topologia SEPIC é a mais conveniente dentre elas, devido a algumas vantagens em sua implementação (a tensão de saída está no mesmo sentido que a tensão de entrada). A Fig. 3.6 mostra os pontos de operação de uma fonte FV para alguns valores do ciclo de trabalho de um conversor CC-CC com topologia SEPIC, bem como a curva traçada.

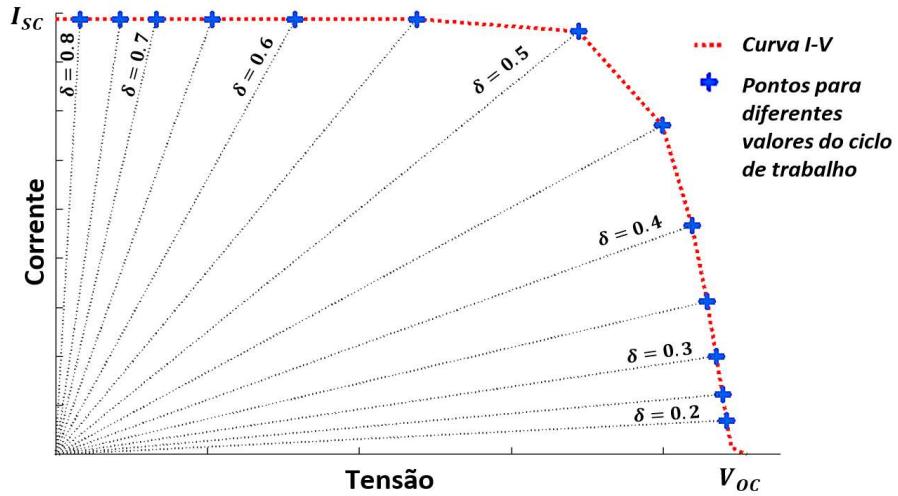


Figura 3.6: Pontos de operação de uma fonte FV para diferentes valores do ciclo de trabalho de um conversor CC-CC.

Em [50] foram feitos a análise teórica e o dimensionamento da topologia SEPIC, apontando o uso de indutores acoplados, os quais sob certas condições garantem uma ondulação nula na corrente, e apresentando resultados de simulações que confirmam a análise feita. Enquanto em [51], este conversor foi implementado, fornecendo bons resultados em baixa potência. Também propõe o uso de conversores em paralelo para conseguir trabalhar com potências maiores. Em [52, 53] foram feitas simulações de quatro conversores conectados em paralelo, mas com dois modos de controle, o modo intercalado e o modo síncrono. Os resultados são melhores do que no primeiro modo, pois exibe menor amplitude de ondulação e menor quantidade de harmônicos na corrente de entrada, sendo inclusive menor que para um único conversor de maior potência. No entanto, a técnica de intercalação requer maior complexidade do circuito.

Em [54], foram avaliadas e comparadas oito topologias de conversores CC-CC com modo de conversão *Buck-Boost*, procurando a mais adequada em função da ondulação da corrente e tensão de entrada, a potência que tem que suportar os componentes que os compõem, o tamanho dos componentes magnéticos e o isolamento de entrada-saída. Mostrando-se novamente que as topologias SEPIC e Cuk são as mais apropriadas. Em [55–58] a topologia SEPIC novamente foi selecionada. Em [57] foi proposto para fazer monitoramento e operar de forma autônoma em linha com o inversor em uma instalação, sendo feitas simulações que mostram sua capacidade de traçar a curva I-V sob condições ideais e com sombreamento. Enquanto, nos outros casos foi implementado para aplicações de baixa potência, mostrando resultados experimentais que concorda com a análise teórica feita previamente.

Em [59], foi proposto o uso da topologia *Buck*, para fazer testes com diferentes tipos de fontes, destacando a capacidade desse circuito para simular uma carga variável e gerar a curva característica de um painel solar. Mas, com esta topologia foi necessário o uso

de um filtro passa-baixas na entrada do conversor, para suprimir as ondulações de corrente indesejadas na fonte. Enquanto em [60–63] foi considerado o uso da topologia *Boost*, onde as simulações dos circuitos propostos, sob irradiação uniforme e sombreamento parcial, bem como os testes dos circuitos que foram implementados, mostraram resultados satisfatórios. Além disso, em [63] destaca-se o uso dessa topologia sem a necessidade de outros dispositivos externos, pois esse conversor normalmente é usado em sistemas fotovoltaicos para rastrear o ponto de potência máxima e controlar o carregamento de baterias.

3.2.3 Carga eletrônica

Uma carga eletrônica pode ser realizada com um dispositivo semicondutor que pode ser controlado eletronicamente ao aplicar valores convenientes de tensão ou corrente entre seus terminais de controle, a fim de conseguir uma corrente desejada através dele. Os transistores são os dispositivos mais comuns para esses fins, principalmente o BJT, o MOSFET e o IGBT, mostrados na Fig. 3.7. Os quais, embora sejam majoritariamente usados como dispositivos de chaveamento rápidos, também podem se comportar como uma resistência variável sob um controle apropriado.

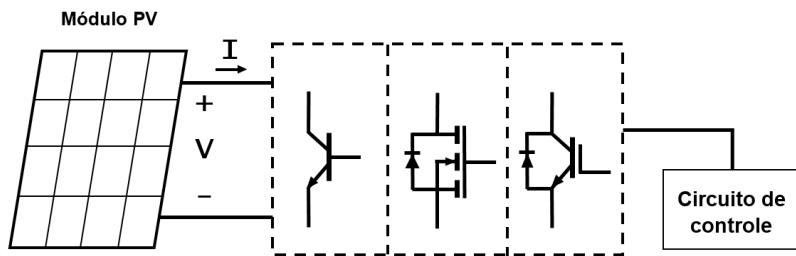


Figura 3.7: Principais tipos de carga eletrônica.

Em [64], utilizou-se uma carga variável baseada em um transistor MOSFET, que suporta alta tensão, em série com uma resistência de um valor conveniente, a fim de dissipar uma parte da potência dos módulos fotovoltaicos testados, mas sem afetar os pontos de interesse da curva I-V que poderiam ser cobertos pelo transistor (perto da corrente máxima). Neste caso, foi feita uma análise dos pontos de operação do módulo FV e do MOSFET, obtendo-se equações úteis para seu controle, sendo feito através da tensão V_{GS} . Também é mencionado que muitos desses dispositivos podem trabalhar sem inconvenientes em paralelo, para aumentar a faixa de corrente, ao passo que para aumentar a faixa de tensão e trabalhar em série, é preciso implementar circuitos mais complexos. Na Fig. 3.8 pode-se observar a interseção dos pontos de operação do dispositivo e do módulo FV quando o valor da resistência em série é nula.

Em [65], foram utilizados transistores de potência BJT conectados em paralelo e em cascata (combinação Darlington) para que possam lidar com altas correntes, sendo controlado através de um único transistor, realizando pequenas variações da corrente na

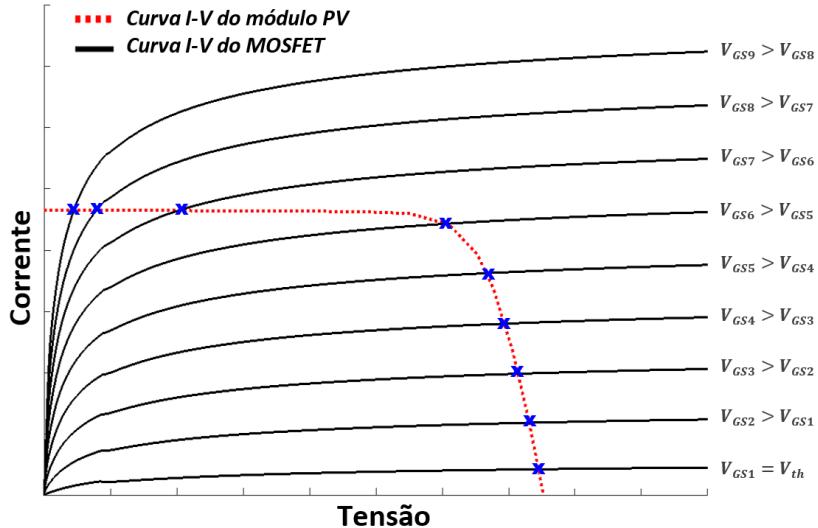


Figura 3.8: Curva característica do MOSFET e do módulo FV.

base deste. Além disso, cada transistor possui resistências projetadas para que os pinos do transistor sejam devidamente polarizados, sendo o circuito todo conectado em série com uma bateria capaz de suportar altas correntes, a fim de alimentar os transistores quando a tensão da fonte FV for baixa. Enquanto, em [66] foi desenvolvido um protótipo que usa quatro MOSFETs conectados em paralelo e sem resistência de dissipação. O dispositivo foi selecionado de acordo com sua resistência interna em estado ativo e pela potência que pode dissipar.

Analogamente, em [67, 68] também foram desenvolvidos circuitos eletrônicos baseados neste dispositivo, para fazer as medições de módulos fotovoltaicos ou strings de baixa potência, considerando a opção do uso de um transistor IGBT para sistemas fotovoltaicos de tensões maiores. Neste caso, um circuito de controle isolado foi projetado para que fosse útil para os dois tipos de transistores, usando um conversor CC-CC. Além disso, como é utilizado apenas um MOSFET, em [68] é considerada também a área de operação segura do dispositivo, onde pode-se observar a potência máxima suportada pelo componente durante certo intervalo de tempo, ressaltando que esses dispositivos podem dissipar potências elevadas durante curto tempo. Na Fig. 3.9 é mostrada a área máxima de operação segura de um MOSFET e de um IGBT.

De modo semelhante, em [69–73] novamente foram usados dispositivos MOSFET para desenvolver protótipos de baixo custo empregados na caracterização de módulos fotovoltaicos em um curto tempo, fazendo testes experimentais e evidenciando principalmente a facilidade do controle desse dispositivo, o qual é feito através de sinais analógicos, com a descarga de um capacitor e com o uso de um sinal PWM com um filtro passa baixa. Além disso, em [71] foi feita uma análise teórica da resposta do sistema de controle, obtendo uma boa distribuição de pontos na curva característica. Já em [74], foi feito um protótipo similar aos previamente citados, mas utilizando um dispositivo IGBT.

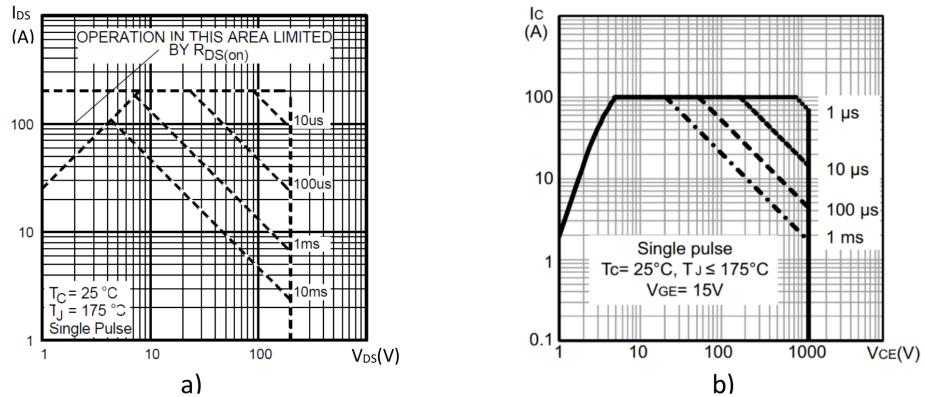


Figura 3.9: Área de operação segura: a) do MOSFET IRFP260N [12]; b) do IGBT STGWA25H120DF2 [13].

3.2.4 Carga capacitiva

O capacitor é um elemento capaz de armazenar energia elétrica. Se inicialmente este componente está descarregado e é aplicada uma tensão em seus terminais, a carga aumentará gradualmente até certo valor proporcional a essa tensão, comportando-se como curto-circuito no início desse processo e como circuito aberto no final, tal como é mostrado na Fig. 3.10. Esta característica foi aproveitada em [75], onde foi feita uma análise transitória da carga de um capacitor, usando um gerador FV como fonte, obtendo uma relação direta entre o valor da capacitância (que influi no tamanho dele) e o tempo que dura o processo (tempo de estabilização).

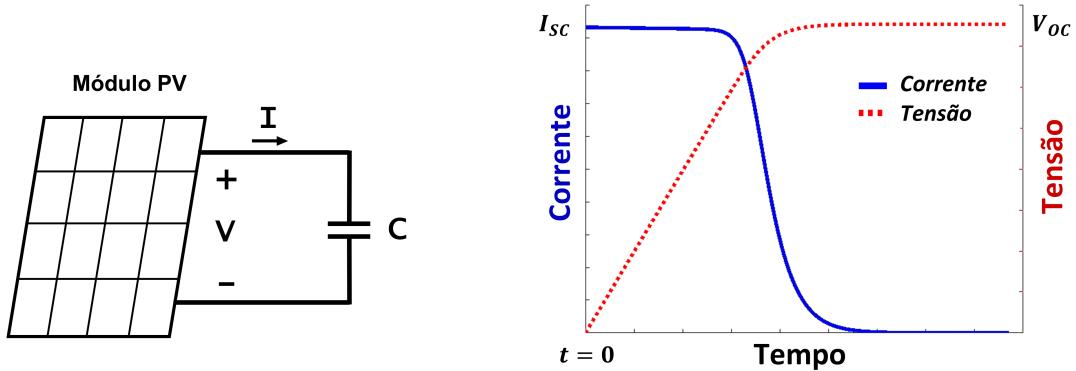


Figura 3.10: Curvas de corrente e tensão no capacitor inicialmente descarregado, utilizando um módulo FV como fonte.

No circuito projetado foi considerada uma resistência para descarregar o capacitor e chaves para trocar de estado entre a carga e a descarga, sendo controladas por um sistema computadorizado. Em [76] foi desenvolvido um equipamento portátil, projetado para medições de arranjos fotovoltaicos, fazendo uso de um circuito similar, mas adicionando uma fonte CC, utilizada para pré-carregar o banco de capacitores com uma tensão negativa,

compensando assim as quedas de tensão e permitindo obter o ponto de curto-circuito. Enquanto, em [77–79], foram feitos desenvolvimentos similares, utilizando dispositivos IGBT ou MOSFET para fazer os chaveamentos em uma sequência apropriada. Os protótipos desenvolvidos foram testados com luz natural e sob diferentes condições de sombreamento, exceto em [77], que foi testado em um simulador solar com diferentes valores de irradiação. A Fig. 3.11 mostra as configurações descritas.

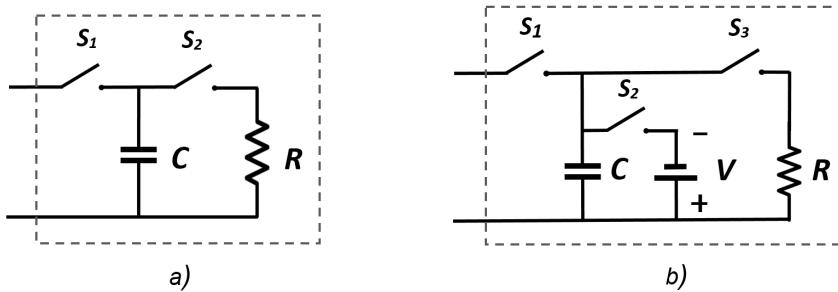


Figura 3.11: Configurações de carga capacitiva: a) com resistência para a descarregue; b) com uma fonte de tensão para a pré-carregue e resistência para a descarregue.

Em [80] foi desenvolvido um sistema flexível composto de dois tipos de cargas variáveis, uma carga eletrônica (MOSFET) e uma carga capacitiva (dois capacitores conectados em série), para fazer medições de módulos fotovoltaicos e strings de altas tensões, respectivamente, obtendo resultados satisfatórios nos testes experimentais. Enquanto, em [81] foi implementado um circuito próprio para strings fotovoltaicas e observou-se que o tempo de carregamento do capacitor variava de acordo com a quantidade de módulos que compunham as strings, o que dificultou a previsão de tempo entre as medições. Além disso, o sistema perdia precisão quando a corrente era baixa, ou seja, nas condições de sombreamento ou pouca irradiação, pois o equipamento não era adequado para atuar nessas condições.

Em [82] foi feita uma análise semelhante a [75] com um maior rigor matemático, porém obteve resultados muito próximos, onde mostra que o dimensionamento do capacitor também depende da corrente e tensão máximas do arranjo FV, e menciona que este método pode ser utilizado para traçar a curva característica de sistemas de qualquer tamanho. Também ressalta que a capacidade parasita e a indutância do gerador FV produzem oscilações no sinal de corrente de carga, causando a perda da porção inicial da curva, mas um valor de capacidade suficientemente alto pode mitigar estes efeitos. Além disso, aponta que o dimensionamento é diferente para módulos de diferentes tecnologias, precisando de capacitores com melhores características para aqueles de alta eficiência.

Também é proposto o uso desse método para obter o ponto de potência máxima de um sistema FV. Considerando que a fonte de geração foi retirada do circuito, o curto período de carga do capacitor é suficiente para realizar a varredura da curva I-V. Enquanto, em [83] destaca-se a facilidade do controle desse método e a possibilidade de desenvolver

um sistema diretamente integrado a uma usina FV, obtendo a curva I-V em tempo real sem interromper a operação da usina.

3.3 Análise dos métodos descritos

Uma das principais características dos traçadores de curva I-V está relacionada com o tempo de medição, o qual deve ser suficientemente curto para evitar variações significativas de irradiância e temperatura, visto que a corrente e tensão da fonte FV dependem diretamente desses parâmetros. No entanto, há um limite de velocidade de traçado para determinadas tecnologias, principalmente para as células de alta eficiência, as quais não podem ser varridas rapidamente de forma arbitrária [24].

3.3.1 Simulação dos quatro tipos de carga

Para as simulações, foram consideradas uma fonte FV com as características elétricas do módulo CS6K-270P, indicadas na tabela 3.1, um bloco da carga variável e um bloco de controle, como é mostrado na Fig. 3.12. Sendo a fonte FV igual para todos os casos, o controle sem realimentação e um tempo de traçado menor que 1s.

Tabela 3.1: Características elétricas do módulo CS6K-270P [14].

V_{oc}	I_{sc}	P_{max}	V_{mp}	I_{mp}
37,9 V	9,32 A	270 W	30,8 V	8,75 A

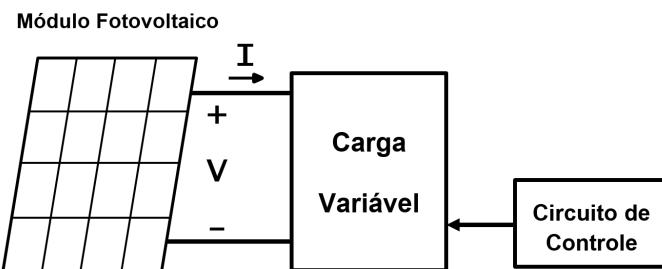


Figura 3.12: Diagrama básico de um módulo FV com uma carga variável.

Carga resistiva variável

Para este caso, foram considerados sete resistências com valores fixos de 1Ω , 2Ω , 3Ω , 4Ω , 6Ω , 10Ω e 50Ω , além de oito chaves IGBT, as quais conectam ou desconectam as resistências da fonte FV, utilizando uma das chaves para obter a corrente de curto-circuito, configuradas em paralelo segundo a Fig. 3.4. Os valores das resistências foram selecionados com a finalidade de obter uma boa dispersão de pontos ao longo da curva característica. A Fig. 3.13 mostra o circuito implementado.

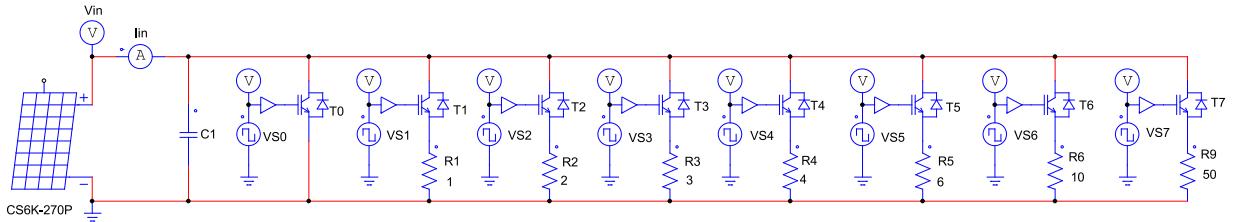


Figura 3.13: Arranjo de resistências conectadas em paralelo.

A seleção das chaves foi feita de forma sequencial, fazendo com que as resistências fossem conectadas uma a uma, do menor ao maior valor, considerando também o caso de todas as chaves abertas, equivalendo à operação do módulo PV na condição de circuito aberto. Com ajuda do software PSIM, foi feita a simulação do circuito da Fig. 3.13, considerando um tempo de ativação de 10 ms para cada chave. A Fig. 3.14 mostra os sinais de controle utilizados para cada chave e as formas de onda de tensão e corrente do módulo FV em função do tempo.

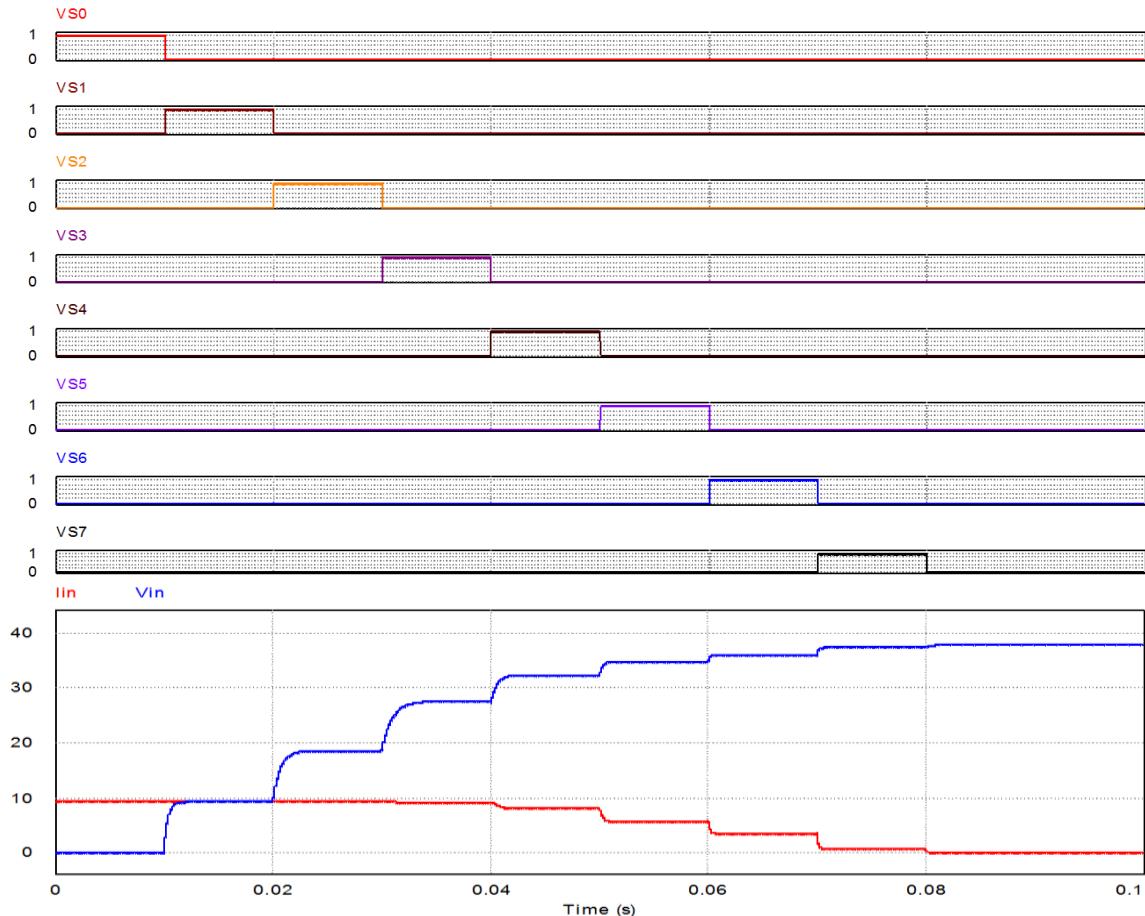


Figura 3.14: Sinais de controle de cada uma das chaves (em cima), e formas de onda da tensão e da corrente do módulo FV (em baixo).

Na Fig. 3.14 pode-se observar que a diferença de tensão ou corrente entre a

seleção de duas resistências consecutivas não é uniforme, e quando são selecionadas as três primeiras chaves, não há variações significativas de corrente (pouco mais de 100 mA), enquanto a variação da tensão é considerável (perto de 10 V). No entanto, selecionando as resistências, uma a uma, é possível conseguir uma boa dispersão de pontos, como é mostrado nas curvas I-V e P-V da Fig. 3.15. Deve-se notar que, para obter uma maior dispersão de pontos, também é possível conectar duas ou mais resistências em paralelo a fim de obter uma maior dispersão de pontos e uma melhor caracterização do módulo PV.

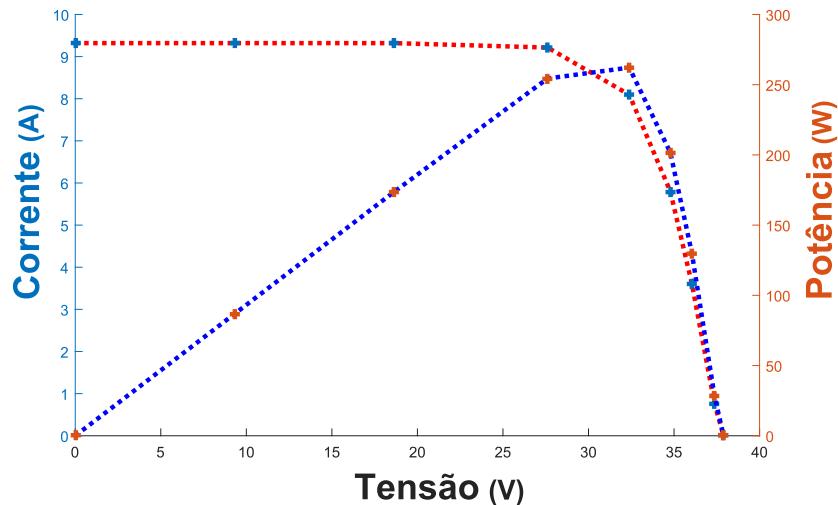


Figura 3.15: Curva I-V (vermelho) e curva P-V (azul) do módulo FV, mostrando os pontos correspondentes aos valores de resistências selecionadas.

Conversor CC-CC com carga resistiva

Neste tipo de carga, foi implementado um conversor SEPIC cujo dimensionamento foi feito para suportar potências maiores que a potência do módulo FV considerado. A Fig. 3.16 mostra o esquema do circuito do conversor com a fonte FV, enquanto a Fig. 3.17 mostra o esquema do controle utilizado para conseguir traçar a curva característica.

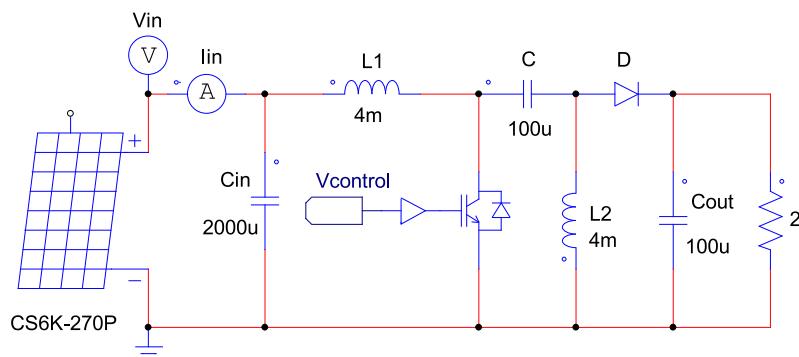


Figura 3.16: Módulo FV conectado a um conversor SEPIC com carga resistiva.

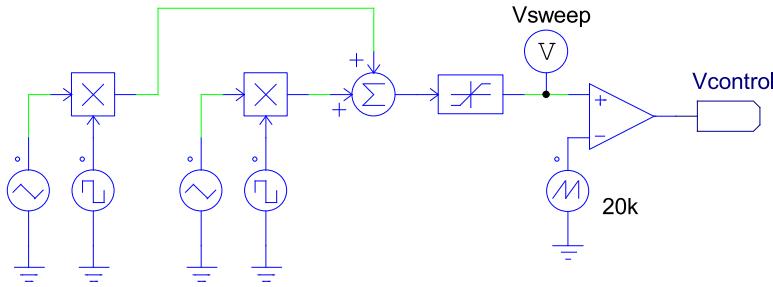


Figura 3.17: Esquema de controle do conversor SEPIC.

O sinal de controle faz com que o ciclo de trabalho do conversor CC-CC comece desde que estiver desligado ($\delta = 0$), incrementando-se até um valor máximo ($\delta = 0,8$) depois do qual o conversor é desabilitado novamente. Foi considerado esse valor máximo, já que a relação entre a tensão de saída e da entrada declina a medida que o ciclo de trabalho se aproxima à unidade, devido às perdas nos componentes do conversor [84]. Utilizando o software PSIM, foi feita a simulação do circuito das figuras anteriores, enquanto na Fig. 3.18, pode-se observar o sinal que representa o ciclo de trabalho do conversor antes de ser modulado com um sinal periódico de 20 kHz, bem como a variação da tensão e da corrente do módulo FV em função do tempo, segundo esse sinal de controle.

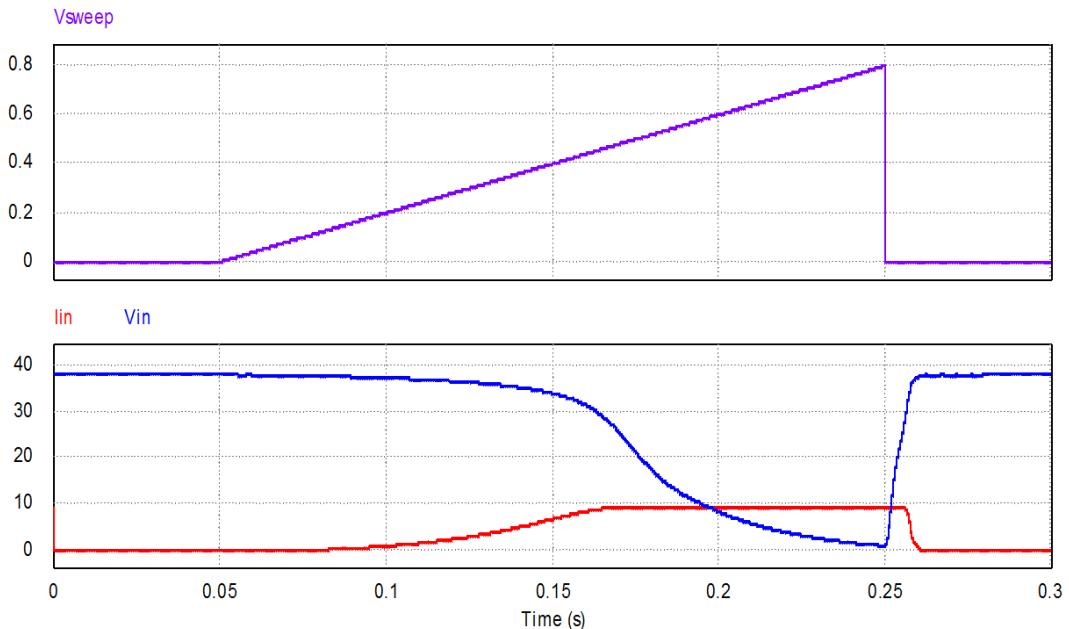


Figura 3.18: Sinal que representa o valor do ciclo de trabalho do conversor (em cima). Formas de onda de tensão e de corrente do módulo FV (em baixo).

A Fig. 3.19 mostra as curvas I-V e P-V, além dos pontos gerados pelos ciclos de trabalho δ entre 0 e 0,8 com um passo de 0,05 entre eles. Para obter uma melhor distribuição de pontos, têm-se que selecionar os valores apropriados de δ ou com um passo menor do que o considerado. Destaca-se que a varredura da curva foi feita em um tempo

de 200 ms.

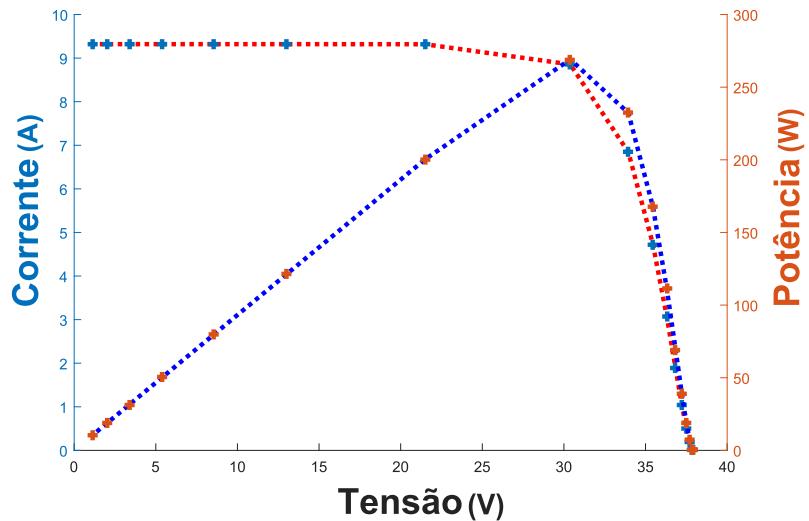


Figura 3.19: Curva I-V (vermelho) e curva P-V (azul) do módulo FV, mostrando os pontos correspondentes a alguns ciclos de trabalho do conversor.

Carga eletrônica

Neste caso, foi utilizada como carga eletrônica o MOSFET IRFP260, conectado a um módulo FV como na Fig. 3.20. O sinal de controle aplicado na porta do MOSFET foi um sinal tipo rampa de 1 s de duração, cujo valor vai desde a tensão limiar $V_{TH} = 3\text{ V}$ até a tensão $V_{GS} = 10\text{ V}$, onde a resistência R_{DS} do MOSFET é suficientemente baixa [12].

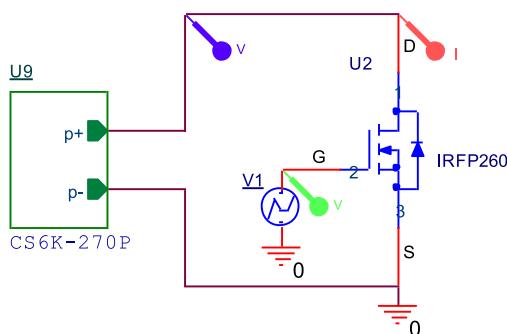


Figura 3.20: Módulo FV e MOSFET como carga eletrônica.

Com a finalidade de obter resultados mais reais, foi feita a simulação do circuito da Fig. 3.20 utilizando o modelo PSpice do dispositivo eletrônico. O sinal de controle descrito previamente, além dos sinais de tensão e corrente do módulo FV em função do tempo são mostrados na Fig. 3.21. Pode-se observar que a maior variação da corrente e tensão do módulo ocorre para uma pequena faixa de tensão do sinal aplicado, principalmente entre a faixa de 4.2 V e 5 V.

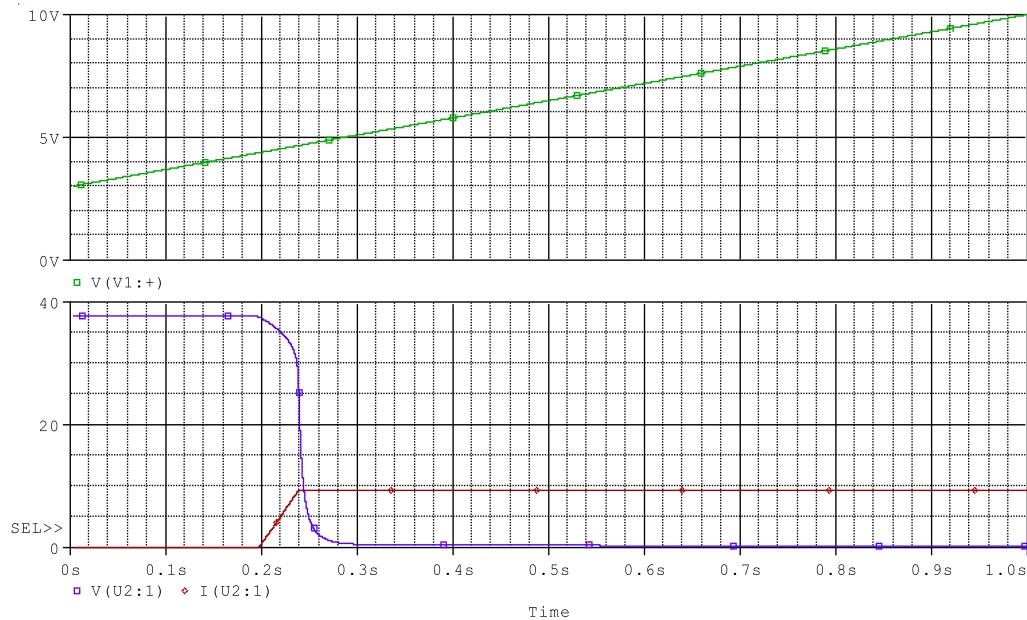


Figura 3.21: Sinal de controle do MOSFET (em cima). Formas de onda da tensão e da corrente do módulo FV (em baixo).

A Fig. 3.22 mostra as curvas I-V e P-V do módulo FV, ressaltando os pontos gerados a partir de determinados valores de tensão e controle onde ocorre a maior variação, com a finalidade de obter uma boa distribuição de pontos nas curvas.

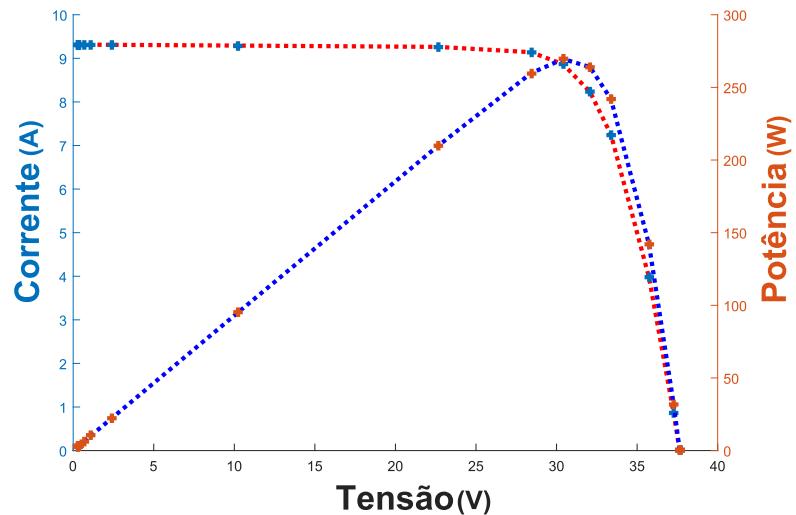


Figura 3.22: Curva I-V (vermelho) e curva P-V (azul) do módulo FV.

Carga capacitiva

Para este tipo de carga foi considerado um capacitor de 4,7 mF, com uma resistência para a descarga, segundo a configuração da Fig. 3.11, com a finalidade de conseguir

repetir o procedimento de carga e descarga de forma automática. O valor da capacitância foi obtido considerando a relação mostrada em [82], para um tempo de traçado curto (menor que 50 ms). A Fig. 3.23 mostra o circuito implementado.

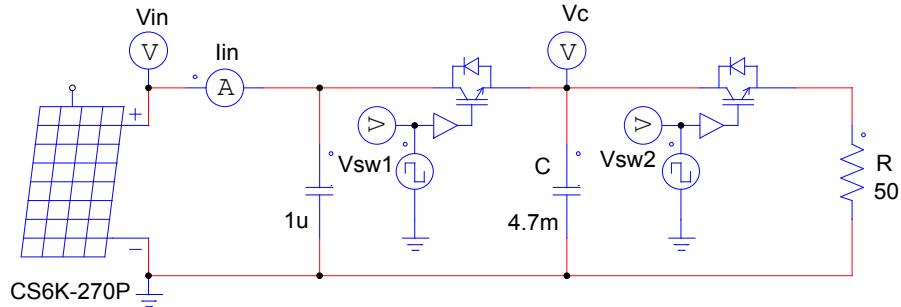


Figura 3.23: Módulo FV e circuito com carga capacitiva e chaves para carregar e descarregar o capacitor.

Uma vez iniciada a carga do capacitor, o tempo que ele toma até ficar completamente carregado, depende de sua capacitância e dos valores máximos de tensão e corrente do módulo FV. O sinal da chave de carga, neste caso foi um pulso de 50 ms de duração, enquanto a duração do pulso aplicada na chave de descarga, além do valor da capacitância, depende da resistência utilizada. Na simulação foi um tempo de 1,4 s. Esses sinais são mostrados na Fig. 3.24, onde pode-se observar que o tempo de carga é curto em comparação com o tempo de descarga, devido ao valor da resistência de descarga 50Ω , com a finalidade que a potência dissipada não seja muito elevada (menor que 30 W).

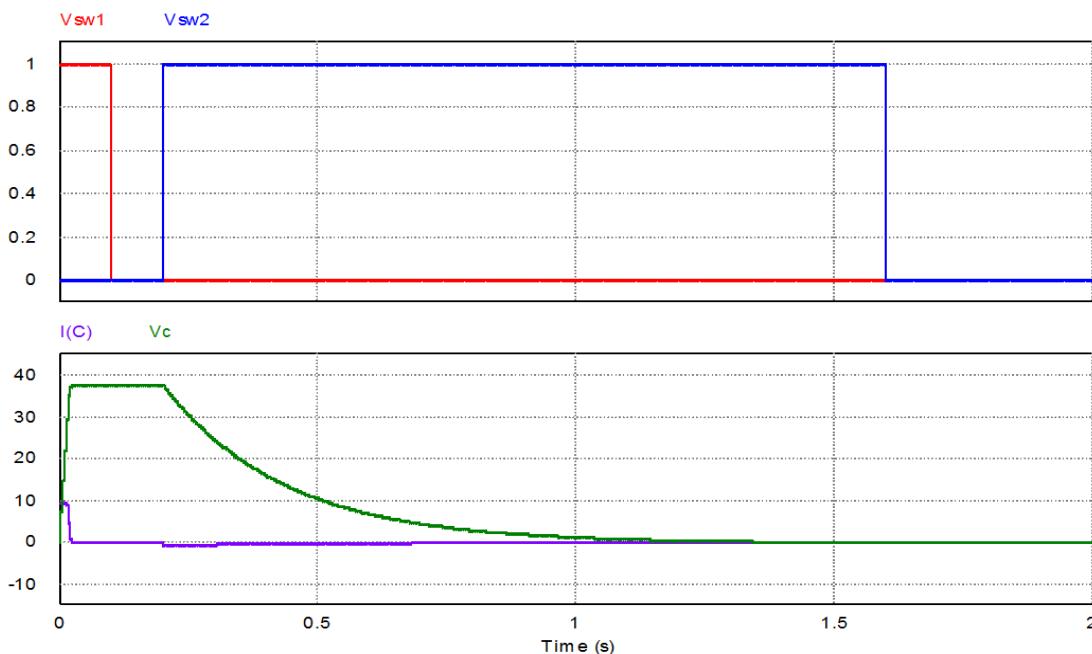


Figura 3.24: Sinal de controle das chaves para a carga e a descarga do capacitor (em cima). Formas de onda da tensão e da corrente do capacitor em função do tempo (em baixo).

A Fig. 3.25 mostra as formas de onda da tensão e da corrente do módulo FV em função do tempo, o qual foi obtido durante a carga do capacitor. Enquanto a Fig. 3.26 mostra as curvas I-V e P-V do módulo FV, ressaltando os pontos gerados cada certo intervalo de tempo entre o início e 50 ms, mas com uma maior concentração de pontos entre 10 ms e 20 ms.

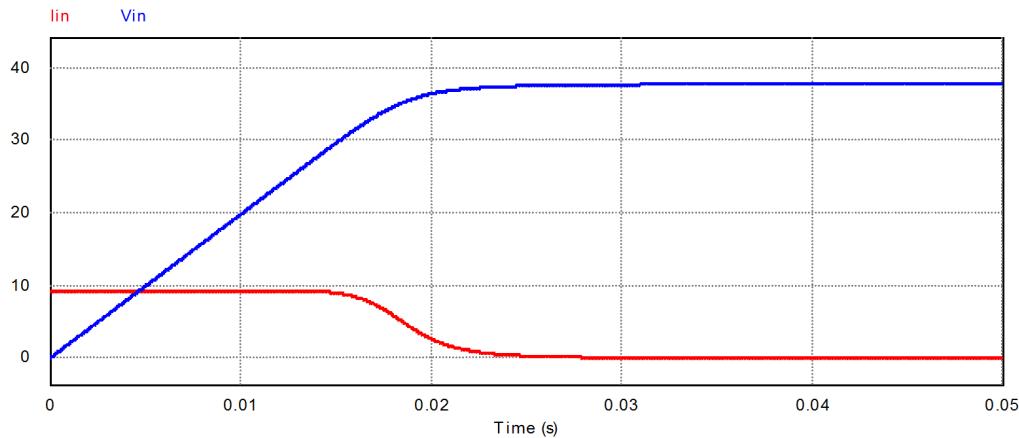


Figura 3.25: Formas de onda da tensão e da corrente do módulo FV em função do tempo.

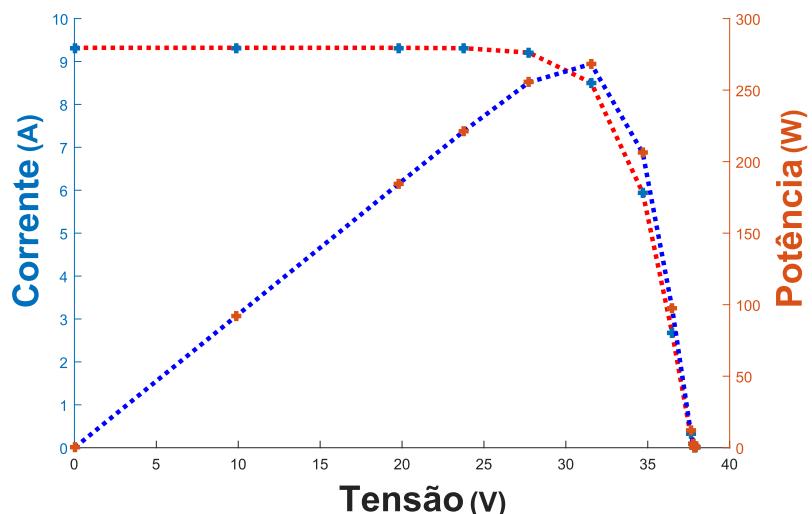


Figura 3.26: Curva I-V (vermelha) e curva P-V (azul) do módulo FV.

3.3.2 Comparação entre os métodos

Em relação às medições de corrente e tensão, nos artigos revisados foram utilizados diferentes tipos de sensores, circuitos ou módulos, os quais dependem da faixa de medição dos parâmetros elétricos, bem como do circuito de acondicionamento utilizados para apresentar os dados ou para efeitos de controle em situações onde há realimentação.

No caso do controlador, a maioria dos artigos revisados utilizaram uma interface através de um computador, circuitos digitais ou aproveitando a flexibilidade de um microcontrolador. Nestes artigos também foram mencionados o uso de componentes com isolamento elétrico, fornecendo uma maior segurança para o operador do equipamento.

Para as comparações, a fim de diferenciar as vantagens ou limitações das cargas utilizadas, foram consideradas características relacionadas à capacidade de medição do equipamento, a portabilidade, o custo e a adaptabilidade.

Capacidade de medição

Em relação à faixa de tensão, corrente ou potência da fonte FV a analisar, geralmente esta última grandeza é quem limita ou define o uso da carga variável mais conveniente. Para potências baixas, é possível usar qualquer um dos quatro tipos de cargas variáveis descritas, considerando que as medições são feitas rapidamente e os componentes usados, como a carga variável e as chaves, podem dissipar baixas potências sem danos. Entretanto, para o caso de potências superiores, as dimensões dos componentes devem ser maiores ou, alternativamente, considerar tempos de medição mais curtos. Para altas potências, é conveniente o uso da carga capacitiva, pois é um componente que armazena energia, podendo dissipá-la em uma resistência simples sem dificuldade. Caso esta topologia seja escolhida, o capacitor e a chave utilizada no processo de carregamento, devem ser dimensionadas de forma apropriada.

Na situação onde altas potências são envolvidas, também é possível utilizar uma carga eletrônica, pois o único componente a ser dimensionado seria a própria carga, porém, neste caso deve-se considerar o menor tempo de medição possível, para não exceder a potência máxima a qual o componente selecionado pode suportar. No caso da carga resistiva variável, o dimensionamento teria que ser feito com todas as resistências utilizadas, como as chaves que acompanham cada uma delas. Enquanto, através de um conversor CC-CC, a resistência de saída vai dissipar a maior parte da potência. Além disso, por mais eficiente que o conversor seja, seus componentes, como os indutores ou chaves, vão dissipar uma parte dessa potência. Em alguns casos, alguns desses componentes têm que suportar tensões ou correntes superiores aos valores máximos da fonte FV, devido ao fator de conversão que possa ter, dificultando o dimensionamento dos componentes.

Portabilidade e custo

Tanto a portabilidade como o custo são fatores coligados, pois é possível conseguir componentes de baixo custo, mas muito grandes e pouco eficientes, como conseguir componentes menores e ideais para aplicações portáteis, porém, a um custo elevado. Além disso, o custo e o tamanho dos componentes estão relacionados diretamente com a potência que eles podem suportar. Portanto, para uma apropriada seleção da carga variável, além de

considerar o indicado na capacidade de medição, a quantidade de componentes adicionais necessários para seu funcionamento também é um fator importante.

Adaptabilidade

Para um sistema de aquisição capaz de medir diferentes faixas de corrente ou tensão, em alguns casos a carga variável utilizada também pode trabalhar sem inconvenientes em uma ampla faixa, sendo limitada unicamente pela potência da fonte FV. Como é no caso da carga eletrônica e o conversor CC-CC com carga resistiva, cujo controle pode ser adaptado aos parâmetros elétricos máximos da fonte FV. No caso da carga resistiva variável, a boa dispersão dos pontos de medição vai depender da quantidade de resistências do arranjo e das combinações que pode-se obter com elas. Enquanto, com uma carga capacitativa, embora também seja possível, como o valor da capacitância é projetado em função dos parâmetros elétricos máximos da fonte FV, ela vai trabalhar melhor nessa faixa, pois não é possível controlar o tempo que dura a varredura da curva (carregamento do capacitor).

A Tabela 3.2 mostra um resumo do exposto anteriormente:

Tabela 3.2: Comparativa das cargas variáveis.

	Capacidade de Medição	Portabilidade	Custo	Adaptabilidade
Carga Resistiva	Baixa	Baixa	Baixo	Media
Conversor CC-CC com carga resistiva	Baixa	Media	Medio	Alta
Carga Eletrônica	Media	Alta	Medio	Alta
Carga Capacitiva	Alta	Media	Alto	Media

Capítulo 4

Projeto de um traçador de curva I-V

Considerando as características dos equipamentos traçadores de curva I-V, além da revisão e da análise dos principais métodos desenvolvidos, descritos no capítulo anterior, chegou-se à conclusão que a carga eletrônica é a mais viável para este projeto, devido a sua alta portabilidade e adaptabilidade, além de uma capacidade de medição e um custo de desenvolvimento aceitável para o escopo do projeto. Baseado nas pesquisas realizadas, foi proposto o uso de um dispositivo IGBT como carga variável, por suportar maiores níveis de tensão e potência que os dispositivos MOSFET [84]. Além disso, atualmente dispõem-se de dispositivos IGBT de alta velocidade e custo acessível, sendo um fator importante para este projeto.

4.1 Características do equipamento

4.1.1 Características gerais

Baseado no esquema geral de um traçador de curva I-V, mostrado na Fig. 3.1, o protótipo desenvolvido possui uma carga variável, seu circuito de controle, circuitos de aquisição, um módulo para o processamento dos dados e uma interface gráfica, através da qual é possível operar o equipamento e ingressar dados, como o valor de irradiância, a temperatura do módulo FV e o número de módulos conectados em série. Além disso, há uma memória SD removível, capaz de armazenar os dados obtidos, possui uma fonte de 5 V portátil e reguladores de tensão necessários para alimentar os diferentes circuitos do protótipo. A Fig. 4.1 mostra o esquema do traçador de curva I-V desenvolvido.

Para o escopo do projeto, optou-se por utilizar o módulo de desenvolvimento 32F746GDISCOVERY, principalmente pelo fato de possuir um microcontrolador de alto desempenho (STM32F746NG de 32 bits), baseado no núcleo ARM Cortex-M7, com FPU e controlador dedicado para o suporte gráfico. Também, o módulo conta com uma tela colorida LCD-TFT de 4,3" com interface tátil, uma memória Flash de 128 Mbits, entrada para memória microSD e pinos disponíveis para a conexão com outros circuitos, neste caso

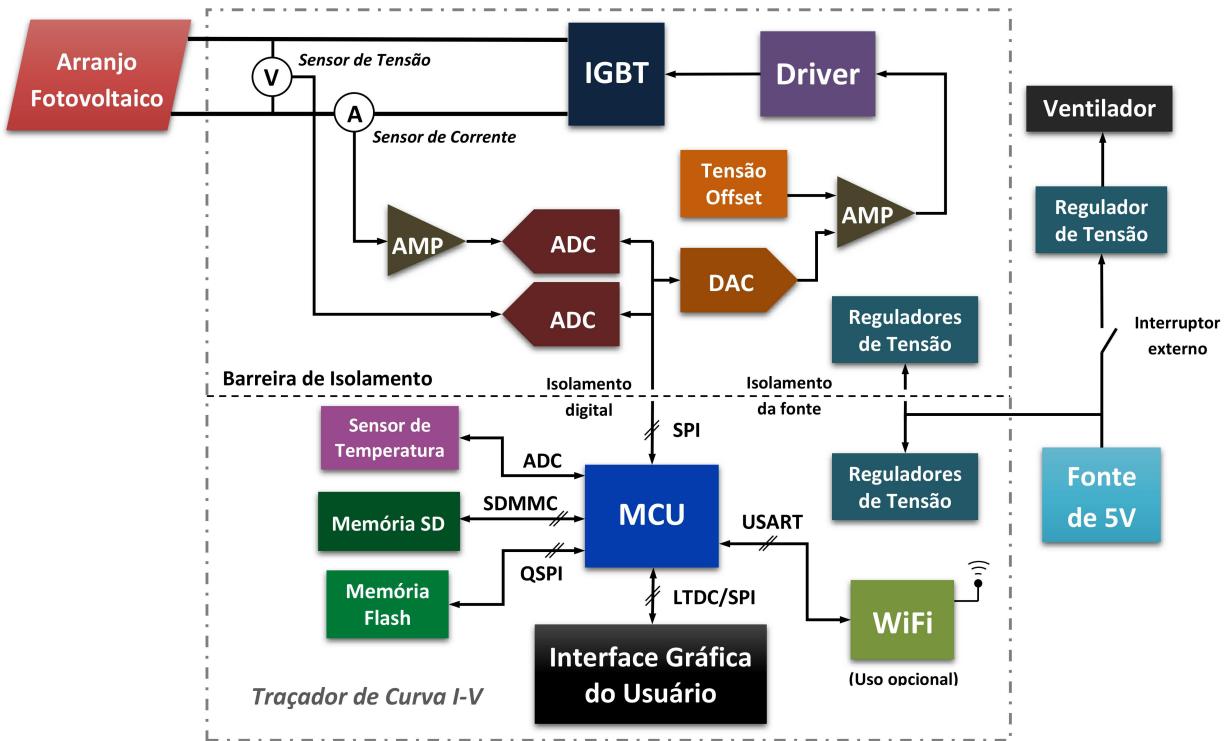


Figura 4.1: Esquema do traçador de curva I-V desenvolvido.

o circuito de aquisição e a carga variável. Utilizando-se como interface gráfica do usuário e para o processamento e armazenamento dos dados obtidos, facilitando a análise dos dados no mesmo local dos testes ou permitindo análises posteriores.

O circuito de aquisição possui um divisor resistivo para obter um sinal proporcional à tensão, uma resistência *shunt* com um amplificador para obter um sinal equivalente ao valor da corrente e conversores análogo-digital (ADC) de 16 bits de resolução para cada um desses parâmetros elétricos (tensão e corrente), transferindo os valores digitais de maneira serial (SPI) para o microcontrolador. O circuito para o controle da carga variável consiste em um circuito de condicionamento e um driver que varia a tensão da porta do IGBT segundo o sinal proveniente de um conversor digital-analogico (DAC), cuja magnitude depende do valor enviado digitalmente desde o microcontrolador. Adicionalmente, como uma medida de segurança para os usuários, devido que a carga será conectada a uma fonte FV capaz de fornecer tensões e correntes elevadas, estes circuitos estão isolados do microcontrolador e da interface gráfica utilizando um isolador digital e conversores CC-CC isolados.

Por fim, este protótipo também possui um módulo WiFi, possibilitando a comunicação sem fio com um outro equipamento capaz de realizar medidas de irradiância e temperatura além de realizar a comunicação com um computador, de forma que seja possível realizar a transferência de dados. A comunicação entre o módulo WiFi e o microcontrolador é feito serialmente (USART).

4.1.2 Características do IGBT

O IGBT selecionado para este desenvolvimento foi o IXH82N120C3, o qual possui um custo relativamente baixo (em torno de 14 dólares), sendo um dispositivo de alta velocidade, cujas características elétricas e físicas são demonstradas na Tabela 4.1, destacam-se principalmente os elevados valores de tensão, corrente e potência, os quais o dispositivo pode suportar.

Tabela 4.1: Características elétricas do IGBT IXH82N120C3 [15].

	Condições de teste ($T_J = 25^\circ\text{C}$, Salvo disposição em contrário)	Min.	Max.
BV_{CES}	$V_{GE} = 0\text{ V}$, $I_C = 250\text{ }\mu\text{A}$	1200 V	-
I_C	$T_C = 110^\circ\text{C}$	-	82 A
P_C	$T_C = 25^\circ\text{C}$	-	1250 W
I_{CES}	$V_{GE} = 0\text{ V}$	-	$25\text{ }\mu\text{A}$
$V_{CE(sat)}$	$I_C = 82\text{ A}$, $V_{GE} = 15\text{ V}$	-	3,2 V
$V_{GE(th)}$	$I_C = 250\text{ }\mu\text{A}$, $V_{CE} = V_{GE}$	3 V	5 V
T_J	-	- 55°C	175°C
R_{thJC}	-	-	$0,12\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$

É conveniente ressaltar que, o parâmetro mais importante deste projeto se trata da potência máxima a qual a carga é capaz de dissipar, limitando as características elétricas do equipamento. Portanto, a fim de obter uma operação confiável, considerando os valores mostrados na tabela 4.1, o circuito de aquisição não precisa cobrir toda a faixa de tensão e corrente que esse dispositivo pode suportar, em vez disso, cobrir a faixa suficiente para fazer as medições de corrente e tensão de uma string de cinco ou seis módulos fotovoltaicos (perto da potência máxima do dispositivo), com uma boa precisão. Além disso, considerando que a potência máxima, a qual o dispositivo suporta, depende em grande parte da temperatura da caixa do dispositivo (T_d) [85], é conveniente o uso de um dissipador dimensionado, fornecendo a devida ventilação para o equipamento depois de cada teste.

Em função das características elétricas do IGBT selecionado e das faixas de medição de tensão e de corrente do circuito de aquisição considerado para este desenvolvimento, foi proposto que o equipamento tenha as características elétricas mostradas na Tabela 4.2. Destacando que a tensão mínima e a potência máxima estão limitadas pelas características do IGBT, enquanto a corrente mínima bem como a tensão e corrente máxima foram definidas pelo circuito de aquisição.

Tabela 4.2: Características elétricas do equipamento proposto.

	Faixa	Resolução	Precisão
Tensão	2 - 600 V	0,1	1 %
Corrente	0,01 - 10 A	0,01	1 %
Potência	2 - 1000 W	1	1 %

4.2 Simulação do IGBT como carga variável

A Fig. 4.2 mostra uma fonte FV com as características do módulo CS6K-270P, conectada com um IGBT para quem um sinal de controle é aplicado. Esse circuito foi simulado considerando um sinal aplicado na porta do IGBT tipo rampa e utilizando o modelo PSpice do dispositivo selecionado (o IGBT IXN82N120C3). Neste caso foi considerado que a variação seja desde a tensão limiar do IGBT $V_{TH} = 3\text{ V}$ até a tensão $V_{GE} = 7\text{ V}$, pois para esse valor de tensão a resistência entre o emissor e o coletor do IGBT é suficientemente baixa, representando a condição de curto-círcuito [15]. A Fig. 4.3 mostra o sinal de controle descrito previamente, bem como os sinais de tensão e corrente do módulo FV em função do tempo.

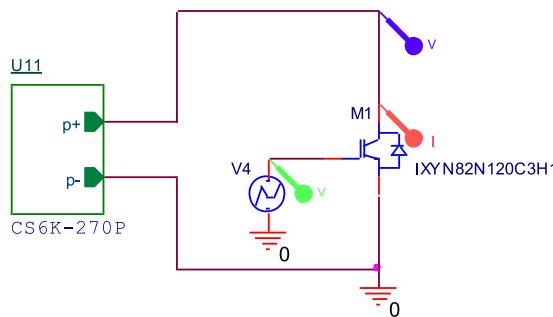


Figura 4.2: Esquema de um IGBT como carga eletrônica aplicando um sinal de controle.

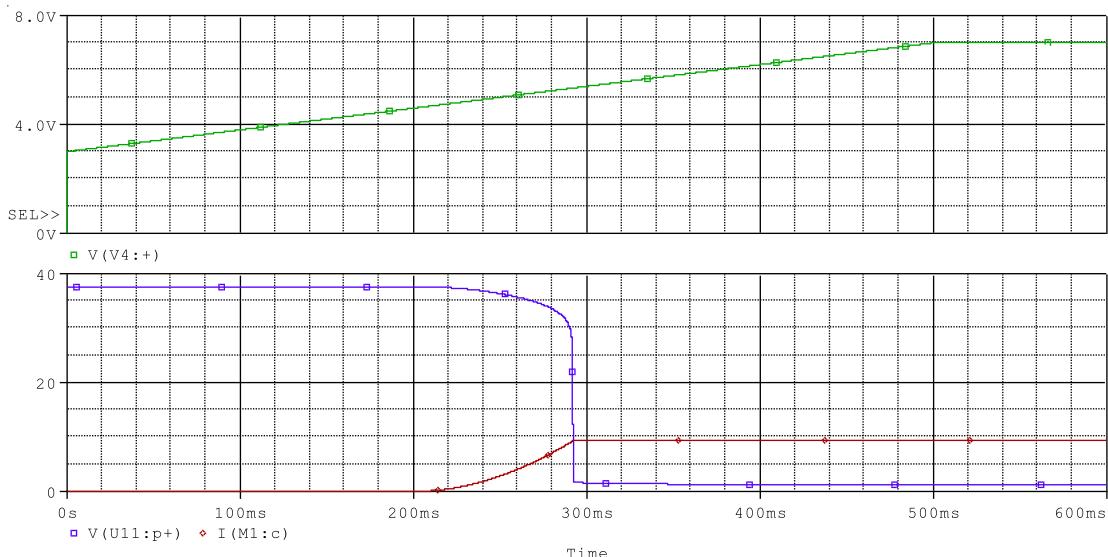


Figura 4.3: Sinal de controle do IGBT (em cima), formas de onda da tensão e da corrente do módulo FV (em baixo).

Na Fig. 4.3 pode-se observar que a maior variação da tensão do módulo FV ocorre para uma pequena faixa de tensão do sinal de controle, especialmente entre as

tensões $V_{GE} = 5\text{ V}$ e $V_{GE} = 5,4\text{ V}$. Portanto, foram obtidos alguns valores de corrente e tensão selecionando os valores de tensão de controle mostradas na tabela 4.3. A partir desse conjunto de pontos foram traçadas as curvas I-V e P-V do módulo FV, as quais são mostradas na Fig. 4.4.

Tabela 4.3: Tensões aplicadas na porta do IGBT.

V_{GE} (V)	Tensão (V)	Corrente (A)
3	37,64	0
4,9	36,92	1,62
5	36,33	2,86
5,1	35,49	4,41
5,2	34,24	6,28
5,25	33,28	7,34
5,3	31,61	8,46
5,33	27,88	9,17
5,333	25,13	9,25
5,334	20,25	9,27
5,335	9,9	9,29
5,34	1,75	9,31
7	1,22	9,31

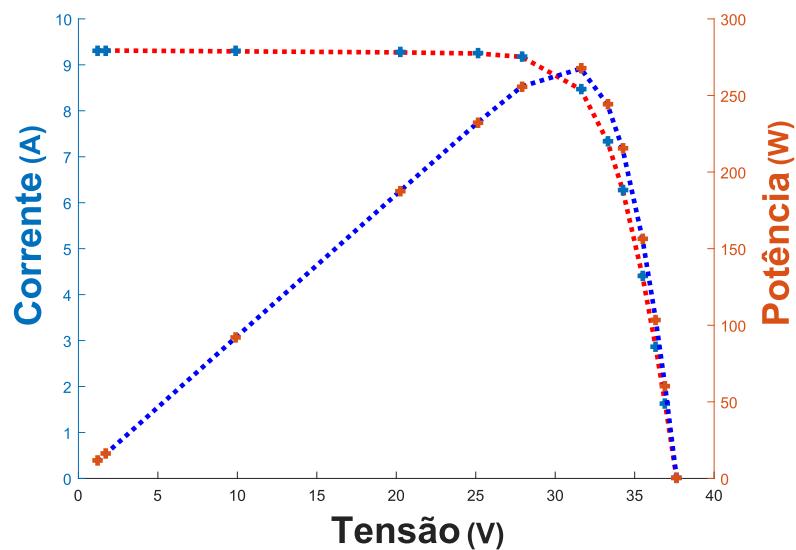


Figura 4.4: Curva I-V (vermelho) e curva P-V (azul) do módulo FV, a partir dos pontos da tabela 4.3.

De acordo com a Tabela 4.3, é possível inferir que, para uma maior distribuição de pontos ao longo da curva característica de um módulo ou de uma string FV, é necessário realizar passos na ordem de 1 mV na porta do IGBT. Portanto, considerando a equação 4.1, onde V_{DAC} é a tensão gerada pelo DAC, a qual varia entre 0 e 3,3 V, para obter um sinal amplificado entre 0 e 4 V na porta do IGBT unicamente dessa tensão (subtraindo

a tensão de offset (V_{offset})), resultando em um ganho do amplificador (G) em torno de 1,21 V/V e que cada variação do DAC tem que ser menor de 0,825 mV.

$$V_{GE} = (V_{DAG} + V_{offset}) \cdot G \quad (4.1)$$

Para satisfazer esses requerimentos, foi considerado o uso do DAC AD5621A, de 12 bits de resolução, e do amplificador operacional THS4031 na configuração de amplificador somador não-inversor, sendo esses dispositivos de alta velocidade, baixo ruído, além de operar nos níveis de tensão requeridos. Além disso, dado que o sinal de controle na porta do IGBT deve ser proporcional ao sinal tipo rampa do DAC, foi conveniente o uso do *driver* ZXTC2063E6, o qual consiste de uma combinação de transistores NPN e PNP.

A Fig. 4.5 mostra o circuito utilizado para o controle do IGBT, onde pode-se observar o circuito de condicionamento para o sinal do DAC, o driver com resistências de valores convenientes para ligar e desligar o IGBT apropriadamente, evitando picos de corrente na porta [86], um diodo zener entre a porta e o emissor do dispositivo, para proteção da porta em condições de sobretensão, além de uma resistência em paralelo para garantir o bloqueio do IGBT, mesmo quando a tensão de alimentação do acionador é desligada e a tensão está sendo aplicada ao circuito de potência [87].

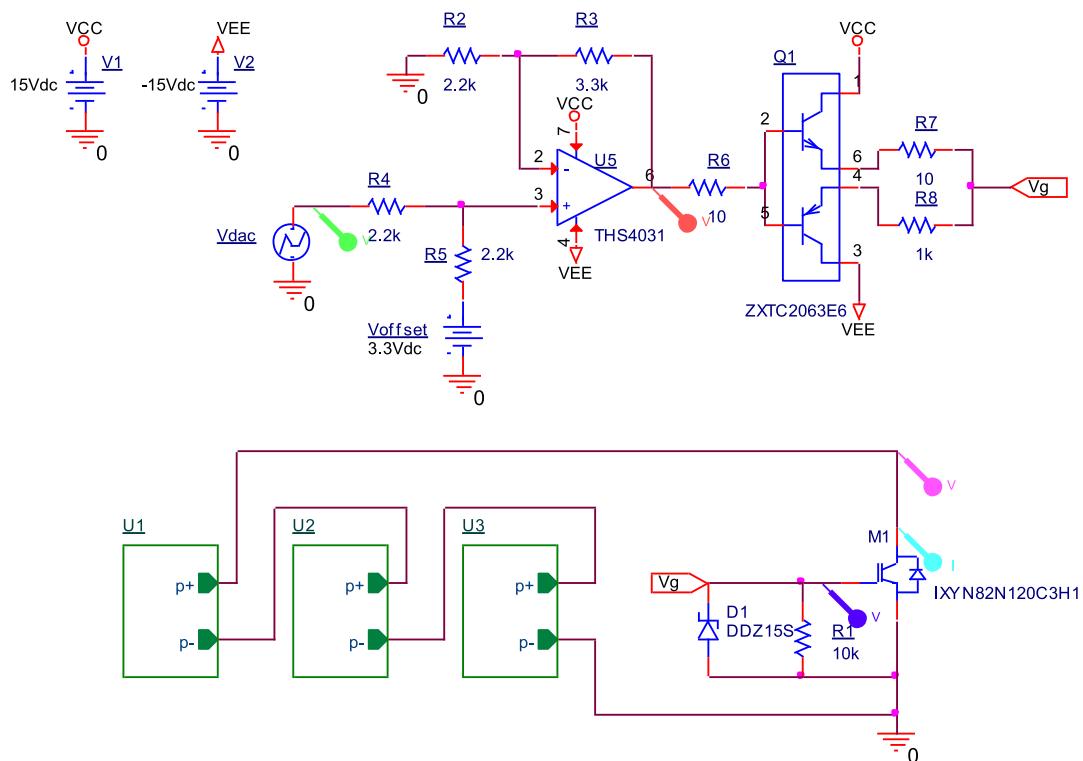


Figura 4.5: Circuito de condicionamento do sinal do DAC e driver para o controle do IGBT, conectado com uma string de 3 módulos fotovoltaicos.

Foi feita a simulação do circuito da Fig. 4.5, com ajuda de um *software* e fazendo uso dos modelos Pspice dos componentes selecionados, com a finalidade de obter resultados

mais próximos à realidade. A Fig. 4.6 mostra o sinal gerado pelo DAC, o sinal amplificado, o sinal na porta do IGBT, e os sinais de corrente e tensão da fonte FV, que neste caso, foi uma string composta por três módulos fotovoltaicos. Destaca-se a linearidade do sinal na porta do IGBT e a proporcionalidade com o sinal gerado pelo DAC. Também pode-se observar uma diferença quase constante entre o sinal na saída do amplificador e o sinal na porta do IGBT, de aproximadamente 0,54 V, o qual representa a queda de tensão no driver.

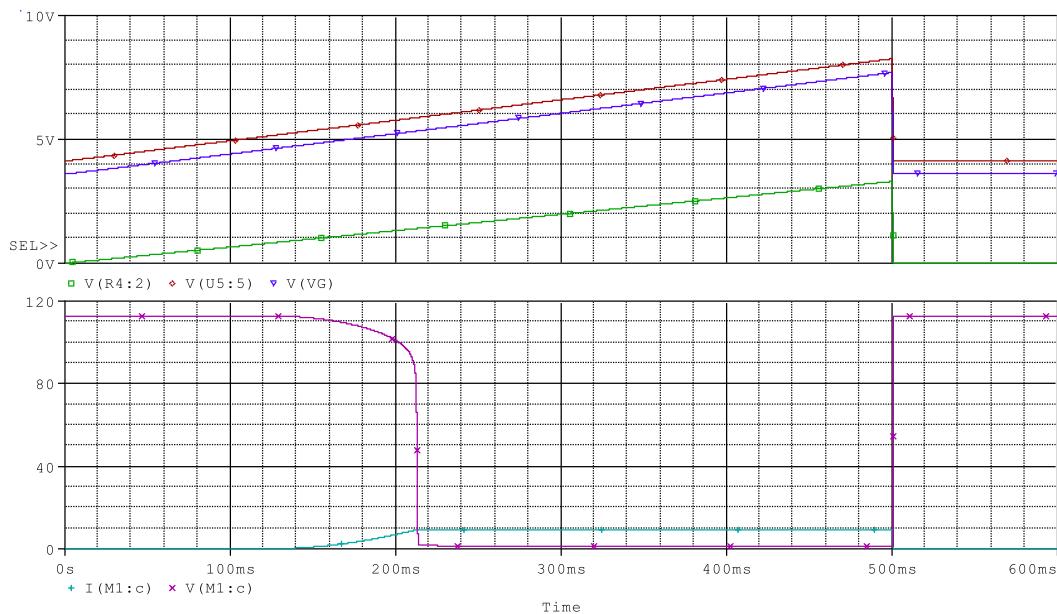


Figura 4.6: Sinal de controle e sinais condicionados (em cima). Formas de onda da corrente e tensão da string FV (em baixo).

4.3 Construção do *hardware* do equipamento

Com ajuda de um *software*, foram desenhados os diagramas esquemáticos e as placas impressas dos circuitos elétricos envolvidos no protótipo. O diagrama esquemático da Fig. 4.7, mostra o DAC, o circuito da tensão de *offset*, cuja saída é fixada em 3,3 V, o circuito de condicionamento para o sinal de controle, bem como o driver e o IGBT, sendo os componentes e valores definidos previamente no circuito da Fig. 4.5, o qual apresentou bons resultados de simulação, pois consegue fazer uma varredura de todos os pontos de operação da string FV.

A Fig. 4.8 mostra o circuito de aquisição dos sinais de corrente e tensão, onde destaca-se o uso do ADC MAX11100. Este conversor tem uma escala total de tensão de entrada analógica definida por $AVDD = 5\text{ V}$, uma frequência de amostragem máxima que depende da frequência de relógio do SPI $f_{S_{max}} = f_{SCLK}/24$, definida por *software*, neste caso $f_{SCLK} = 421,875\text{ kHz}$. Além disso, tem uma largura de banda de entrada de 4 MHz e

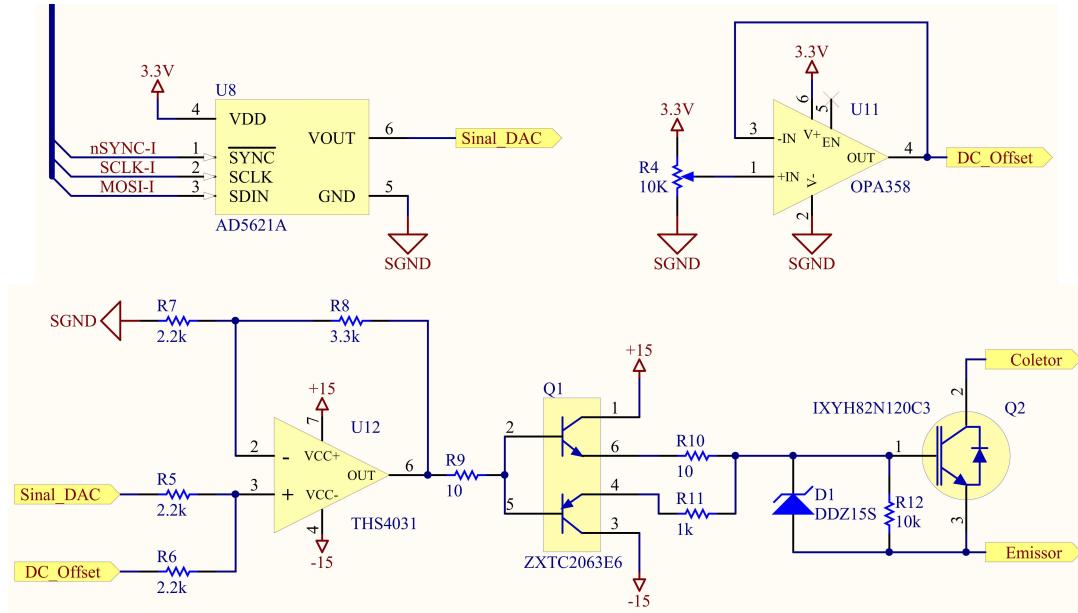


Figura 4.7: Diagrama esquemático do circuito para o controle do IGBT.

internamente conta com diodos de proteção, que evitam que o dispositivo seja danificado por sobretensões na entrada analógica. Considerando que as medições serão feitas em uma fonte FV, que será isolada, e os dados obtidos serão processados subsequentemente, neste protótipo não foram considerados filtros passa-baixas na entrada dos conversores, com a finalidade de simplificar o circuito. No entanto, sempre é recomendável o uso de um filtro antialiasing, pelo que para outras versões será considerado.

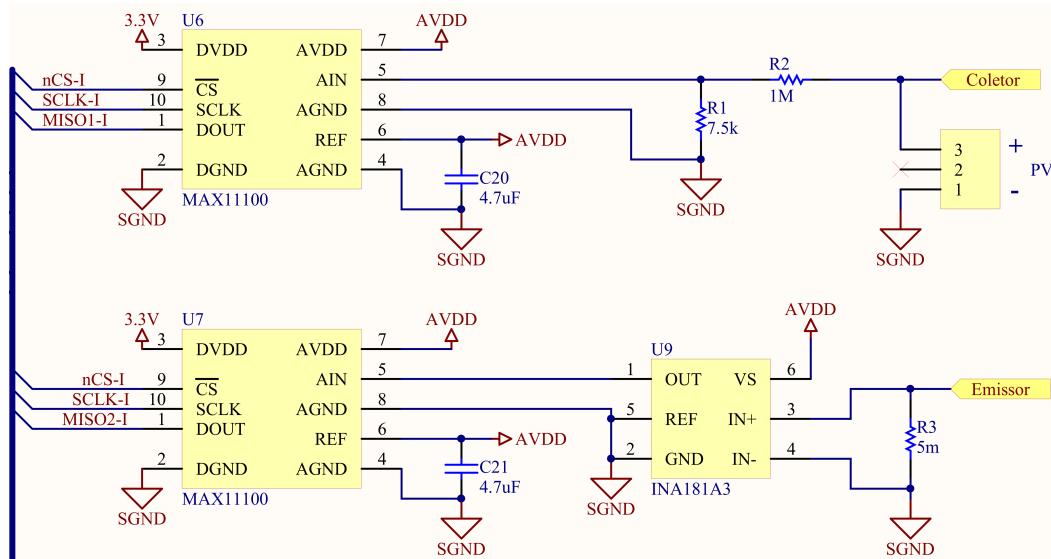


Figura 4.8: Circuito de aquisição para os sinais de tensão e corrente.

Para que a queda de tensão na resistência *shunt* seja desprezível, o valor projetado foi de ($5\text{ m}\Omega$), sendo necessário também o uso de um amplificador especial para sensores

de corrente INA181A3, o qual tem um ganho de 100 V/V. Os valores das resistências do divisor resistivo e da resistência *shunt* foram selecionados com a finalidade de que o protótipo atenda as faixas de medição propostas.

O protótipo conta com um conector Micro USB como entrada de alimentação, podendo utilizar um carregador portátil de baterias para celular ou o próprio carregador de celular como fonte de energia, considerando sempre que a tensão da fonte seja de 5 V, proporcionando uma corrente de ao menos 1 A. A partir dessa fonte, foram utilizados reguladores de tensão de 3,3 V, principalmente para alimentar os componentes digitais, e conversores DC-DC para obter tensões isoladas de 5 V, 15 V e -15 V no circuito de potência.

Tanto os reguladores quanto os conversores possuem capacitores recomendados pelos fabricantes, seja para estabilidade do circuito no caso dos reguladores lineares, ou para filtragem do EMC, no caso dos conversores CC-CC. Além disso, foi considerado um filtro adicional para a tensão de alimentação analógica (AVDD) dos ADCs, para que ela tenha o menor ruído possível. Vale ressaltar que, para cada componente digital ou analógico, também foram considerados capacitores de desacoplamento recomendados pelos fabricantes. A Fig. 4.9 mostra os reguladores e conversores descritos.

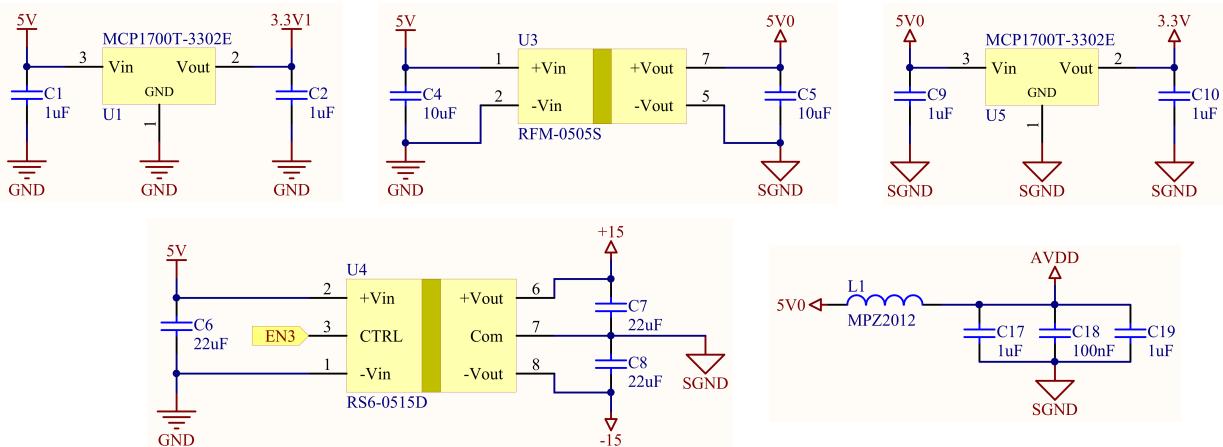


Figura 4.9: Reguladores de tensão e conversores CC-CC utilizadas no protótipo.

Com a finalidade de isolar completamente a interface de usuário do circuito da carga variável, principalmente porque em alguns pontos desse circuito vai ter tensões elevadas, foi utilizado o isolador digital SI8662AB mostrado na Fig. 4.10, o qual dispõe de 6 canais digitais isolados (quatro de entrada e dois de saída), sendo o adequado para este desenvolvimento.

Todos os circuitos mostrados correspondem à parte do circuito de potência (círculo de aquisição e do controle da carga variável) e foram implementados em uma placa impressa. Para facilitar as conexões entre estes circuitos e o módulo de desenvolvimento 32F746GDISCOVERY, foi feito um circuito que, além dos conectores necessários, também

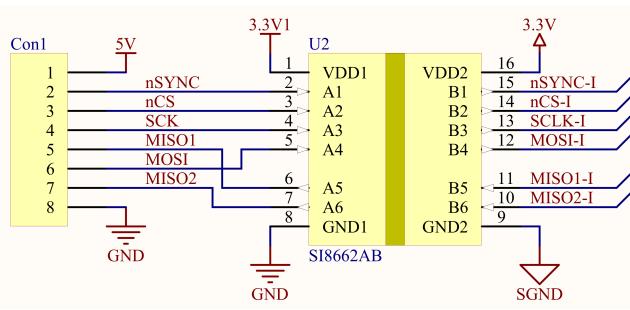


Figura 4.10: Isolador digital indicando os pinos utilizados para a comunicação SPI.

tem um interruptor MOSFET para habilitar ou desabilitar o circuito de potência, e um conector Micro USB para conectar a fonte de alimentação. Finalmente, foi feito um circuito para elevar a tensão da fonte externa e ligar apropriadamente o ventilador utilizado para reduzir a temperatura da caixa do IGBT. O acionamento e o desligamento deste ventilador são feitos manualmente através de um interruptor, considerando como referência o valor obtido por um sensor de temperatura (LMT87) próximo ao dispositivo.

A Fig. 4.11 mostra o protótipo desenvolvido aberto, onde pode-se observar o módulo de desenvolvimento 32F746GDISCOVERY, as placas implementadas a partir dos circuitos projetados, as quais são fixadas em uma caixa para disjuntor de PVC, permitindo que o equipamento seja portátil e que o circuito de potência esteja eletricamente isolado do usuário. Também pode-se observar o IGBT com seu dissipador, o ventilador, o circuito de alimentação dele e o sensor de temperatura. O apêndice B mostra o *layout* do circuito impresso do circuito de potência.

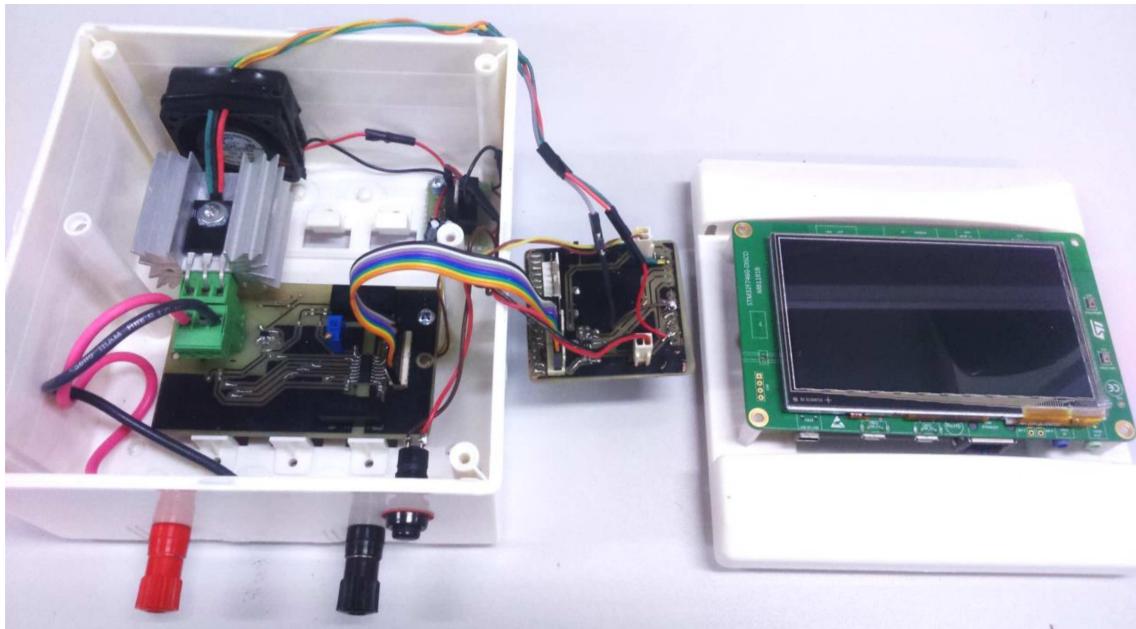


Figura 4.11: Parte interna do protótipo desenvolvido, mostrando os componentes e os circuitos impressos projetados.

4.4 Implementação do *software* do equipamento

4.4.1 Estados de funcionamento

Neste desenvolvimento foram feitos os algoritmos necessários para que o sistema embarcado cumpra as funções desejadas, principalmente as medições de corrente e tensão, a leitura do valor de irradiância, o número de módulos do sistema FV testado, e a temperatura do módulo FV. Também, o processamento destes dados, o armazenamento dos dados processados e a apresentação da informação (tabela de dados ou curvas características). O funcionamento deste sistema é baseado em uma máquina de estados, a qual parte de um estado inicial e muda ao cumprir determinadas condições, como por exemplo, terminar a execução de uma função ou selecionar uma opção. Cada um destes estados é definido como funções, demonstrado no fluxograma da Fig. 4.12, onde também pode-se observar as condições necessárias para alterar o estado atual. A função principal como os algoritmos mais importantes é apresentada no apêndice C.

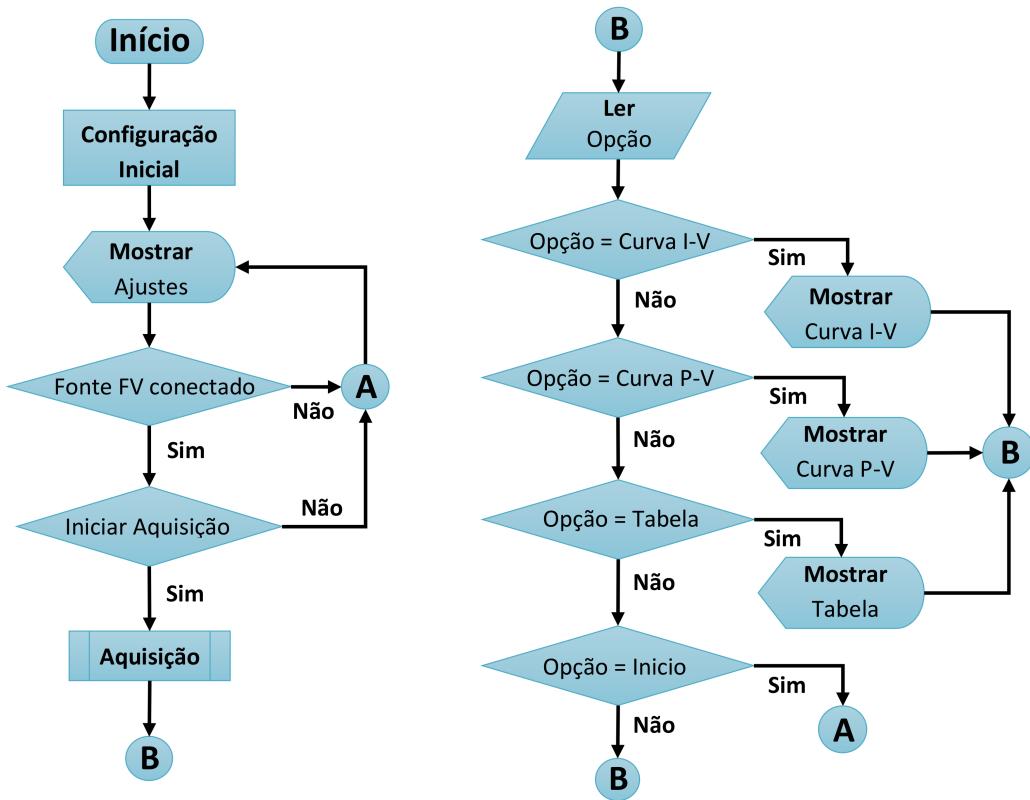


Figura 4.12: Fluxograma do equipamento.

A função “Configuração Inicial” envolve as configurações do relógio do sistema, do temporizador, a configuração dos módulos internos do MCU, como os pinos I/O, o ADC e o SPI, além das configurações para a comunicação com a memória SD, a memória Flash, a tela LCD e a interface tátil. Também, são configurados aqueles módulos para que operem

na condição inicial de funcionamento, mantendo os circuitos de aquisição e de potência desligados. A tela inicial é dividida em três partes: na região superior da interface há uma barra de notificações, na direita, as opções de visualização de dados, e no centro, os dados operacionais do sistema a ser a medido.

A função “*Mostrar Ajustes*” é o estado inicial que apresenta na tela, o modelo do módulo FV que será testado, o número de módulos da string, o valor de irradiação (Irr) e da temperatura do módulo FV (T_C). Estes parâmetros, exceto o modelo do módulo, devem ser alterados de acordo com as condições do teste, considerando a quantidade de módulos e os valores obtidos a partir de sensores externos de irradiação e temperatura. Na barra de notificações, encontram-se indicadores operacionais do equipamento. Nela, é possível averiguar a temperatura aproximada na qual o IGBT está operando (T_d), sendo a condição necessária para o acionamento do *cooler* interno. A tensão medida nos terminais do equipamento também é demonstrada, com o intuito de verificar a conexão ou não com alguma fonte FV. Por fim, há também a checagem da presença de uma memória SD, sendo necessária para habilitar a função para salvar os dados coletados. Estas funções são atualizadas periodicamente a cada 1 s.

Para que o equipamento seja habilitado para realizar o teste, é necessário que seja detectado a presença de uma fonte FV em seus terminais, de forma que a tensão medida esteja na faixa de 3 V e 600 V e fornecendo uma corrente inferior a 100 mA, viabilizando a medição da operação da fonte FV como circuito aberto. A Fig. 4.13 apresenta o equipamento com a tela de ajustes.



Figura 4.13: Apresentação da tela de ajustes.

O seguinte estado é a função “*Aquisição*”. Ela integra as funções de medição, variação da carga variável, processamento e armazenamento dos dados. Inicialmente são apresentados os últimos valores ingressados de irradiação e temperatura na barra de notificações para ter como referência nas informações seguintes. O MCU liga o circuito de potência e espera 500 ms para que o regulador se estabilize na tensãopropriada. Em

seguida, é realizada uma varredura dos pontos de operação da fonte FV, alterando o valor do registrador transmitido para o DAC a partir do valor inicial $R_{DAC} = 0$ até o valor máximo $R_{DAC} = 4095$, medindo os valores de tensão e corrente em cada variação.

O equipamento é capaz verificar ponto a ponto que os valores de corrente, tensão e potência não sejam superiores a 10,1 A, 680,4 V e 1 kW respectivamente. Caso um desses parâmetros seja ultrapassado, a tensão na porta do IGBT é fixada no valor mínimo e uma mensagem de aviso é mostrada na tela. Desta forma, é possível proteger os sensores de corrente e tensão, e o IGBT.

Uma vez que o registrador atinge o valor máximo, ele volta ao valor mínimo, e espera 200 ms antes de desligar o circuito de potência, para deixar que o IGBT esteja aberto, e não tenha fluxo de corrente pelo driver. Finalizado este processo de varredura, os dados obtidos são processados e armazenados na memória SD, desde que o equipamento reconheça a conexão desta. Finalizados esses procedimentos, são habilitados as opções para selecionar os outros estados. A Fig. 4.14 mostra o fluxograma desta função. Já, a Fig. 4.15 apresenta o equipamento depois de realizar a aquisição (foram utilizados dados salvados de teste).

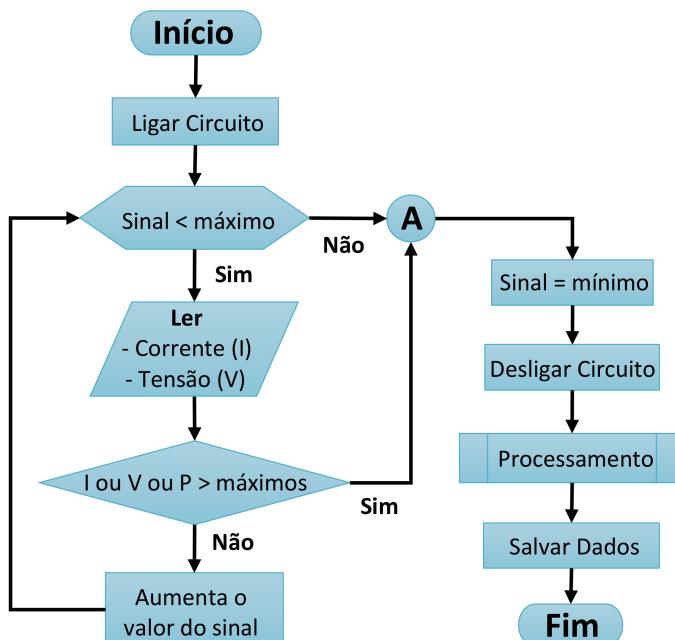


Figura 4.14: Fluxograma da função de Aquisição.

Feita a aquisição, é possível acessar outras funções, como “Mostrar Curva I-V”, “Mostrar Curva P-V” e “Mostrar Tabela”, independentemente da ordem. Sendo possível voltar ao estado inicial mediante uma ação de adicional de confirmação, pois não é possível voltar aos outros estados sem fazer outro teste.

A função “Mostrar Curva I-V” apresenta uma curva I-V utilizando os dados medidas nas condições de operação (OPC), ou seja considerando os valores de irradiação e



Figura 4.15: Protótipo depois de fazer a aquisição.

temperatura do módulo FV no momento do teste. Também mostra uma curva I-V utilizando os dados corrigidos da OPC à STC e três pontos principais, V_{OC} , I_{SC} e PPM (ponto da potência máxima), correspondentes aos valores na STC obtidos da folha de dados do módulo testado. De maneira similar, a função “Mostrar Curva P-V” apresenta as curvas P-V na OPC, na STC corrigidos a partir da OPC e neste caso 2 pontos principais, P_{max} e V_{OC} . A Fig. 4.16 e a Fig. 4.17 mostram o equipamento apresentando as curvas I-V e P-V respectivamente. Onde as curvas na OPC encontram-se na cor amarela, as curvas em STC em roxo e os pontos principais (representados na figura como x) em verde.



Figura 4.16: Apresentação das curvas I-V nas condições descritas.

Finalmente, a função “Mostrar Tabela” apresenta três colunas, onde são mostrados os principais pontos de operação (V_{OC} , I_{SC} , P_{max} , V_{mp} , I_{mp}), obtidos na OPC, corrigidas para STC e os parâmetros retirados da folha de dados na STC. Além disso, apresenta-se também o FF nas três condições e a diferença de potência (DF) entre a potência máxima

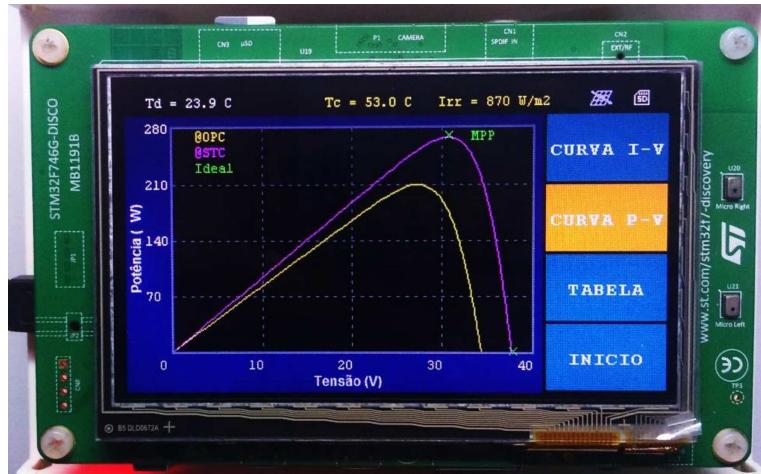


Figura 4.17: Apresentação das curvas P-V nas condições descritas.

calculada (P_{max_2}) e a potência máxima indicada na folha de dados (P_{max}), ambos na STC, cujo cálculo é feito segundo a equação 4.2. A Fig. 4.18 mostra o protótipo apresentando a tabela de dados.

$$DP = \frac{|P_{max} - P_{max_2}|}{P_{max}} \quad (4.2)$$

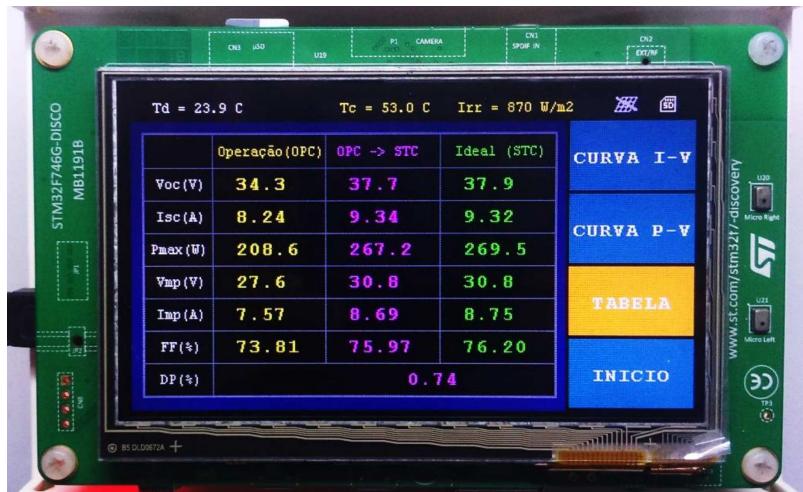


Figura 4.18: Apresentação da tabela com os parâmetros principais nas condições descritas.

4.4.2 Tratamento dos dados medidos na OPC

Os dados foram tratados considerando as principais características da curva I-V de um módulo FV, descritos na subseção 2.1.2 (a curva I-V tem trajetória suave e a tensão vai decrescendo conforme a corrente aumenta), descartando os pontos considerados irregulares. Também, quando a tensão no gate do IGBT é menor que a tensão limiar

V_{TH} , no início da varredura, a corrente medida da fonte FV é zero ou desprezível (inferior a 1 mA), sendo irrelevantes para o processo de caracterização. Para a representação da operação nesta região, foi tomada a média aritmética das tensões, representando em apenas um ponto.

Considerando os dados obtidos pelo equipamento desenvolvido (4095 pares de pontos corrente-tensão) em um teste feito com o módulo FV STP190S-24/Ad+, a Fig. 4.19 mostra a curva I-V formada pelos dados medidos (dados originais) e a curva I-V depois de fazer este procedimento inicial. Pode-se observar a diferença entre os dados originais e os tratados, principalmente nos extremos das curvas, onde a curva original apresenta um maior volume de pontos.

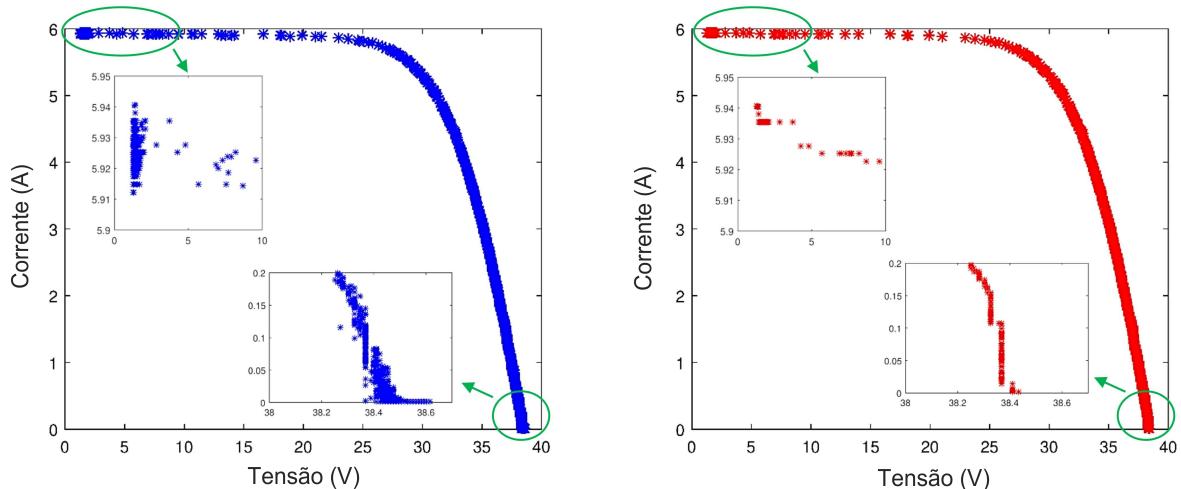


Figura 4.19: Curva I-V a partir das medições (curva azul na esquerda) e curva I-V depois do primeiro procedimento (curva vermelha na direita).

Depois do procedimento anterior, os dados resultantes (3470 pares de pontos) são tratados por grupos, considerando uma diferença máxima entre valores consecutivos de tensão e corrente de 0,5 V ou 100 mA, respectivamente. Caso a diferença entre dois pontos consecutivos seja inferior ao estipulado, é tomado o valor médio de todos os pontos contidos neste intervalo, ressaltando que, cada grupo contém no máximo 300 pares de corrente e tensão. Este procedimento foi realizado com o intuito de suavizar a curva e, a partir de uma quantidade menor de dados, obter uma boa distribuição de pontos ao longo da curva. A Fig. 4.20 mostra a curva resultante do primeiro procedimento (a esquerda) e a curva obtida utilizando o procedimento de suavização da curva, sendo possível observar que no resultado final a curva é mais suave e tem os pontos suficientes para representar a curva característica, contendo 107 pares de pontos.

Seguidamente, são descartados os pares de pontos extremos, com tensões e correntes menores a 1,9 V e 10 mA, respectivamente, a fim de evitar erros de precisão segundo os testes feitos na secção 4.5.1. Neste caso, o ponto anterior à corrente mínima é considerada zero e a tensão correspondente é considerada a tensão de circuito aberto. Enquanto, como

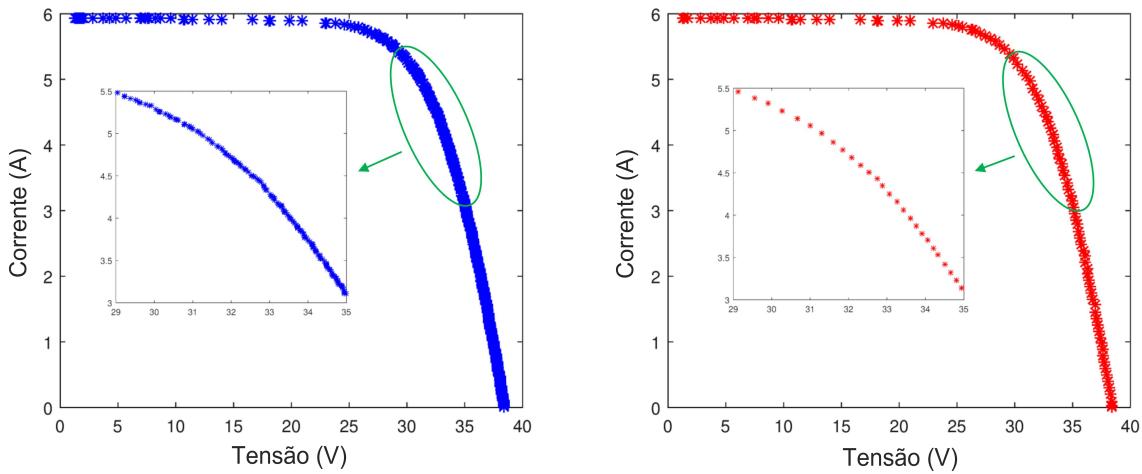


Figura 4.20: Curva I-V do primeiro procedimento (curva azul na esquerda) e curva I-V depois do último procedimento (curva vermelha na direita).

a tensão não é muito próximo ao ponto de curto-circuito, os dados mais próximos foram tratados e, a partir de uma extração linear, foi possível prever o valor da corrente quando a tensão é zero. Como resultado destes procedimentos foram obtidos os dados na OPC (dados filtrados), os quais contam com 103 pares de pontos. A Fig. 4.21 mostra a curva I-V após a primeira parte deste procedimento e a curva I-V na OPC.

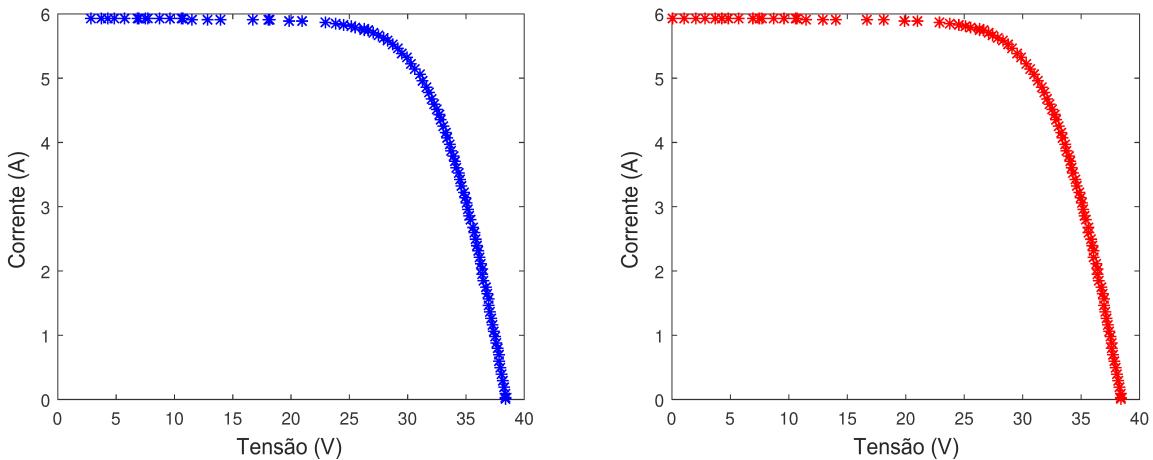


Figura 4.21: Curva I-V depois de descartar os pontos medidos com pouca precisão (curva azul na esquerda) e curva I-V obtida para a OPC (curva vermelha na direita).

Deve-se notar que a quantidade de pontos dos dados tratados é variável, dependendo das características da curva I-V do módulo FV, dado que o algoritmo sempre vai tentar obter os dados necessários para conseguir uma boa distribuição de pontos ao longo da curva. A Fig. 4.22 mostra um resumo dos procedimentos feitos para tratar os dados na OPC, enquanto que, o algoritmo (feito no MATLAB) é apresentado no apêndice C.

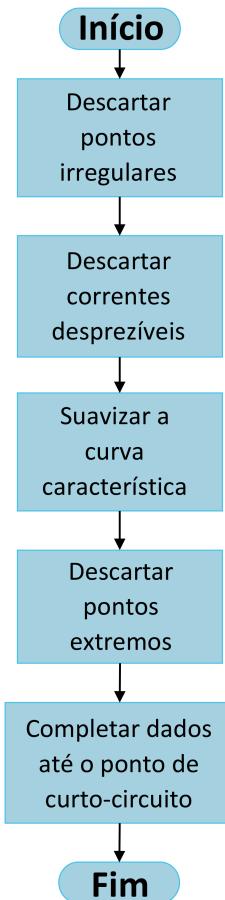


Figura 4.22: Resumo dos procedimentos para tratar os dados na OPC.

4.4.3 Translado dos dados medidos na OPC para a STC

A partir dos dados adquiridos na OPC (previamente tratados), também foram feitos os algoritmos para transladar os pontos à STC, conseguindo assim, que o equipamento apresente dados que possam ser analisados e comparados. Para isso, foi considerado o procedimento indicado pela norma IEC 60891, descrita brevemente na subseção 2.2.2, onde também foram mostradas as equações a utilizar (equação 2.8 e 2.9). Nessas equações, a maioria das variáveis são conhecidas, sendo obtidas nas medições ou proporcionadas pela folha de dados do módulo FV. No entanto, três fatores devem ser calculados, o fator de correção da irradiância para a tensão de circuito aberto (a), a resistência interna em série (R_s) e o coeficiente de temperatura da resistência interna em série (κ).

A norma IEC 60891 também define os procedimentos para determinar esses fatores de maneira experimental. De acordo com esta, para encontrar os fatores a e R_s , são necessários três ou mais medições em diferentes valores de irradiância, que cobrem a faixa de interesse dentro da qual as medições serão corrigidas, medidos em temperatura constante. Enquanto, para achar o fator κ , também é necessário medições adicionais, neste caso, em diferentes valores de temperatura e irradiância constante. Considerando estes

procedimentos, com auxílio do *software* PSIM e usando as características do módulo FV CS6K-270P, foram obtidos por simulação as curvas I-V em diferentes condições de temperatura e irradiação, necessárias para os cálculos. As condições consideradas são mostradas na tabela 4.4 e as curvas geradas nessas condições são mostradas na Fig. 4.23

Tabela 4.4: Valores de temperatura e irradiação consideradas na simulação.

	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Irradiância (W/m^2)	
Condição	25	800	
	25	900	
	25	1000	(STC)
	40	1000	
	55	1000	
	53	870	(OPC)

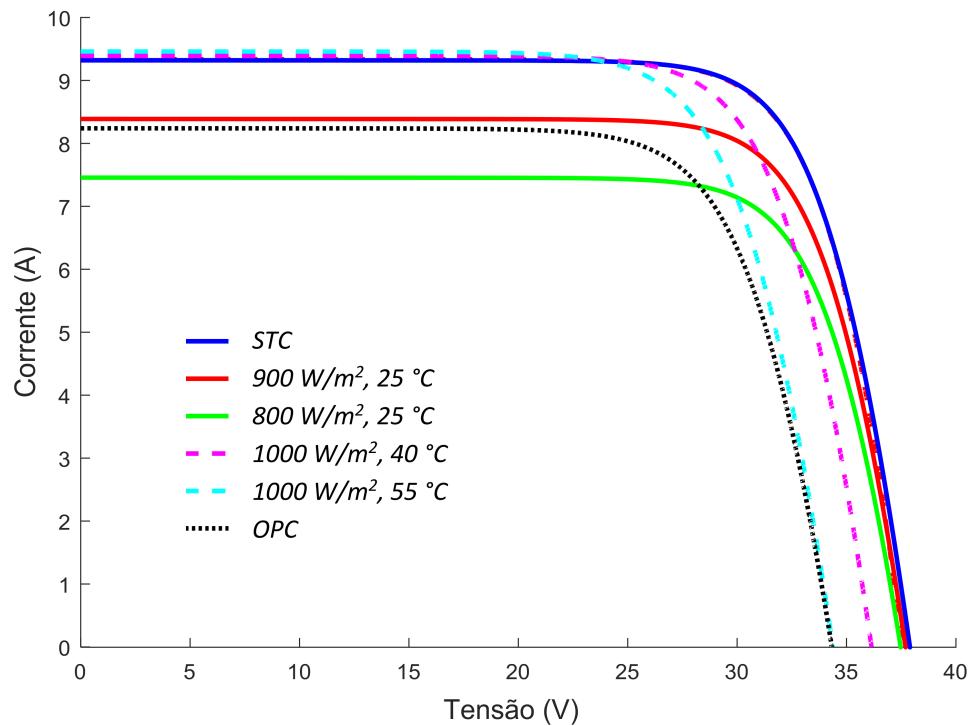


Figura 4.23: Curvas I-V em diferentes condições de operação.

Utilizando as três condições da tabela 4.4 com temperatura constante de 25°C e usando o *software* MATLAB, foram feitos os procedimentos iterativas propostos, achando os fatores $a = 0,047$ e $R_s = 0,2 \Omega$. Seguidamente, utilizando três condições da tabela 4.4 com irradiação constante de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, foi achado o fator $\kappa = 0,003 \Omega/\text{ }^{\circ}\text{C}$. De acordo com a norma, os processos iterativos terminam quando a potência máxima das curvas, ao serem normalizadas com os fatores ótimos, divergirem na faixa de $\pm 0,5\%$. Embora a norma mencione uma precisão de $0,5\%$, em relação à máxima potência, os parâmetros obtidos apresentaram uma precisão superior, sendo: $\pm 0,1\%$ para a e R_s , e $\pm 0,3\%$ para

κ . Para validar os fatores encontrados, foi considerado a última condição da tabela 4.4, que representa uma OPC usual, e foram corrigidos os valores de corrente e tensão à STC. A Fig. 4.24 mostra as curvas I-V na condição OPC, na condição STC e a curva corrigida da OPC à STC, sendo as curvas características das duas últimas muito similares, onde a divergência no ponto de potência máxima foi de aproximadamente 0,2 % (0,56 W de diferença).

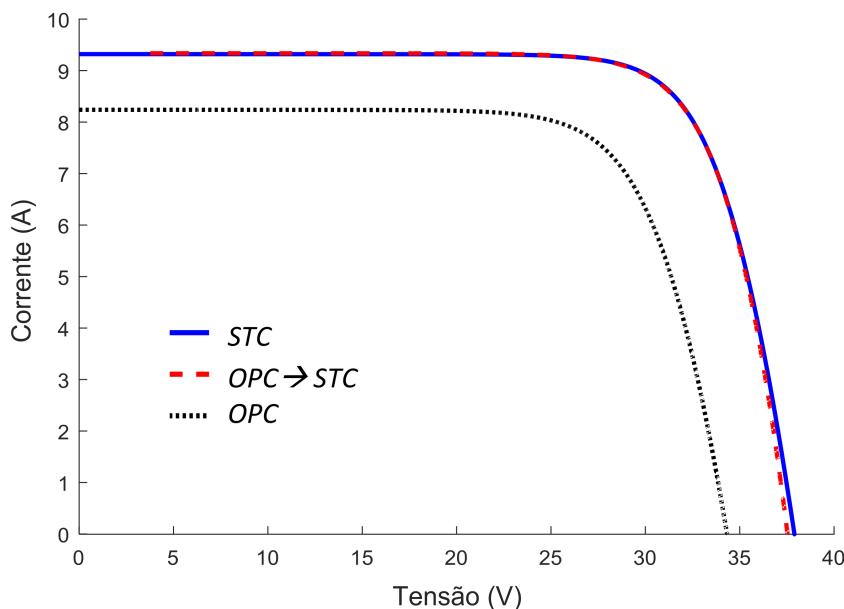


Figura 4.24: Curvas I-V na OPC, na STC e a curva corrigida da OPC para a STC.

Apesar de ser factível utilizar os procedimentos descritos pela norma para achar os fatores a , R_s , e κ , utilizando as curvas características em diferentes condições de irradiância e temperatura obtidos por simulação, é pouco apropriado usar estes recursos para cada tipo de módulo FV, sendo desejável que os únicos dados a serem considerados, sejam os proporcionados pela folha de dados de cada módulo. Neste desenvolvimento foi feito um algoritmo iterativo que considera os principais parâmetros elétricos em duas condições diferentes, na STC e em NMOT, sendo estes, os dados mais frequentemente encontrados nas folhas de dados fornecidas pelos fabricantes. Não obstante, este algoritmo também toma em consideração alguns procedimentos ou condições descritos na norma.

Para implementar e testar o algoritmo proposto foi utilizado o mesmo módulo FV (CS6K-270P), cujos principais parâmetros elétricos na STC e em NOCT foram mostradas nas tabelas 2.1 e 2.2 respectivamente. Enquanto as características térmicas, foram mostradas na tabela 2.3 (localizadas na subseção 2.2.1). O primeiro passo deste procedimento proposto foi considerar o valor típico para o fator de correção de irradiância $a = 0,06$, cujo valor está indicado na norma. Como a folha de dados do módulo FV utilizado indica que a temperatura da célula em NOCT é de $43 \pm 3^\circ\text{C}$, o segundo passo é achar a

temperatura, dentro dessa faixa, que apresenta o melhor resultado. Como a temperatura tem maior influência no valor da tensão, este cálculo foi feito utilizando a equação 2.9 no ponto da tensão de circuito aberto V_{OC} , onde a corrente é zero. A função responsável por encontrar a temperatura ótima para este método é mostrada na equação 4.3. Onde 1 está em NOCT, 2 na STC, e V_{OC2} não é um valor encontrado a partir da equação 2.9, neste caso foi utilizado o valor de V_{OC} na STC da folha de dados.

$$T_1 = T_2 + \frac{\left(a \cdot \ln \left(\frac{G_2}{G_1} \right) - \frac{V_{OC2}}{V_{OC1}} + 1 \right)}{\beta} \quad (4.3)$$

Substituindo os valores correspondentes, tem-se que $T_1 = T_{NOCT} = 44,44^{\circ}\text{C}$. Considerando esta temperatura, a partir da equação 2.8 foi obtido o valor corrigido da corrente de potência máxima I_{mp2} , e utilizando iterações, a partir da equação 2.9 foi obtido o valor corrigido da tensão de potência máxima V_{mp2} . Foram feitas duas iterações, uma externa onde o valor de R_s foi diminuindo desde o valor máximo $R_{s_{max}} = ns \cdot 10 \text{ m}\Omega$, onde ns é a quantidade de células em série do módulo FV (neste caso $ns = 60$), até chegar a zero. E uma interna onde o valor de κ foi incrementando desde zero até que a potência máxima calculada esteja dentro de $\pm 0,2\%$ em relação à potência máxima na STC. Para cada iteração externa, o melhor valor de κ foi tomado para achar o R_s correspondente onde a diferença entre a potência máxima calculada e na STC seja mínima.

Finalizadas as iterações, foram obtidos os fatores $R_s = 0,31 \Omega$ e $\kappa = 0,004 \Omega/{^{\circ}\text{C}}$, os quais são próximos aos valores achados usando os procedimentos definidos pela norma ($R_s = 0,2 \Omega$ e $\kappa = 0,003 \Omega/{^{\circ}\text{C}}$). Os fatores achados pelo método proposto também foram validados corrigindo os valores da condição OPC (da tabela 4.4) à STC. A Fig. 4.25 mostra as curvas I-V na condição OPC, na condição STC e a curva corrigida da OPC à STC, onde as duas últimas curvas também são muito similares. Neste caso, o erro no ponto de potência máxima foi de aproximadamente 0,42% (1,13 W de diferença).

Finalmente, a curva corrigida é completada até o ponto da corrente de curto-circuito (tensão zero) a partir de uma extrapolação linear, pois como pode observar-se na Fig. 4.24 e na Fig. 4.25, as curvas corrigidas finalizam em uma tensão diferente de zero (próximo de 4 V no último caso), principalmente pelo segundo termo da equação 2.9, o qual é constante para um conjunto de dados a serem transladados. A Fig. 4.26 mostra um resumo dos procedimentos feitos para o translado dos dados da OPC para a STC, enquanto que, o algoritmo (feito no MATLAB) é apresentado no apêndice C.

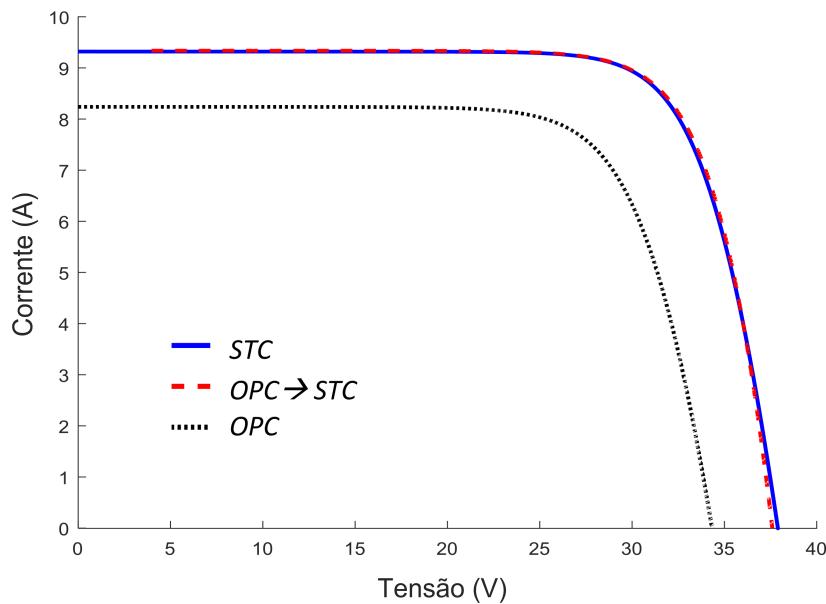


Figura 4.25: Curvas I-V na OPC, na STC e a curva corrigida da OPC para a STC aplicando o algoritmo proposto.

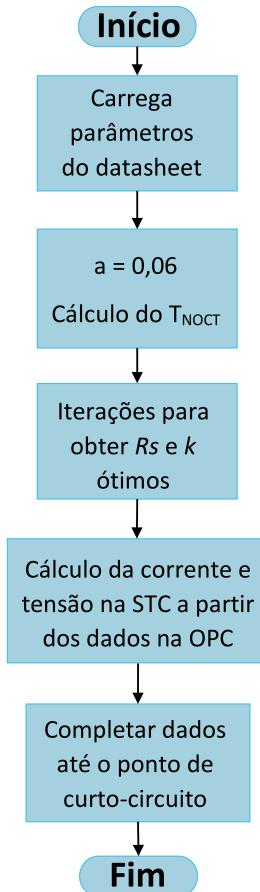


Figura 4.26: Resumo do método proposto para o translado dos dados medidos na OPC para a STC.

4.5 Resultados experimentais

4.5.1 Testes de funcionamento e calibração

Os primeiros testes realizados com os circuitos projetados, tiveram a finalidade de validar cada subcírcuito, principalmente o funcionamento da carga variável. Também foram validadas as configurações do MCU, verificando que este possa ter o controle dos diferentes dispositivos conectados a ele (principalmente o LCD, o DAC e ADCs externos). Em seguida, foram validados os diferentes algoritmos do sistema embarcado. A Fig. 4.27 mostra um teste com as conexões feitas nos circuitos do protótipo para verificar o funcionamento dos circuitos referentes aos algoritmos de aquisição.

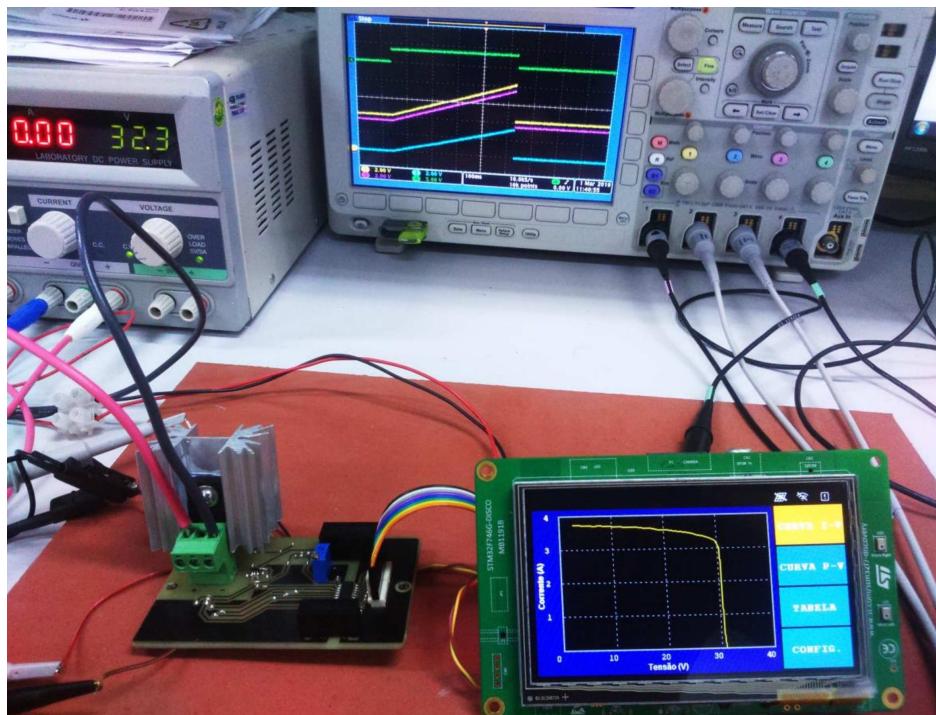


Figura 4.27: Teste para verificar os circuitos projetados e os algoritmos de aquisição.

No teste da Fig. 4.27, com o uso do osciloscópio Tektronix DPO 3014, foram obtidos o sinal na saída do DAC, o sinal na saída do amplificador e o sinal na porta do IGBT, os quais foram semelhantes aos resultados das simulações feitas anteriormente e mostradas na Fig. 4.6, validando a faixa de tensão projetada e a linearidade do sinal condicionado. Foi medido também, o tempo necessário o qual a função de aquisição dos dados leva para ser finalizada, resultando em aproximadamente 492 ms, sendo suficiente para que as condições ambientais externas não sofram variações significativas durante o procedimento. A Fig. 4.28 mostra a tela do osciloscópio onde pode-se observar o tempo de aquisição, o sinal de controle e os sinais condicionados.

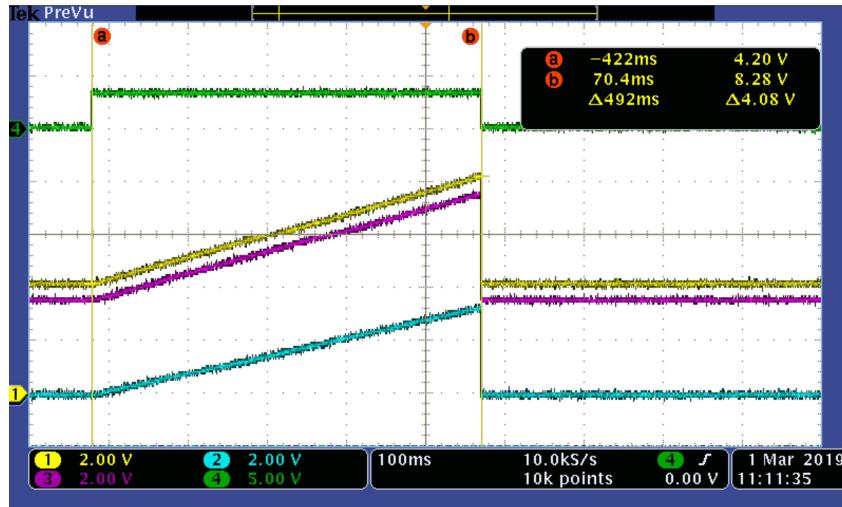


Figura 4.28: Teste para obter o tempo que toma o sinal de controle desde o valor mínimo até o valor máximo.

A Fig. 4.29 mostra o tempo necessário para se obter cada ponto de operação da fonte FV, considerando os tempos necessários para as seguintes operações: mudar a tensão de saída do DAC (enviar o comando por SPI), obter de maneira simultânea as medições de corrente e tensão (considerando um tempo de atraso de 15 us para que o DAC fixe a tensão de saída antes de fazer as medições) e realizar a verificação dos valores de corrente, tensão e potência medidos, de forma que não exceda os limites estabelecidos pelo protótipo. O tempo necessário para este processo foi de 120 us, sendo o tempo de processamento quase desprezível.

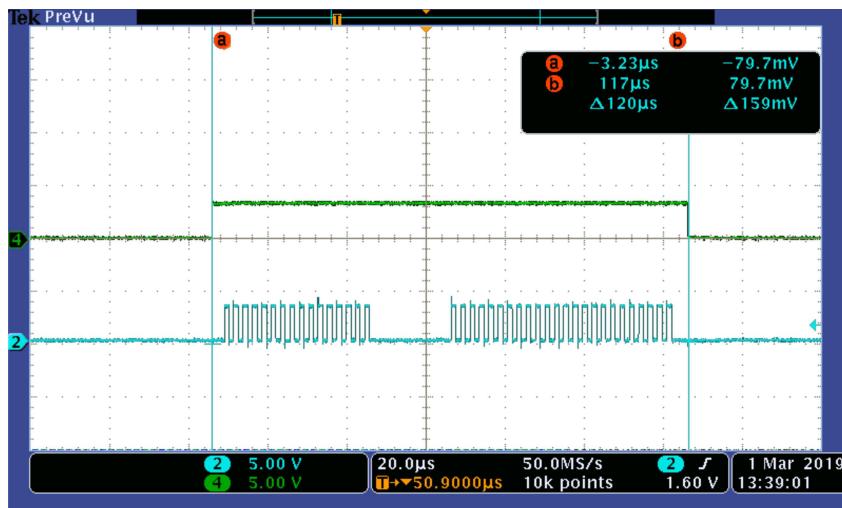


Figura 4.29: Tempo necessário para fazer uma única variação da carga variável e obter as medições de corrente e tensão.

Também foram feitos outros testes com a finalidade de obter experimentalmente alguns parâmetros elétricos do IGBT, como a corrente mínima do coletor $I_{C_{min}} = 40 \mu\text{A}$,

quando o sinal do DAC é zero e o sinal de controle é mínima $V_{GE_{min}} = 3,63\text{ V}$ (devido à tensão de offset), sendo testado com uma tensão presente entre o coletor e o emissor. Também foi achado a tensão de saturação $V_{CE_{sat}} = 1,89\text{ V}$ quando o sinal de controle é máxima $V_{GE_{max}} = 7,67\text{ V}$ e com uma corrente de coletor próximo ao valor máximo. A Fig. 4.30 e a Fig. 4.31 mostram esses testes, onde os valores foram obtidos com multímetros de boa precisão (*FLUKE 111*, *FLUKE 175* e *FLUKE 289*).

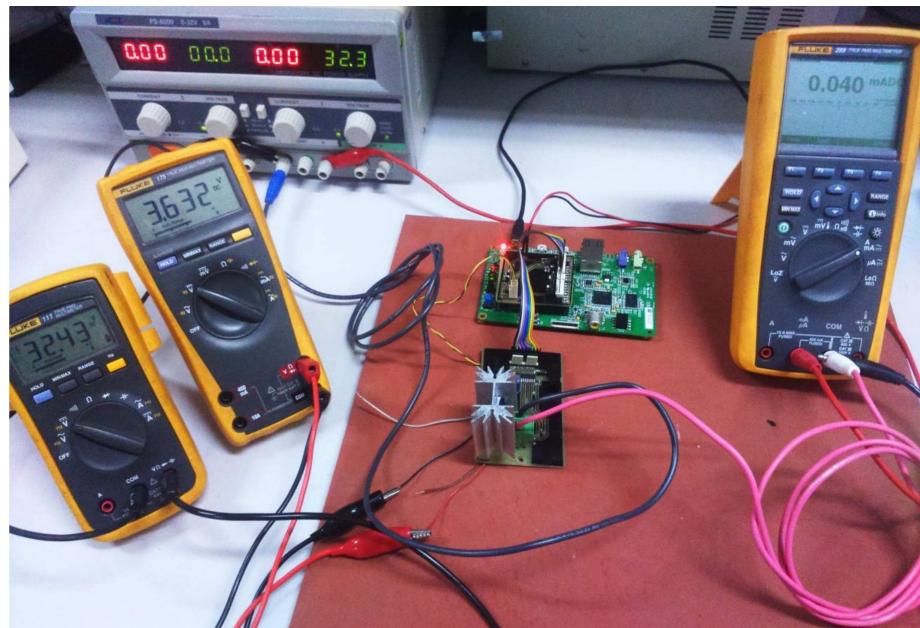


Figura 4.30: Teste para obter a corrente mínima I_C do IGBT quando o sinal de controle é mínima.

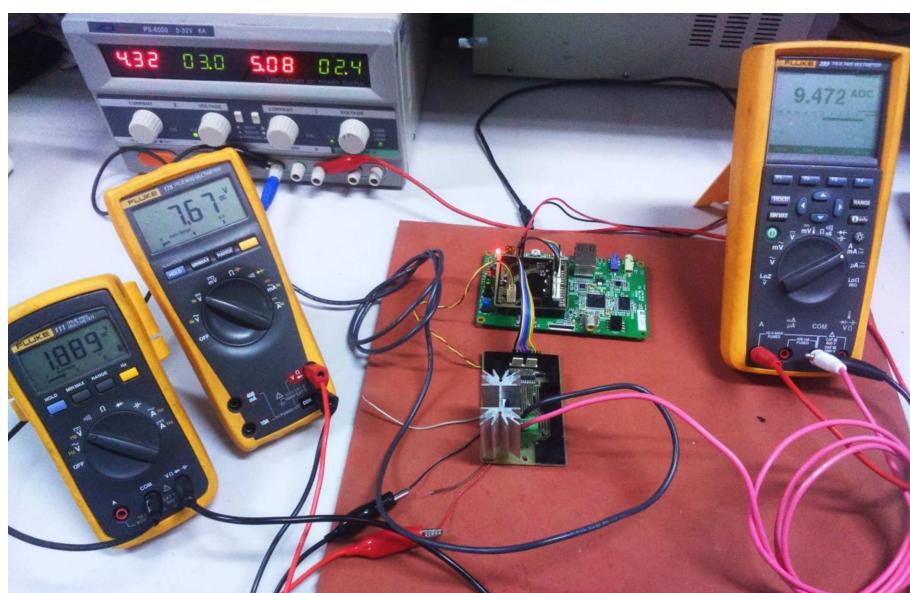


Figura 4.31: Teste para obter a tensão mínima $V_{CE_{sat}}$ do IGBT quando o sinal de controle é máxima.

Após a validação dos circuitos e a cada vez em que o circuito de potência era submetido a alguma alteração, foi feita uma nova calibração dos sensores de corrente e tensão. Para estes testes foi utilizado o simulador FV *TerraSAS ETS 600/25* da *AMETEK*, um multímetro *FLUKE 289*, para obter a medição de tensão ou corrente de referência segundo seja o caso, e o circuito desenvolvido. Para calibrar a tensão, a carga variável é desligada para que o ponto de operação do simulador FV fique na tensão de circuito aberto, sendo este valor modificado desde 5 V até 600 V em passos de 10 V, ou 25 V para tensões a partir de 175 V. Para cada variação, o valor indicado pelo multímetro e o valor do registrador correspondente do MCU (valor obtido através de depuração) são registrados. No caso da calibração da corrente, a carga variável é ligado, para que o ponto de operação do simulador FV fique na corrente de curto-circuito, onde este valor foi modificado desde 250 mA até 10 A em passos de 500 mA. Similar ao caso anterior, foram registradas as medições do multímetro e do registrador correspondente do MCU.

A última calibração realizada foi feita no dia 17 de abril de 2019, neste teste, obteve-se a relação entre o valor adquirido no registrador proveniente do sensor de tensão (R_V) e o valor da tensão medida pelo multímetro. Os parâmetros são relacionados conforme a equação 4.4, onde obteve-se uma precisão média de 0,15 % e máxima de 0,95 %. De maneira similar, a equação 4.5 mostra a relação entre o valor adquirido no registrador proveniente do sensor de corrente (R_I) e o valor medido da corrente, onde se obteve um erro de precisão média de 0,05 % e máxima de 0,93 %.

$$V = 0,0107.R_V + 0,03 \quad (4.4)$$

$$I = 0,0001621.R_I + 0,0015 \quad (4.5)$$

4.5.2 Testes de campo com uma string FV

Os primeiros testes de campo foram realizados com a premissa de verificar que o equipamento desenvolvido apresente uma boa distribuição de pontos nas curvas características. Para ter uma referência das medições feitas, foi utilizado um traçador de curva em evidência no ramo do mercado solar, o *Solar I-Ve*. Com o suporte deste equipamento, foram feitos testes com os mesmos módulos e considerando condições semelhantes de irradiação e temperatura. Os testes foram feitos na usina fotovoltaica localizada nas dependências do CIS (Centro Cultural de Inclusão e Integração Social) Guanabara-UNICAMP, composta por uma string de 12 módulos do modelo (STP190S-24/Ad+). Para evitar que fatores externos, como a sujeira não uniformemente distribuída pelos módulos, influa sobre a eficiência destes, foi feita uma limpeza prévia de cada um dos módulos. A Fig. 4.32 mostra os equipamentos e os módulos usados nos testes realizados no dia 08 de março de 2019, entre as 12:00 e as 13:15 horas.



Figura 4.32: Equipamento Solar I-Ve (esquerda), protótipo desenvolvido (direita) e módulos de uma string FV localizada no CIS Guanabara-UNICAMP.

As medições dos parâmetros ambientais foram obtidas pelo traçador comercial, pois ele conta com sensores externos necessários para isso. Esses sensores foram posicionados segundo o indicado pela norma IEC 61829. A célula de referência foi instalada coplanar com a superfície da instalação FV e o sensor de temperatura foi pré-condicionado na parte de trás do módulo testado. No momento em que os testes foram realizados, foram levadas em consideração os procedimentos que são mencionados nesta IEC: a irradiação global não pode flutuar acima de $\pm 1\%$ e a temperatura medida pelo sensor deve se manter estável na faixa de $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Os testes começaram depois do tempo necessário para que a temperatura do sensor e do módulo FV se equilibrem. A Fig. 4.33 mostra a localização dos sensores de irradiação e temperatura.

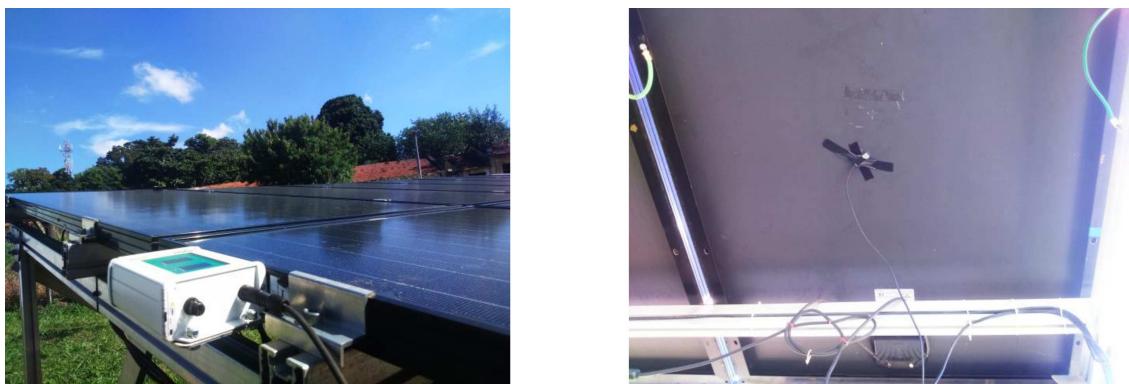


Figura 4.33: Sensor de irradiação coplanar com um módulo FV (direita) e sensor de temperatura colocado na parte traseira de um módulo FV (esquerda).

Nos primeiros testes foram traçados as curvas características I-V e PV de um módulo FV até uma string composta por 5 módulos em série, sob condições normais (sem sombreamento). Para estes testes, unicamente foram obtidas as curvas características nas condições de operação, utilizando os procedimentos descritos na subseção 4.4.2, comparando os resultados adquiridos pelos dois equipamentos.

A Fig. 4.34 mostra as curvas I-V e P-V produzidas pelo equipamento comercial (curva vermelha) e pelo protótipo (curva azul), para um módulo FV e uma string de dois, quatro e cinco módulos em série. Pode-se observar que as curvas I-V produzidas pelo protótipo tem um declive diferente na região próxima da tensão máxima em relação às curvas I-V do equipamento comercial, para cada teste, originando uma diferença de potência considerável no PPM, ao comparar as curvas P-V dos dois equipamentos. O valor dessa diferença e o DP (segundo a equação 4.2) para cada teste são mostrados na tabela 4.5. Também se observa que esse efeito é menos perceptível quando o número de módulos em série é maior.

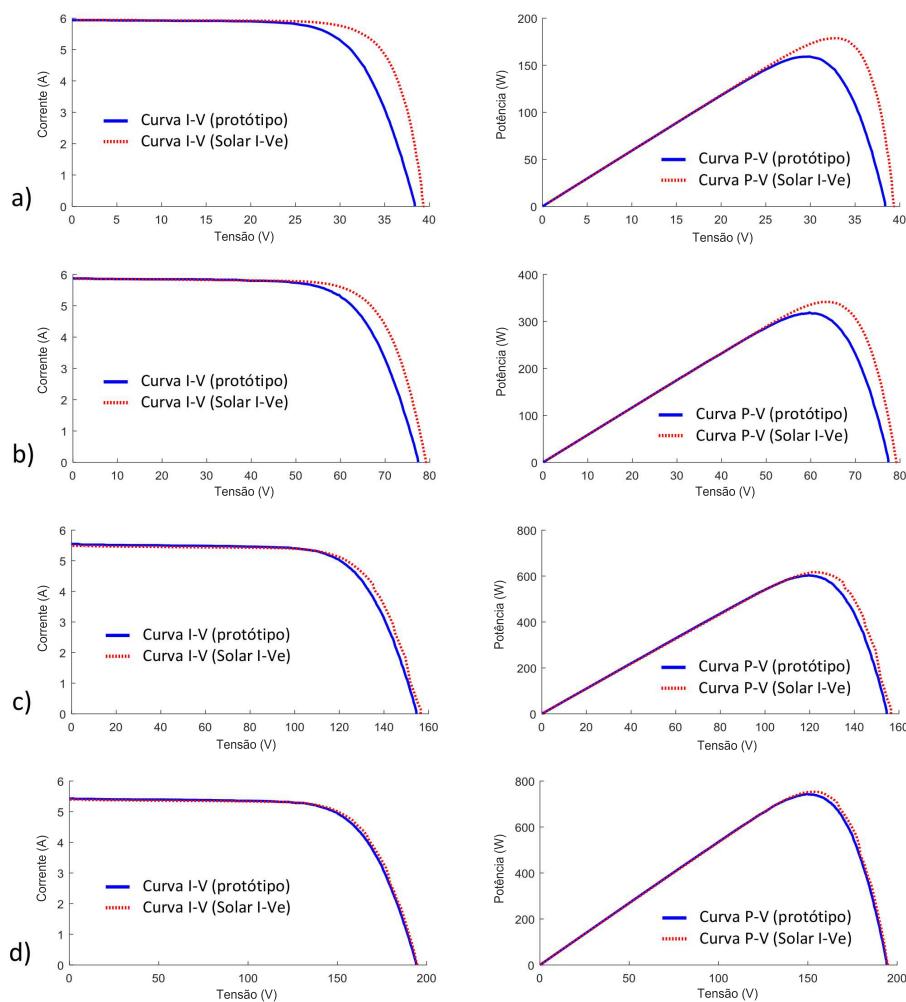


Figura 4.34: Curvas características I-V e P-V, obtidas pelo equipamento comercial e pelo equipamento desenvolvido, de a) um módulo FV, b) dois módulos em série, c) quatro módulos em série e d) cinco módulos em série.

Tabela 4.5: Diferenças de potência máxima entre as medições dos dois equipamentos.

Número de módulos	Diferença de potência (W)	DP (%)
1	19,59	10,96
2	22,45	6,57
4	13,34	2,16
5	9,1	1,21

Já que a mudança do valor da resistência em série R_s pode provocar esse efeito, além disso, em todos os testes as medições foram feitas ao mesmo número de módulos em condições similares, pois a diferença no valor de irradiância foi de 11 W/m^2 como máximo e da temperatura de 3°C como máximo. Considerou-se que as diferenças das comparações mostradas na Fig. 4.34 foram relacionados às perdas nos cabos ou conectores quando é utilizado o equipamento desenvolvido durante estes testes, o que influiu na resistência em série total da fonte FV.

Com a finalidade de corrigir as curvas características produzidas pelo equipamento desenvolvido, devido aos altos valores de DP, foram analisados os dados adquiridos e, considerando os quatro testes, foi achado o melhor valor da resistência em série adicionada ($R_{sa} = 0.38 \Omega$) que envolve o total das perdas nos cabos e conectores do equipamento utilizados nestes testes. Este ajuste deve ser feito adicionando um fator à tensão obtida, como é mostrado na equação 4.6. Onde V_{Adj} é o valor da tensão ajustada, que será considerada como a tensão da fonte FV.

$$V_{Adj} = V + R_{sa} \cdot I \quad (4.6)$$

A Fig. 4.35 mostra as curvas I-V e P-V produzidas pelo equipamento comercial (curva vermelha) e pelo protótipo (curva azul), considerando o ajuste proposto. Enquanto a tabela 4.6 apresenta a diferença de potência no PPM e o DP para cada teste. Pode-se observar que as curvas I-V dos equipamentos, para cada teste, apresentam características mais similares que no caso anterior. Além disso, a comparação da potência no PPM, observado nas curvas P-V e na tabela, também apresentam melhores resultados. Os ajustes propostos serão aplicados nos demais testes realizados durante esse dia.

Tabela 4.6: Diferenças de potência máxima entre as medições dos dois equipamentos com o ajuste proposto.

Número de módulos	Diferença de potência (W)	DP (%)
1	8,51	4,76
2	11,59	3,39
4	3,69	0,6
5	0,3	0,04

Embora os resultados não sejam os mesmos, as diferenças presentes poderiam ser

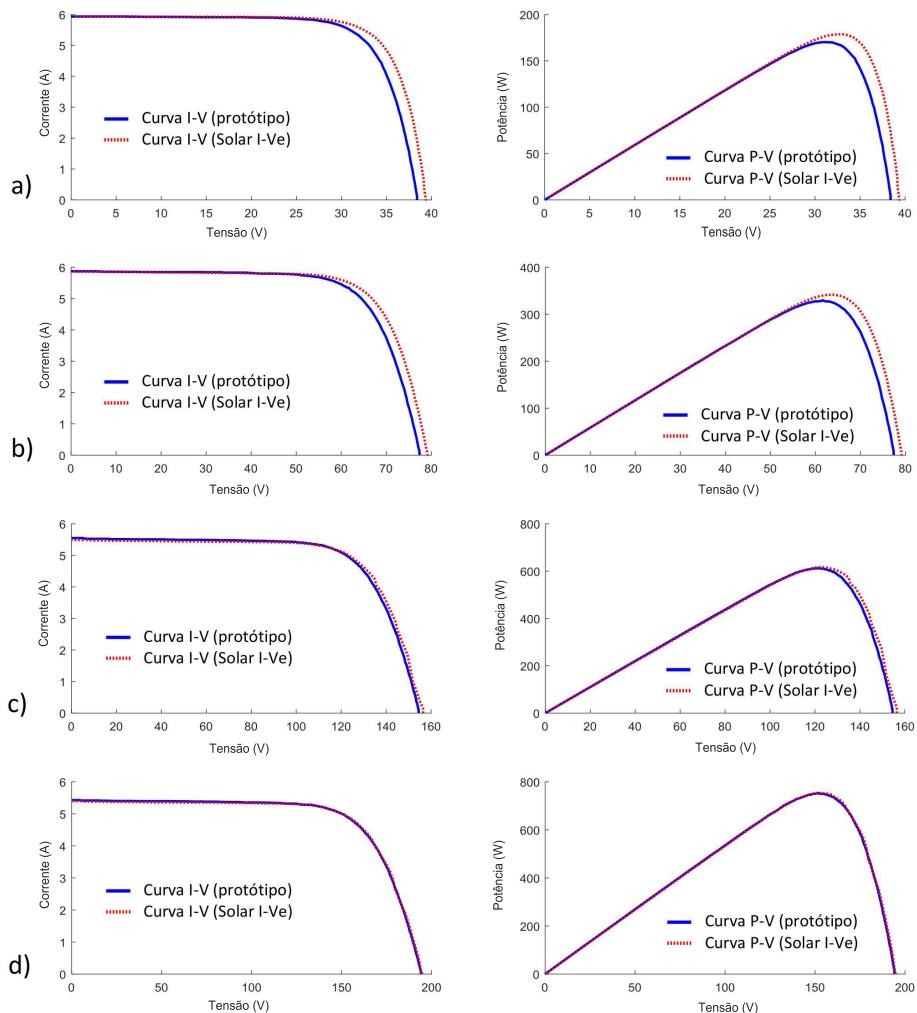


Figura 4.35: Curvas características I-V e P-V, obtidas pelo equipamento comercial e pelo equipamento desenvolvido, depois de fazer o ajuste, de a) um módulo FV, b) dois módulos em série, c) quatro módulos em série e d) cinco módulos em série.

relacionadas às mudanças do valor da irradiância e da temperatura entre as medições, pois para testar a mesma fonte FV, a medição com o equipamento desenvolvido foi feita depois da medição com o equipamento comercial (dois minutos de diferença em média). Vale mencionar que, nos testes anteriores, o equipamento desenvolvido conseguiu obter as medições de 5 módulos em série, suportando uma potência máxima de aproximadamente 753 W, verificando a potência projetada (até 1 kW).

No mesmo dia dos testes anteriores e considerando dois módulos em série, também foram feitas as medições sob sombreamento parcial, originado de maneira intencional a fim de conseguir curvas características com vários pontos de inflexão e curvas acentuadas (joelhos). Além disso, os módulos em teste mantiveram o mesmo perfil de sombreamento em ambos os testes com os equipamentos. Para isso, foram inseridos objetos opacos em diferentes partes da superfície dos módulos, afetando a geração de algumas células ou grupo de células fotovoltaicas desses módulos. A Fig. 4.36 mostra os equipamentos e a

localização dos objetos para conseguir dois diferentes perfis de sombreamento. Enquanto, a Fig. 4.37 apresenta as curvas adquiridas pelo equipamento desenvolvido (curva azul) e pelo equipamento comercial (curva vermelha) para os dois perfis de sombreamento.



Figura 4.36: Primeiro perfil de sombreamento (direita) e segundo perfil de sombreamento (esquerda).

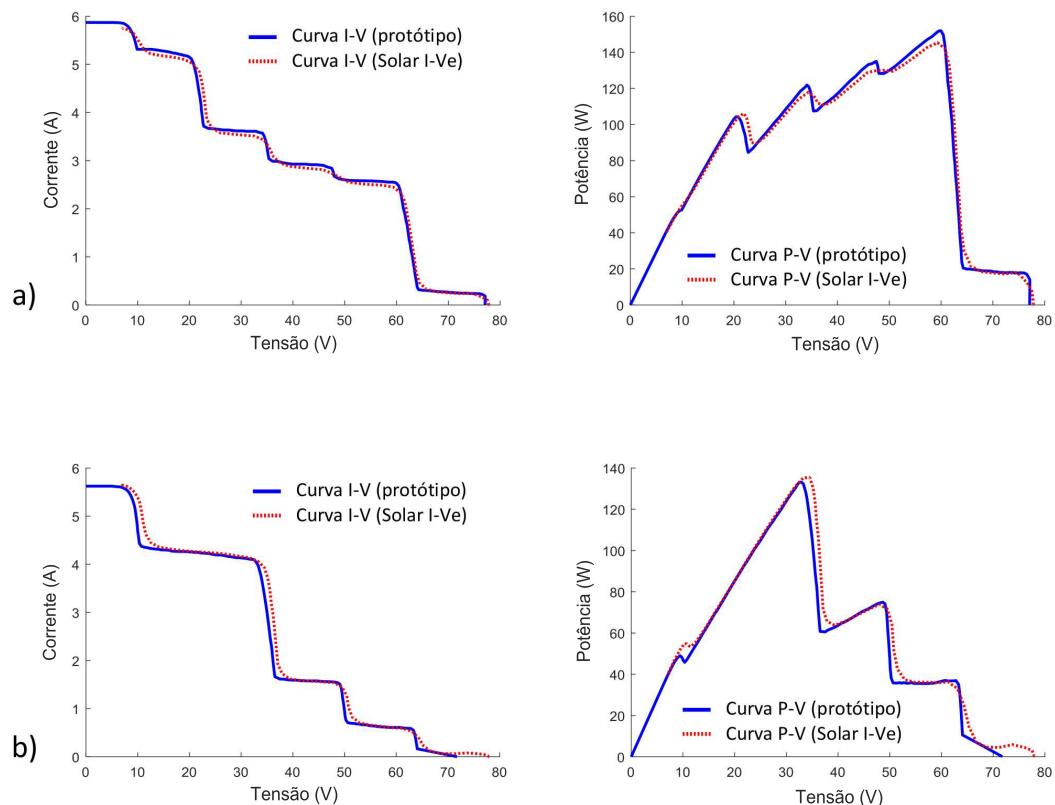


Figura 4.37: Curvas características I-V e P-V, obtidos pelo equipamento desenvolvido e o equipamento comercial para a) Primeiro perfil de sombreamento e b) segundo perfil de sombreamento.

Na Fig. 4.37 pode-se observar que, para cada teste, as curvas I-V e P-V dos dois equipamentos são similares, com o mesmo número de pontos de inflexão e de joelhos,

embora, com certas diferenças. No caso do equipamento comercial, as curvas I-V e P-V geradas apresentam trajetórias suaves, especialmente nos pontos de inflexão, enquanto, nas curvas geradas pelo equipamento desenvolvido, esses pontos são mais acentuados. No entanto, segundo as características das curvas obtidas mediante a simulação de módulos com sombreamento, como as mostradas na Fig. 2.9 e na Fig. 2.10, elas também apresentam pontos de inflexão acentuados. Portanto, os resultados obtidos pelo equipamento desenvolvido estão de acordo com o esperado.

Finalmente, o dia 09 de maio de 2019, entre as 11:30 e as 12:30 horas, foram feitos outros testes na mesma localização e com a mesma string FV, com a finalidade de verificar a precisão das medições e os resultados dos procedimentos propostos neste desenvolvimento. Nestes testes também foi utilizado o equipamento comercial e os sensores de irradiação e temperatura, seguindo os procedimentos mencionados no teste anterior. Neste caso, além de obter as curvas características nas condições de operação, também foram obtidos as curvas características corrigidos para a STC, segundo os procedimentos propostos. Os principais parâmetros elétricos do módulo FV utilizado na STC e em NOCT são mostrados na tabela 4.7.

Tabela 4.7: Parâmetros elétricos do módulo FV STP190S-24/Ad+ na STC e em NOCT.

	STC ($T_C = 25^\circ\text{C}$, $G = 1000 \text{ W/m}^2$)	NOCT ($T_C = 45 \pm 2^\circ\text{C}$, $G = 800 \text{ W/m}^2$)
Pmax	190 W	139 W
Vmp	36,6 V	33,1 V
Imp	5,2 A	4,19 A
Voc	45,2 V	41,3 V
Isc	5,62 A	4,56 A

Foram feitos testes para um módulo FV, iniciando as medições com o equipamento comercial. As condições de temperatura e irradiação em que foram feitos os testes e os principais parâmetros elétricos adquiridos com os dois equipamentos são apresentados na tabela 4.8. Enquanto a Fig. 4.38 mostra as curvas I-V e P-V geradas por cada equipamento para essas condições de operação. Pode-se observar a semelhança das curvas comparadas, sendo desnecessário o ajuste por perdas feito nos testes prévios.

Tabela 4.8: Parâmetros elétricos adquiridos pelos equipamentos nas condições de operação.

	Protótipo	Solar I-Ve
Temperatura	$50,4 \pm 1^\circ\text{C}$	$51 \pm 1^\circ\text{C}$
Irradiância	$812 \pm 1 \text{ W/m}^2$	$797 \pm 1 \text{ W/m}^2$
Pmax	141,04 W	133,14 W
Vmp	32,95 V	32,30 V
Imp	4,28 A	4,12 A
Voc	41,21 V	40,75 V
Isc	4,68 A	4,44 A

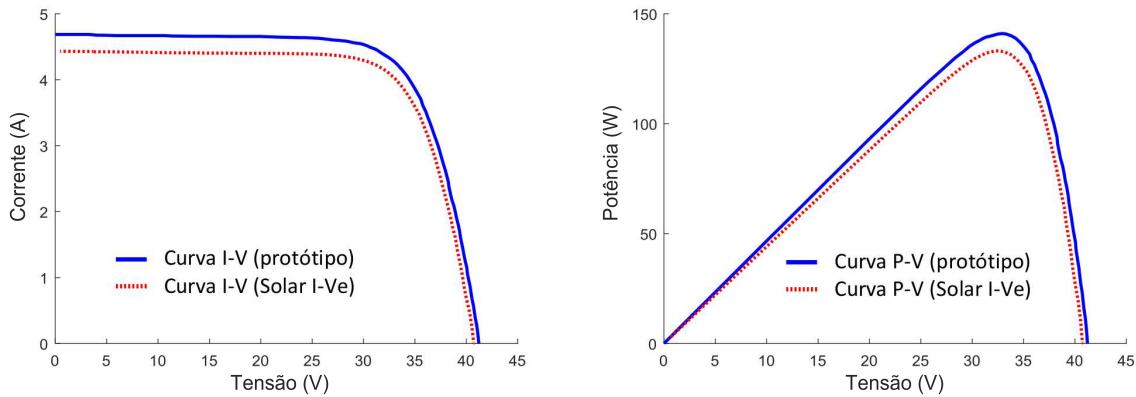


Figura 4.38: Curvas características I-V e P-V do equipamento desenvolvido (azul) e do equipamento comercial (vermelho).

Pode-se observar na tabela 4.8 que os valores dos principais parâmetros elétricos nas condições de operação se encontram próximos aos parâmetros do módulo FV em NOCT mostrado na tabela 4.7. O que assegura em certa forma que, os valores adquiridos são corretos. A partir das condições de operação, as medições de corrente e tensão, adquiridas pelo protótipo, foram corrigidas para a STC utilizando o procedimento da subseção 4.4.3. Como resultado, obteve-se os fatores $a = 0,06$, $R_s = 0,35 \Omega$ e $\kappa = 0,001 \Omega/\text{ }^\circ\text{C}$. A Fig. 4.39 apresenta as curvas I-V e P-V na OPC e na STC obtidos seguindo os procedimentos desenvolvidos, além dos principais pontos nominais utilizados como referência. Enquanto a Fig. 4.40 apresenta as curvas características I-V e P-V nominais (a partir dos parâmetros elétricos ingressados), na OPC e na STC obtidas pelo equipamento comercial, utilizando o aplicativo TopView (proporcionado pelo mesmo fabricante do equipamento).

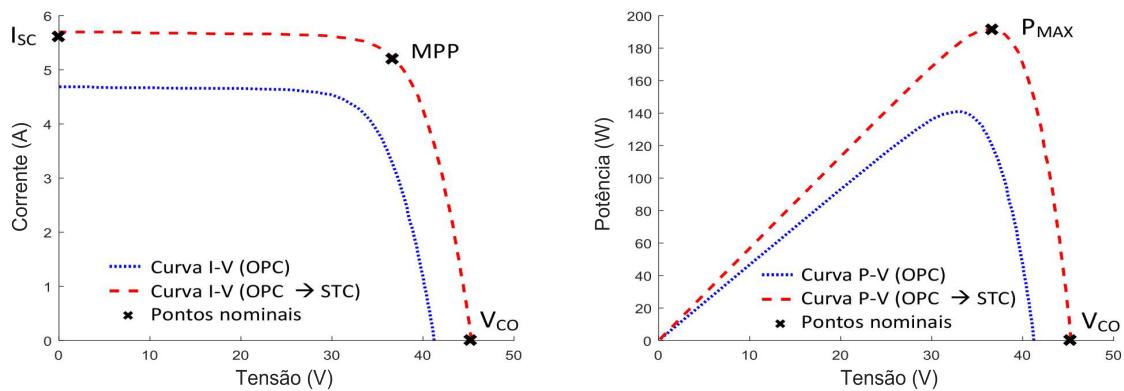


Figura 4.39: Curvas características I-V e P-V do equipamento desenvolvido em OPC, na STC, e principais pontos nominais.

A tabela 4.9 apresenta uma comparação entre os principais parâmetros elétricos na STC, obtidos pelos dois equipamentos, além da porcentagem de erro de comparação ($Erro_{obtido}$) entre os valores obtidos e os valores nominais proporcionados na folha de dados

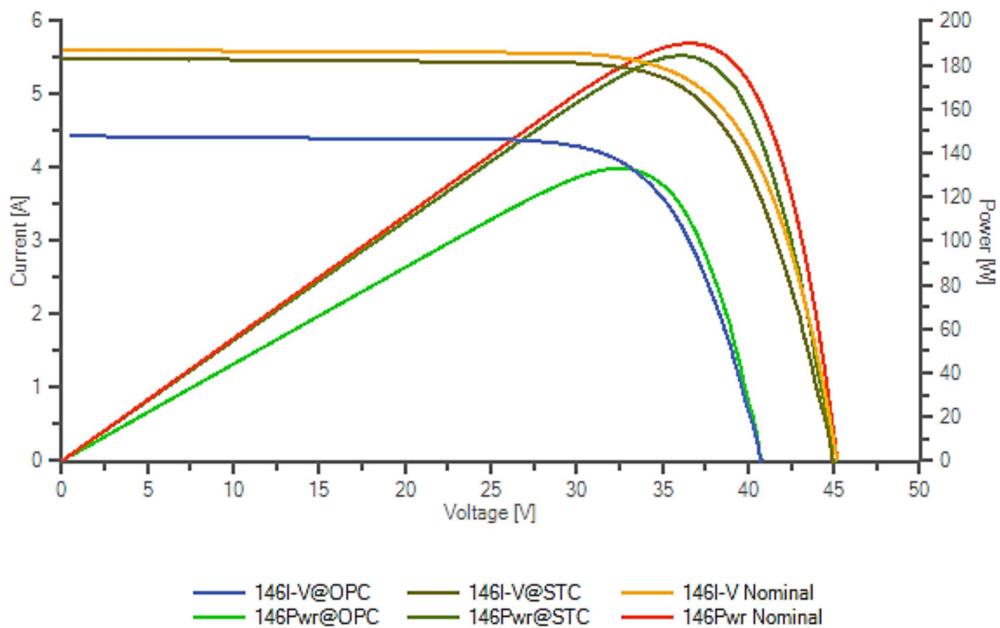


Figura 4.40: Curvas características I-V e P-V do equipamento comercial na OPC, na STC e as curvas nominais.

do módulo FV testado, mostrados na tabela 4.7. O $Erro_{obtido}$ é similar ao cálculo do DP , mas neste caso, a diferença é feita para cada parâmetro, como é indicado na equação 4.7. Onde $Param_{nom}$ é o valor do parâmetro elétrico nominal e $Param_{obtido}$ é o valor do parâmetro elétrico obtido.

$$Erro_{obtido}(\%) = \frac{|Param_{nom} - Param_{obtido}| . 100}{Param_{nom}} \% \quad (4.7)$$

Tabela 4.9: Comparaçāo dos parāmetros elētricos adquiridos pelos dois equipamentos.

(STC)	Protótipo	Solar I-Ve	$Erro_{proto}(\%)$	$Erro_{solarIVe}(\%)$
Pmax	191,69 W	184,51 W	0,89	2,89
Vmp	36,84 V	36,14 V	0,66	1,25
Imp	5,2 A	5,11 A	0,00	1,73
Voc	45,29 V	44,96 V	0,20	0,53
Isc	5,7 A	5,49 A	1,42	2,31

A correspondēcia da curva corrigida na STC com os principais pontos nominais, mostrado na Fig. 4.39 e ratificado nos valores comparativos apresentados na tabela 4.9, demonstram que o equipamento desenvolvido tem alto grau de precisão e emprega os algoritmos necessários para obter as curvas OPC e STC. Seja nos dados adquiridos como nos erros de medição, os resultados obtidos pelo equipamento desenvolvido foram semelhantes que os obtidos pelo um equipamento comercial, validando a confiabilidade dos resultados do protótipo.

Capítulo 5

Conclusões e trabalhos futuros

5.1 Conclusões e contribuições do presente trabalho

Uma das primeiras contribuições do presente trabalho, resultado da comparação dos principais métodos para obter as curvas características, foi a proposta de alguns critérios para a seleção da carga variável mais conveniente (subseção 3.3.2), segundo os requerimentos mais relevantes do futuro equipamento. Avaliando estes critérios, concluiu-se que o dispositivo IGBT seria a carga variável mais conveniente para que este desenvolvimento cumpra com seus objetivos. Esta contribuição foi apresentada como um artigo no *INDUSCON 2018* e publicado no *IEEE Xplore Digital Library*.

Outras contribuições deste trabalho foram os procedimentos a seguir para projetar os circuitos e construir um equipamento capaz de fazer medições de corrente e tensão em DC com boa precisão (tabela 4.2), utilizar um dispositivo IGBT como carga variável, apresentar os dados adquiridos no mesmo equipamento ou armazená-las em uma memória, além de fornecer a proteção elétrica necessária para que o equipamento seja manipulado em segurança (Fig. 4.1). Ressaltando que o equipamento também conta com uma interface homem-máquina e proteção da carga por *software*. Muitas destas características podem ser utilizadas em futuros desenvolvimentos de equipamentos similares ou inclusive, também pode ser de utilidade para outras aplicações que precisem de características semelhantes.

Pode-se afirmar que foram cumpridos os objetivos propostos. Foram elaborados os algoritmos necessários para tratar os dados adquiridos, apresentando as curvas I-V e P-V nas condições de operação, e transferi-los à condição padrão de teste, com resultados similares aos obtidos por um equipamento estabelecido no mercado. Também, foi desenvolvido um protótipo funcional capaz de traçar as curvas características de módulos e strings fotovoltaicas com um alto grau de precisão e custo acessível. Podendo ser de muita utilidade no âmbito acadêmico, seja no ensino das características de uma fonte FV ou em pesquisas relacionadas. Além disso, o protótipo desenvolvido pode servir de base para um equipamento melhorado, com potencial para competir no mercado fotovoltaico.

5.2 Propostas para trabalhos futuros

As propostas para melhorar o presente trabalho baseiam-se em aumentar o valor da potência máxima que o equipamento pode suportar, a precisão e outros aspectos importantes, como o consumo de energia e o seu custo. Em relação ao valor da potência máxima (atualmente de 1 kW), dado que a carga variável utilizada (IGBT) tem uma alta adaptabilidade, é possível que o equipamento possa caracterizar uma instalação FV de potências maiores, fazendo poucas modificações. Uma opção é mudar o IGBT atual por outro que suporte uma potência maior, embora, esta opção também tem um limite de potência relativamente baixo no mercado (2,3 kW aproximadamente). Outra opção, é aumentar a quantidade destes dispositivos, conectando-os em paralelo, exigindo a modificação do circuito de controle de cada IGBT e, também, considerar a máxima corrente consumida pelo circuito.

Apesar que o equipamento apresenta uma precisão de $\pm 1\%$ em toda a faixa de medição, a IEC 61829 indica que a tensão e a corrente devem ser medidas com uma precisão de $\pm 0,2\%$ da tensão de circuito aberto e corrente de curto-círcuito. Uma forma de aumentar a precisão das medições feitas pelo equipamento, é reduzir o ruído relacionado ao circuito de aquisição, otimizando as trilhas e a disposição dos componentes, no entanto, isso é possível fabricando as placas impressas de maneira industrial. Além disso, para evitar que o equipamento produza erros nas medições, devido às perdas na resistência dos cabos e dos conectores (quando são utilizados somente dois cabos), outra possível melhora é mudar o método de medição, pois, quando são cabos independentes para as medições de tensão e corrente da fonte FV (conexão de 4 fios), similar que o equipamento comercial, é possível utilizar cabos de teste de comprimentos diferentes, sem realizar calibração devido à resistência dos cabos [88].

A última consideração baseia-se no módulo de desenvolvimento STM32 descrito na subseção 4.1.1. Por apresentar funcionalidades não utilizadas no escopo deste projeto, o módulo pode ser substituído por uma placa impressa devidamente projetada, melhorando a organização do *hardware*, reduzindo o consumo de energia e inclusive o custo total do equipamento.

Referências Bibliográficas

- [1] REN21, “Renewables 2019 Global Status Report,” tech. rep., 2019.
- [2] Agência de Notícias do Paraná, “Copel viabiliza energia solar no prédio da Prefeitura de Curitiba.” <http://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=102435&tit=Copel-viabiliza-energia-solar-no-predio-da-Prefeitura-de-Curitiba>. Accessed on 2019-09-19.
- [3] MV Power, “PIRAPORA (400 MWp).” <http://mvpower.com.br/single-project.php?id=2>. Accessed on 2019-09-19.
- [4] CanadianSolar, “Solar Modules.” <https://www.canadiansolar.com/solarPanels/detail/33>. Accessed on 2019-09-19.
- [5] RENOGY, “Solar Panels.” <https://www.renogy.com/products/solar-panels/>. Accessed on 2019-09-19.
- [6] HT Italia, “I-V curve tracer and IVCK tester up to 15A.” I-V400w datasheet, 2015.
- [7] Solmetric Corporation, “PVA-1000S PV Analyzer Kit.” <http://www.solmetric.com/pva1000s.html>. Accessed on 2019-02-06.
- [8] Seaward, “PV210 The most compact I-V curve tracer around.” PV210 datasheet, 2019.
- [9] Seaward, “Solar Survey 100/200R Series.” SS 100/200R datasheet, 2019.
- [10] HT Italia, “Reference cell for sun irradiation measurement.” HT304N datasheet, 2011.
- [11] EKO Instruments, “MS-02 Sensor Technical Specifications.” MS-02 datasheet, 2019.
- [12] International Rectifier, “HEXFET Power MOSFET.” IRFP260NPbF datasheet, 2010.
- [13] STMicroelectronics, “Trench gate field-stop IGBT, H series 1200 V, 25 A high speed.” STGW25H120DF2, STGWA25H120DF2 datasheet, 2015.
- [14] Canadian Solar Inc., “CanadianSolar.” CS6K-270|275|280P datasheet, 2018.

- [15] IXYS, “1200V XPT IGBT GenX3.” IXYH82N120C3 datasheet, 2012.
- [16] R. Foster, M. Ghassemi, and A. Cota, *Solar Energy: Renewable Energy and the Environment*. CRC Press, 1 ed., 2009.
- [17] IPCC, “Climate Change 2014: Synthesis Report,” tech. rep., 2014.
- [18] REN21, “Renewables 2017 Global Status Report,” tech. rep., 2017.
- [19] REN21, “Renewables 2018 Global Status Report,” tech. rep., 2018.
- [20] IEA, “Global Energy and CO₂ Status Report - 2017,” tech. rep., 2017.
- [21] ANEEL, “Micro e minigeração distribuídas.” Cadernos Temáticos ANEEL, 2016.
- [22] ANEEL, “ Banco de Informações de Geração - Capacidade de Geração do Brasil.” <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Accessed on 2019-07-02.
- [23] ANEEL, “Geração Distribuída.” http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp. Accessed on 2019-07-02.
- [24] P. Hernday, “Field Applications for I-V Curve Tracers,” tech. rep., 2011.
- [25] TEquipment, “HT Instruments I-V 400w Multifunction Instrument I-V Curve Tracer.” <https://www.tequipment.net/HT-Instruments/I-V-400w/Solar-Field-Analyzers/>. Accessed on 2019-02-15.
- [26] P. Gevorkian, *Large-Scale Solar Power System Design : An Engineering Guide for Grid-Connected Solar Power Generation*. McGraw-Hill, 1 ed., 2011.
- [27] M. G. Villalva, *Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações*. 2 ed., 2015.
- [28] M. Villalva, J. Gazoli, and E. Filho, “Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, pp. 1198–1208, may 2009.
- [29] J. T. Pinho, M. A. Galdinho, GTES, *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: CEPEL-DTE-CRESESB, 1 ed., 2014.
- [30] H. Tian, F. Mancilla-david, K. Ellis, P. Jenkins, and E. Muljadi, “A Detailed Performance Model for Photovoltaic Systems,” *Solar Energy Journal*, July 2012.
- [31] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, “Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays,” in *2009 Brazilian Power Electronics Conference*, pp. 1244–1254, IEEE, sep 2009.

- [32] Solmetric Corporation, “Guide To Interpreting I-V Curve Measurements of PV Arrays.” Appl. Note PVA-600-1, 2011.
- [33] IEC, “Photovoltaic (PV) array – On-site measurement of current-voltage characteristics.” International Standard IEC 61829:2015.
- [34] IEC, “Photovoltaic devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics.” International Standard IEC 60904-1:2006.
- [35] IEC, “Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics.” International Standard IEC 60891:2009.
- [36] E. Duran, M. Pilioungine, M. Sidrach-de Cardona, J. Galan, and J. Andujar, “Different methods to obtain the I-V curve of PV modules: A review,” in *2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1–6, IEEE, may 2008.
- [37] METREL D.D., “Photovoltaic and electrical installations tester MI 3108 EurotestPV.” MI 3108 datasheet, 2017.
- [38] EKO Instruments, “MP-11 I-V Checker.” MP-11 datasheet, 2019.
- [39] Solmetric Corporation, “PVA-1500 PV Analyzer Kit.” <http://www.solmetric.com/pva1500.html>. Accessed on 2019-02-06.
- [40] HT Italia, “I-V curve tracer and IVCK tester up to 15A or 1500VDC.” I-V500w datasheet, 2017.
- [41] ABNT, “Instalações elétricas de baixa tensão.” Norma Brasileira ABNT NBR 5410:2004.
- [42] E. Durán, J. Galán, J. M. Andujar, and M. Sidrach-de Cardona, “A New Method to Obtain I-V Characteristics Curves of Photovoltaic Modules Based on SEPIC and Cuk Converters,” *EPE Journal*, vol. 18, pp. 5–15, jun 2008.
- [43] A. Ibrahim, “Analysis of Electrical Characteristics of Photovoltaic Single Crystal Silicon Solar Cells at Outdoor Measurements,” *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 02, no. 02, pp. 169–175, 2011.
- [44] E. van Dyk, A. Gxasheka, and E. Meyer, “Monitoring current-voltage characteristics of photovoltaic modules,” in *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002.*, no. 603, pp. 1516–1519, IEEE, 2002.
- [45] E. van Dyk, A. Gxasheka, and E. Meyer, “Monitoring current–voltage characteristics and energy output of silicon photovoltaic modules,” *Renewable Energy*, vol. 30, pp. 399–411, mar 2005.

- [46] N. A. Rahim and A. Rivai, "Binary-based tracer of photovoltaic array characteristics," *IET Renewable Power Generation*, vol. 8, pp. 621–628, aug 2014.
- [47] A. A. Willoughby, T. V. Omotosho, and A. P. Aizebeokhai, "A simple resistive load I-V curve tracer for monitoring photovoltaic module characteristics," in *2014 5th International Renewable Energy Congress (IREC)*, pp. 1–6, IEEE, mar 2014.
- [48] P. Sanchis, J. Lopez, A. Ursua, and L. Marroyo, "Electronic Controlled Device for the Analysis and Design of Photovoltaic Systems," *IEEE Power Electronics Letters*, vol. 3, pp. 57–62, jun 2005.
- [49] J. Enrique, E. Duran, Sidrach-de-Cardona M, J. Andujar, M. Bohorquez, and J. Carretero, "A new approach to obtain I-V and P-V curves of photovoltaic modules by using DC-DC converters," in *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005.*, no. 1, pp. 1769–1772, IEEE, 2005.
- [50] E. Duran, J. Enrique, M. Bohorquez, M. Sidrach-de Cardona, J. Carretero, and J. Andujar, "A new application of the coupled-inductors SEPIC converter to obtain I-V and P-V curves of photovoltaic modules," in *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*, pp. 10 pp.–P.10, IEEE, 2005.
- [51] E. Duran, J. Galan, M. Sidrach-de Cardona, and J. Andujar, "A New Application of the Buck-Boost-Derived Converters to Obtain the I-V Curve of Photovoltaic Modules," in *2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, vol. 36, pp. 413–417, IEEE, 2007.
- [52] E. Duran, J. Galan, M. Sidrach-de Cardona, and F. Segura, "An application of interleaved DC-DC converters to obtain I-V characteristic curves of photovoltaic modules," in *2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, pp. 2284–2289, IEEE, nov 2008.
- [53] E. Duran, J. Galan, M. Sidrach-de Cardona, and J. Andujar, "Measuring the I-V curve of PV generators," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 3, pp. 4–14, sep 2009.
- [54] E. Duran, M. Sidrach-de Cardona, J. Galan, and J. Andujar, "Comparative analysis of buck-boost converters used to obtain I-V characteristic curves of photovoltaic modules," in *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 2036–2042, IEEE, jun 2008.
- [55] E. Duran, M. Ferrera, J. Andujar, and M. Mesa, "I-V and P-V curves measuring system for PV modules based on DC-DC converters and portable graphical environment," in *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 3323–3328, IEEE, jul 2010.

- [56] E. Durán, J. M. Andújar, J. M. Enrique, and J. M. Pérez-Oria, “Determination of PV Generator I-V/P-V Characteristic Curves Using a DC-DC Converter Controlled by a Virtual Instrument,” *International Journal of Photoenergy*, vol. 2012, pp. 1–13, 2012.
- [57] C. W. Riley and L. M. Tolbert, “An online autonomous I-V tracer for PV monitoring applications,” in *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, vol. 2015-Septe, pp. 1–5, IEEE, jul 2015.
- [58] I. F. Silva, P. S. Vicente, F. L. Tofoli, and E. M. Vicente, “Portable and low cost photovoltaic curve tracer,” in *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pp. 1–6, IEEE, nov 2017.
- [59] M. Kazerani, “A High-Performance Controllable DC Load,” in *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, no. 1, pp. 1015–1020, IEEE, jun 2007.
- [60] N. N. Lima, L. C. de Freitas, G. M. Buiatti, J. B. Vieira, L. C. G. Freitas, and E. A. A. Coelho, “Low complexity system for real-time determination of current-voltage characteristic of PV modules and strings,” in *2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 2817–2823, IEEE, mar 2013.
- [61] R. Ramaprabha, S. H. Jubair, K. Suhas, and A. Lokesh, “Development of improved curve tracer for photovoltaic system under partial shaded conditions,” in *2014 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2014]*, pp. 585–589, IEEE, mar 2014.
- [62] R. Ramaprabha, S. H. Jubair, K. Suhas, and A. Lokesh, “Design and Implementation of Efficient Curve Tracer for Photovoltaic System under Partial Shaded Conditions,” *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, vol. 7, pp. 140–149, mar 2015.
- [63] T. Khatib, W. Elmenreich, and A. Mohamed, “Simplified I-V Characteristic Tester for Photovoltaic Modules Using a DC-DC Boost Converter,” *Sustainability*, vol. 9, p. 657, apr 2017.
- [64] Y. Kuai and S. Yuvarajan, “An electronic load for testing photovoltaic panels,” *Journal of Power Sources*, vol. 154, pp. 308–313, mar 2006.
- [65] N. Forero, J. Hernández, and G. Gordillo, “Development of a monitoring system for a PV solar plant,” *Energy Conversion and Management*, vol. 47, pp. 2329–2336, sep 2006.

- [66] H. Belmili, S. M. Ait Cheikh, M. Haddadi, and C. Larbes, “Design and development of a data acquisition system for photovoltaic modules characterization,” *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 1484–1492, jul 2010.
- [67] V. Leite and F. Chenlo, “An improved electronic circuit for tracing the IV characteristics of photovoltaic modules and strings,” *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, vol. 1, no. 8, pp. 1224–1228, 2010.
- [68] V. Leite, J. Batista, F. Chenlo, and J. L. Afonso, “Low-Cost Instrument for Tracing Current-Voltage Characteristics of Photovoltaic Modules,” *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, vol. 1, no. 10, pp. 1012–1017, 2012.
- [69] A. Sahbel, N. Hassan, M. M. Abdelhameed, and A. Zekry, “Experimental Performance Characterization of Photovoltaic Modules Using DAQ,” *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 323–332, 2013.
- [70] I. M. Mahmoud, S. O. Abdellatif, T. S. Abdel-salam, A. Bayoumi, A. Sahbel, and O. E. Abdellatif, “Experimental characterization for a PV module using low cost method,” in *2014 International Conference on Engineering and Technology (ICET)*, pp. 1–4, IEEE, apr 2014.
- [71] P. Papageorgas, D. Piromalis, T. Valavanis, S. Kambasis, T. Iliopoulou, and G. Vokas, “A low-cost and fast PV I-V curve tracer based on an open source platform with M2M communication capabilities for preventive monitoring,” *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 423–438, aug 2015.
- [72] M. Taciuc, “An experimental system for measuring the PV panel characteristics curves under real operation conditions,” in *2016 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*, pp. 1–6, IEEE, jun 2016.
- [73] A. A. Willoughby and M. O. Osinowo, “Development of an electronic load I-V curve tracer to investigate the impact of Harmattan aerosol loading on PV module performance in southwest Nigeria,” *Solar Energy*, vol. 166, pp. 171–180, may 2018.
- [74] N. Saini, A. Mudgal, K. Kumar, J. Srivastava, and V. Dutta, “Design of microcontroller based I-V plotter using IGBT electronic load,” in *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEI-CES)*, pp. 1–5, IEEE, jul 2016.
- [75] M. M. Mahmoud, “Transient analysis of a PV power generator charging a capacitor for measurement of the I–V characteristics,” *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 2198–2206, oct 2006.

- [76] J. Muñoz and E. Lorenzo, “Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays,” *Solar Energy*, vol. 80, pp. 1489–1497, nov 2006.
- [77] J. J. Maestro Ibirriaga, X. M. de Mendiluce Pena, A. Opritescu, D. Sera, and R. Teodorescu, “Low-cost, high flexibility I-V curve tracer for photovoltaic modules,” in *2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, no. 2, pp. 1210–1215, IEEE, may 2010.
- [78] Y. Erkaya, P. Moses, and S. Marsillac, “On-site characterization of PV modules using a portable, MOSFET-based capacitive load,” in *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, no. 2, pp. 3119–3122, IEEE, jun 2016.
- [79] F. S. de Oliveira, G. A. Rampinelli, and A. Krenzinger, “Desenvolvimento de um traçador de curvas I-V para arranjos fotovoltaicos,” *Revista Brasileira de Energia Solar*, vol. 7, no. 2, pp. 82–90, 2017.
- [80] V. Leite, J. Batista, F. Chenlo, and J. L. Afonso, “Low-cost I-V tracer for photovoltaic modules and strings,” in *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, pp. 971–976, IEEE, jun 2014.
- [81] Y. Erkaya, I. Flory, and S. X. Marsillac, “Development of a string level I-V curve tracer,” in *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, pp. 3104–3107, IEEE, jun 2014.
- [82] F. Spertino, J. Ahmad, A. Ciocia, P. Di Leo, A. F. Murtaza, and M. Chiaberge, “Capacitor charging method for I–V curve tracer and MPPT in photovoltaic systems,” *Solar Energy*, vol. 119, pp. 461–473, sep 2015.
- [83] A. Benzagmout, T. Martire, G. Beaufils, O. Fruchier, T. Talbert, and D. Gachon, “Measurement of the I(V) characteristics of photovoltaic arrays by the capacitive load method for fault detection,” in *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, pp. 1031–1036, IEEE, feb 2018.
- [84] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. John Wiley & Sons, Inc., 3 ed., 2003.
- [85] STMicroelectronics, “IGBT datasheet tutorial.” Appl. Note AN4544, 2014.
- [86] SEMIKRON, “Gate Resistor – Principles and Applications.” Appl. Note AN-7003, 2007.
- [87] SEMIKRON, “Connection of Gate Drivers to IGBT and Controller.” Appl. Note AN-7002, 2006.
- [88] HT Italia, “I-V400w - SOLAR I-Vw - I-V500w - SOLAR I-Ve.” User manual, 2017.

Apêndice A

Listá de componentes

Tabela A.1: Lista de módulos e circuitos integrados.

Componente	Descrição	Quant.	Preço (\$)
STM32F746G-DISCO	MCU ARM Discovery Kit	1	56,25
IXYH82N120C3	Transistor IGBT 1200V/600A	1	14,08
THS4031CDGNR	Op Amp de alta velocidade	1	5,13
ZXTC2063E6TA	Transistores Bipolares BJT	1	0,62
DDZ15-7	Diodo Zener 15V	1	0,162
SI8662AB-B-IS1	Isolador Digital 6-ch	1	2,02
OPA354AIDBVR	Op Amp de alta velocidade	1	1,54
AD5621AKSZ-500RL7	Conversor digital-analógico 12-bit	1	2,57
MAX11100EUB+	Conversor analógico-digital 16-Bit	2	13,14
INA181A3IDBV	Amplificador de sensor de corrente	1	0,56
RS6-0515D	Conversor DC/DC isolado	1	15,35
RFMM-0505S	Conversor DC/DC isolado	1	1,68
DIO7527CST6	Chave limitadora de corrente	1	0,43
XC6503D331MR-G	Regulador LDO 3.3V	1	0,72
MCP1700T-3302E/TT	Regulador LDO 3.3V	1	0,375
LMT87LPG	sensor de temperatura	1	0,78
ESP-WROOM-02	Módulo WiFi	1	2,7
Subtotal 1			118,107

Tabela A.2: Lista de componentes passivos.

Componente	Descrição	Quant.	Preço (\$)
MPZ2012S601ATD25	núcleo de ferrite 600Ω	1	0,104
GRT21BR61E226ME13L	Capacitor 22uF 25V	3	1,41
GRM21BR61E106MA73L	Capacitor 10uF 25V	4	0,812
CC0805ZRY5V8BB105	Capacitor 1uF 25V	8	0,736
CC0805JPX7R9BB104	Capacitor 100nF 50V	9	0,819
HV733ATTE1004F	Resistor 1 W 1 MΩ	1	0,621
PA2512FKF7W0R005E	Resistor 2 W 5 mΩ	1	0,438
RT0805FRE0747KL	Resistor 47 kΩ	1	0,064
RT0805FRE0733KL	Resistor 33 kΩ	1	0,064
RT0805FRE1322KL	Resistor 22 kΩ	2	0,128
RT0805FRE0710KL	Resistor 10 kΩ	5	0,32
RT0805FRE077K5L	Resistor 7.5 kΩ	1	0,064
RT0805FRE133K3L	Resistor 3.3 kΩ	1	0,064
RT0805FRE072K2L	Resistor 2.2 kΩ	3	0,192
RT0805FRE071KL	Resistor 1 kΩ	1	0,064
RT0805DRE0710RL	Resistor 10 Ω	2	0,128
		Subtotal 2	6,028

Tabela A.3: Lista de conectores e componentes adicionais.

Componente	Descrição	Quant.	Preço (\$)
ZX62M-B-5P(30)	Receptor USB Micro B	1	0,73
Conectores	conectores macho e femea de 2, 6, e 8 vias	11	0,638
Borne Macho	Borne Macho 3 Terminais	2	0,498
Borne Femea	Borne Femea 3 Terminais	2	1,14
Barra De Pinos	Barra De Pinos 1x40 vias	2	0,24
Caixa PVC	Caixa para disjuntores	1	6,91
		Subtotal 3	10,156

Tabela A.4: Lista de preços parciais e preço total (sem impostos).

	Preço (\$)
Subtotal 1	118,107
Subtotal 2	6,028
Subtotal 3	10,156
Taxa de envio	35
Total	169,291

Apêndice B

Layout do circuito impresso

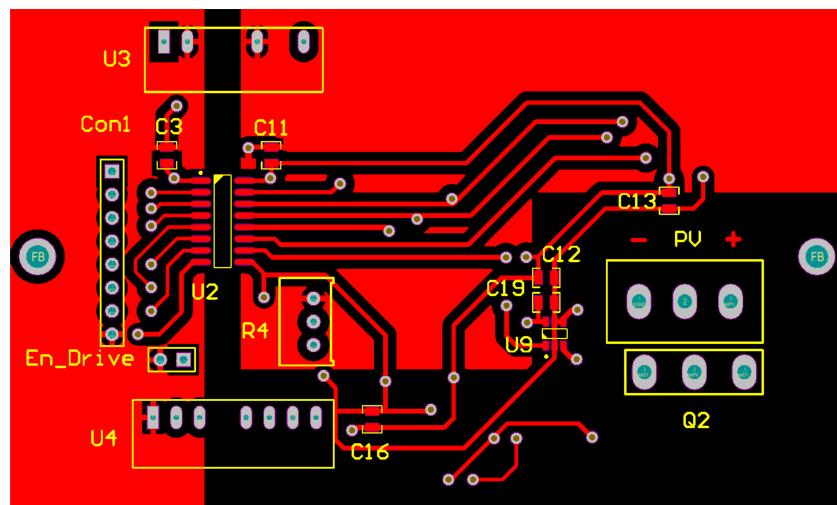


Figura B.1: Capa superior da placa de potência.

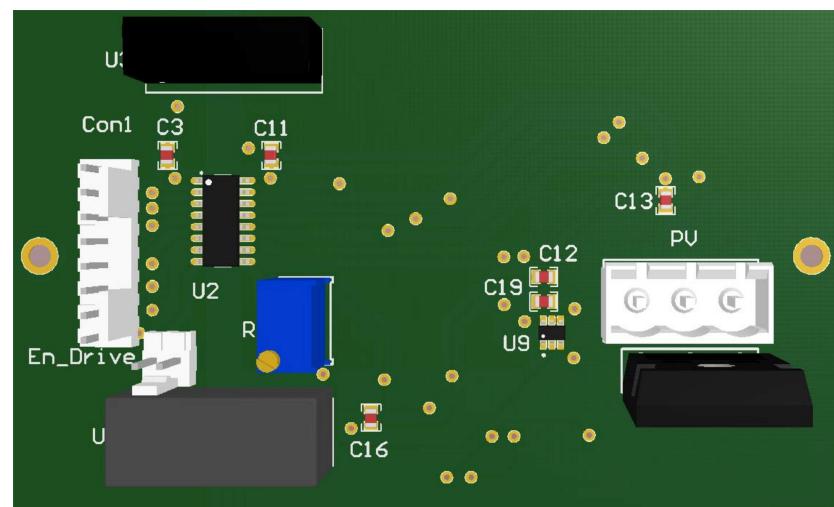


Figura B.2: Vista do lado superior da placa de potência.

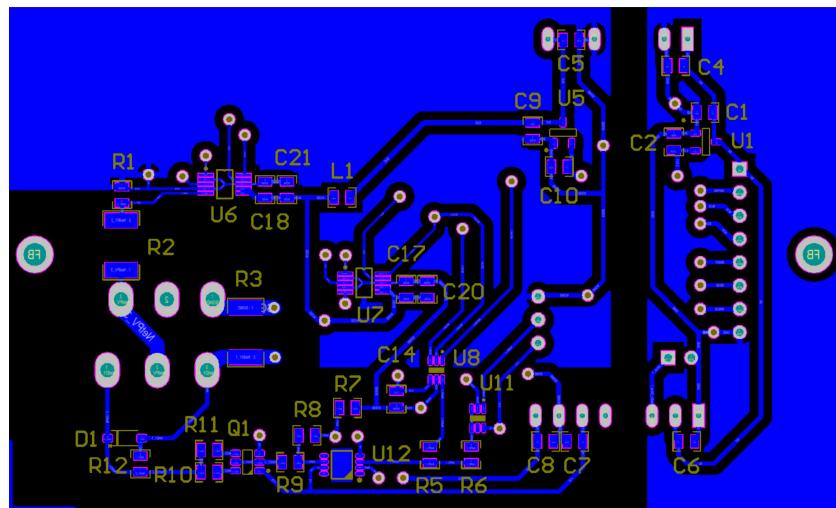


Figura B.3: Capa inferior da placa de potência.

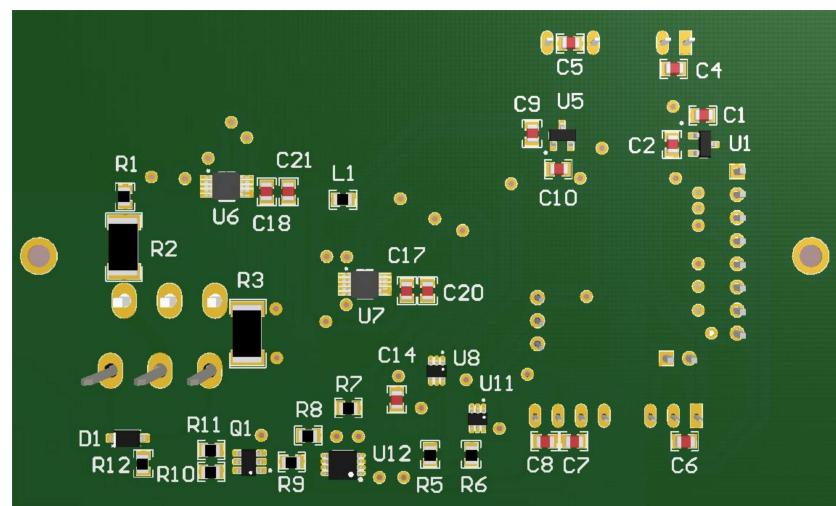


Figura B.4: Vista do lado inferior da placa de potência.

Apêndice C

Principais Algoritmos

Algoritmo C.1: Função principal (código em C)

```
#include "main.h"

uint8_t estado;

int main(void)
{
    Config_Module(); // configuração
    while(1)
    {
        estado = Select_State(); // seleção do status atual
        Change_State(estado); // atualização de status
        Notifications(); // atualização das notificações
        HAL_Delay(100);
    }
}
```

Algoritmo C.2: Função da configuração inicial (código em C)

```
void Config_Module(void)
{
    CPU_CACHE_Enable();
    HAL_Init();
    SystemClock_Config();
    GPIO_Module();
    BSP_QSPI_Init();
    SPI2_Init();
    ADC_Init();
    LCD_Config();
    TIMER3_Init();
    MountMemory();
}
```

Algoritmo C.3: Função de aquisição (código em C)

```

void Adquirir(void)
{
    Show_Status_Aq(0); // indicador de que a aquisicao esta em andamento
    if(Flag_Button) // se o botao de teste for pressionado
    {
        Flag_Button = 0;
        Copy_DataTest(); // se dados de teste sao usados
    }
    else
    {
        REGDrive(ON); // circuito de potencia es energizado
        HAL_Delay(500);
        Get_IV_data(); // obtemos as medicoes de tensao e corrente
        HAL_Delay(200);
        REGDrive(OFF); // o circuito de potencia es desenergizado
    }
    Process_Data();
    SaveData();
    Show_Status_Aq(1); //indicador que terminou a aquisicao
}

```

Algoritmo C.4: Função para obter as medições de corrente e tensão (código em C)

```

void Get_IV_data(void)
{
    static uint16_t k;
    static float powIGBT;

    for(k=0; k<VDACmax; k++) // obtem 4095 medicoes
    {
        DACspi_tx(k);
        Read_ADC_IV();
        Datos_I[k] = Data1;
        Datos_V[k] = Data2;
        powIGBT = (uint16_t)((float)Data1*(float)Data2)/10000;
        //se os valores estiverem dentro dos limites (1kW o 10,1A o 680,4V)
        if((powIGBT > 57654) || (Data1 > 63000) || (Data2 > 63000))
        {
            DACspi_tx(0); // zera a tensao do DAC
            Flag_Alarm = 1;
            break;
        }
    }
    DACspi_tx(0); // zera a tensao do DAC
}

```

Algoritmo C.5: Algoritmo para tratar os dados na OPC (código em Matlab)

```

clear; clc; close all
%> Obtencao de dados
RvarA = 'DadosAdq_1.csv';
MA = csvread(RvarA,1,0);
Data_V = MA(:,1);
Data_I = MA(:,2);
N_dados = length(Data_V);

Data_Va= zeros(1,N_dados);
Data_Ia = zeros(1,N_dados);

for i = 1: N_dados
    Data_Va(i) = Data_V(i);
    Data_Ia(i) = Data_I(i);
end

%> Descartar pontos incongruentes de tensao e corrente
for x = 2: N_dados
    % diferenca superior a 11V entre dados consecutivos
    if (abs(Data_Va(x) - Data_Va(x-1)) > 1000)
        Data_Va(x)= Data_Va(x-1);
    end
    % diferenca superior a 200mA entre dados consecutivos
    if (abs(Data_Ia(x) - Data_Ia(x-1)) > 1000)
        Data_Ia(x)= Data_Ia(x-1);
    end
    % a tensao tem que diminuir
    if Data_Va(x) > Data_Va(x-1)
        Data_Va(x) = Data_Va(x-1);
    end
    % a corrente tem que incrementar
    if Data_Ia(x) < Data_Ia(x-1)
        Data_Ia(x) = Data_Ia(x-1);
    end
end

%> Descartar pontos quando a corrente es cero no começo das medicoes
m = 50; Va_prm = 0; h= m/2 +1; I_zero = 1;
while h < round(N_dados/3)-m/2
    temporal = 0;
    for k = 0: m % procura por grupos de 50 dados
        temporal = temporal + Data_Ia(h-m/2+k);
    end
    if round(temporal/m) < 5 % se a corrente es inferior que 1mA
        I_zero = h; % quantidade de dados descartados
    end

```

```

h = h + m;
end

for h= 1: I_zero
    Va_prm = Va_prm + Data_Va(h);
end
% so obtém um valor de tensão dos dados descartados
Va_prm = round(Va_prm/I_zero);

N_dados = N_dados - I_zero +1; % nova quantidade de pontos úteis
DadosV = zeros(1,N_dados);
DadosI = zeros(1,N_dados);

DadosV(1) = Va_prm;
DadosI(1) = 0;
for h= 2: N_dados
    DadosV(h) = Data_Va(h + I_zero -1);
    DadosI(h) = Data_Ia(h + I_zero -1);
end

%% Filtrar os dados de tensão e corrente
pasoV = 47; % aproximadamente 0.5V de diferença
pasoI = 617; % aproximadamente 100mA de diferença
nd = 300;

n = 0; j = 1;
while j < N_dados
    Var_V = 0; Var_I = 0; kpmd = 0;
    for k =1 : nd
        if (abs(DadosV(j) - DadosV(j+k)) < pasoV) &&
            (abs(DadosI(j) - DadosI(j+k)) < pasoI)
            Var_V = DadosV(j+k) + Var_V;
            Var_I = DadosI(j+k) + Var_I;
            kpmd = kpmd +1;
    end
end

n = n + 1;
if kpmd == 0
    Filt_V(n) = DadosV(j);
    Filt_I(n) = DadosI(j);
    kpmd = 1;
else % promedia os dados com muito pouca variação de corrente ou tensão
    Filt_V(n) = round(Var_V/kpmd);
    Filt_I(n) = round(Var_I/kpmd);
end
j = j + kpmd;

```

```

if (N_dados - j) < nd
    nd = N_dados - j;
end
end

%% Tirar extremo fora da faixa (resultados com pouca precisao de tensao)
for j=1 : n
    if Filt_V(j) > 178 % aproximadamente 1.9 V
        LimV = j;
    end
    if Filt_I(j) < 62 % aproximadamente 10 mA
        LimI = j;
    end
end

N_dados = LimV - LimI + 1; % nova quantidade de dados uteis
Filt_V2 = zeros(1, N_dados);
Filt_I2 = zeros(1, N_dados);

Filt_V2(1)= Filt_V(LimI);
Filt_I2(1)= 0;
for j=2 : N_dados
    Filt_V2(j)= Filt_V(j+LimI-1);
    Filt_I2(j)= Filt_I(j+LimI-1);
end

%% Tomar dados validos e extender ate o ponto de curto circuito
% os dados de corrente e tensao do registrador sao convertidos a (V) e (A)
for i = 1 : length(Filt_V2)
    Filt_V2(i) = Filt_V2(i)*0.0107 + 0.03;
    Filt_I2(i) = Filt_I2(i)*0.0001621 + 0.0015;
end

% extrapolacao linear com os 2 ultimos dados
Vp = 0; Ip = 0; n = 2;
for j=1 : n
    Vp = Vp + Filt_V2(N_dados-j+1);
    Ip = Ip + Filt_I2(N_dados-j+1);
end

Vp = Vp/n; Ip = Ip/n;
r = 0; s = 0;
for j=1 : n
    r = r + (Filt_V2(N_dados-j+1) - Vp)*(Filt_I2(N_dados-j+1) - Ip);
    s = s + pow2(Filt_V2(N_dados-j+1) - Vp);
end

m = r/s;
b = Ip - m*Vp;

n0=round(Filt_V2(N_dados));

```

```

DataF_V = zeros(1, N_dados+n0);
DataF_I = zeros(1, N_dados+n0);

for j=1 : N_dados;
    DataF_V(j) = Filt_V2(j );
    DataF_I(j) = Filt_I2(j );
end
for i = 1: n0
    x = n0-i ;
    DataF_V(N_dados+i) = x;
    DataF_I(N_dados+i) = m*x + b;
end
N_dados = N_dados + n0;

% Graficar a curva obtida
for i = 1 : length(Data_V)
    V_medido(i) = Data_V (i)*0.0107 + 0.03;
    I_medido(i) = Data_I (i)*0.0001621 + 0.0015;
end

hold on
subplot(1,2,1)
plot(V_medido, I_medido , 'b*' ); % dados originais
subplot(1,2,2)
plot(DataF_V, DataF_I, 'r*' ); % dados na OPC

```

Algoritmo C.6: Algoritmo para trasladar os dados para a STC (código em Matlab)

```

clear; clc; close all
% Parametros obtidos do datasheet (Modulo CS6K-270)

```

```

% Condicoes na STC
Voc_stc = 37.9;
Isc_stc = 9.32;
Vmmp_stc = 30.8;
Imp_stc = 8.75;
Pmax_stc = Vmmp_stc*Imp_stc ;
Gstc = 1000; Tstc = 25;
%Condicoes no noct
Voc_noct = 35.3;
Isc_noct = 7.52;
Vmmp_noct = 28.3;
Imp_noct = 7.01;
Pmax_noct = Vmmp_noct*Imp_noct ;
Gnoct = 800; Tanoct = 20; % Tnoct = 43 + 3C

nc = 16.5/100;
Kp = -0.4/100;

```

```

Kv = -0.31/100;
Ki = 0.05/100;
ns = 60;

a = 0.06; % um valor tipico do fator de correcao de irradiancia
% Calculo de Tnoct (dentro da faixa), comecando em Voc, I=0
Tnoct = Tstc + (a*log(Gstc/Gnoct) - Voc_stc/Voc_noct + 1)/Kv;
%% Calculo de los fatores

erro = 0.2/100;
Rs = ns*0.01;
diff_min = erro*Pmax_stc; % diferenca minima no inicio
Imp_sto = Imp_noct*(1+Ki*(Tstc - Tnoct))*Gstc/Gnoct;
while Rs > 0
    Rs = Rs - 0.01; k = 0;
    Pmax_sto = 0;
    while ~((abs(Pmax_stc - Pmax_sto)) < (erro*Pmax_stc)) && (k < 0.1)
        k = k + 0.001;
        Vmp_sto = Vmp_noct + Voc_noct*(Kv*(Tstc - Tnoct) + a*log(Gstc/Gnoct))
        - Rs*(Imp_sto - Imp_noct) - k*Imp_sto*(Tstc - Tnoct);
        Pmax_sto = Vmp_sto*Imp_sto;
    end
    if abs(Pmax_stc - Pmax_sto) < diff_min
        diff_min = abs(Pmax_stc - Pmax_sto);
        Rs_opt = Rs;
        k_opt = k;
    end
end
k = k_opt; Rs = Rs_opt;

%% Carregar dados de simulacao
RvarA = 'Data1000.csv';
MA = csvread(RvarA,1,0);
Data_Vstc = MA(:,2);
Data_Istc = MA(:,3);
RvarA = 'Data870_53.csv';
MA = csvread(RvarA,1,0);
Data_Vop = MA(:,2);
Data_Iop = MA(:,3);
N_data = length(Data_Vstc);
Gop = 870; Top = 53;

for i = 1 : N_data
    Istc_op(i) = Data_Iop(i)*(1 + Ki*(Tstc - Top))*Gstc/Gop;
    Vstc_op(i) = Data_Vop(i) + Data_Vop(N_data)*(Kv*(Tstc - Top)
    + a*log(Gstc/Gop)) - Rs*(Istc_op(i) - Data_Iop(i))
    - k*Istc_op(i)*(Tstc - Top);
end

```

```

end

% extrapolacao linear com os 2 ultimos dados
Vp = 0; Ip = 0; n = 2; N_data = length(Istc_op);
for j=1 : n
    Vp = Vp + Vstc_op(j);
    Ip = Ip + Istc_op(j);
end
Vp = Vp/n; Ip = Ip/n;

r = 0; s = 0;
for j=1 : n
    r = r + (Vstc_op(j) - Vp)*(Istc_op(j) - Ip);
    s = s + pow2(Vstc_op(j) - Vp);
end
m = r/s;
b = Ip - m*Vp;

n0=round(Vstc_op(1));
Data_V = zeros(1, N_data+n0);
Data_I = zeros(1, N_data+n0);
for j=n0+1 : N_data+n0;
    Data_V(j) = Vstc_op(j-n0);
    Data_I(j) = Istc_op(j-n0);
end

for i = 1: n0
    Data_V(i) = i-1;
    Data_I(i) = m*(i-1) + b;
end
N_data = N_data + n0;

%% Graficar a curva obtida e a trasladada para STC
hold on
plot(Data_Vstc, Data_Istc, 'b', 'LineWidth', 2); % dados na STC do datasheet
plot(Data_V, Data_I, 'r—', 'LineWidth', 2); % dados na STC a partir da OPC
plot(Data_Vop, Data_Iop, 'k:', 'LineWidth', 2); % dados originais na OPC

```