

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**



**FERNANDO NASCIMENTO TEIXEIRA DOS SANTOS**

**ESTUDO, SIMULAÇÃO E PROTOTIPAGEM DE  
TRAÇADOR DE CURVAS P-V**

**Ilha Solteira - SP  
2025**

**FERNANDO NASCIMENTO TEIXEIRA DOS SANTOS**

**ESTUDO, SIMULAÇÃO E PROTOTIPAGEM DE  
TRAÇADOR DE CURVAS P-V**

Trabalho de Graduação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Nome do orientador:  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Guilherme de Azevedo e Melo.

Ilha Solteira - SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

S237t Santos, Fernando Nascimento Teixeira dos.  
Traçador de curvas I-V e P-V dedicado a painéis fotovoltaicos / Fernando Nascimento Teixeira dos Santos. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025  
63 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -  
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2025

Orientador: Guilherme de Azevedo e Melo  
Inclui bibliografia

1. Traçador de curvas I-V E P-V. 2. ESP-32. 3. Curvas I-V E P-V.

Elaborada por Raiane da Silva Santos - CRB-8/9999

## **IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA**

Esta pesquisa tem como impacto potencial propor uma alternativa acessível e prática para a caracterização e o monitoramento de módulos fotovoltaicos por meio do desenvolvimento de um traçador de curvas I-V e P-V portátil. Embora o Brasil já possua uma matriz elétrica majoritariamente renovável, sustentada principalmente pela geração hidrelétrica, observa-se a crescente inserção da energia solar fotovoltaica como fonte complementar, voltada à diversificação da matriz e à descentralização da geração.

Apesar de o balanço energético dos sistemas fotovoltaicos que relaciona a energia demandada para sua fabricação e a energia fornecida ao longo da vida útil ser inferior ao de outras fontes renováveis, como a hidrelétrica, melhorias na caracterização e manutenção contribuem para reduzir perdas e maximizar o aproveitamento dos módulos. Nesse sentido, a solução proposta neste trabalho possibilita análises em campo e em tempo real, favorecendo a detecção precoce de falhas, a otimização do desempenho e prolongando a vida útil dos equipamentos através de manutenções preventivas.

Além de aplicações práticas em sistemas de geração, o projeto desenvolvido também pode fortalecer pesquisas acadêmicas e testes laboratoriais uma vez que pode fornecer dados coerentes e de modo acessível, tendo em vista que um traçador de curvas se trata de um equipamento de alto custo. Dessa forma, este estudo colabora para o uso mais racional da energia solar fotovoltaica no Brasil, alinhado à necessidade de eficiência, confiabilidade e diversificação da matriz elétrica nacional.

## **POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH**

This research has the potential to propose an affordable and practical alternative for the characterization and monitoring of photovoltaic modules through the development of a portable I-V and P-V curve tracer. Although Brazil already has a predominantly renewable electricity matrix, mainly supported by hydroelectric generation, there has been a growing integration of photovoltaic solar energy as a complementary source, aimed at diversifying the energy mix and decentralizing generation.

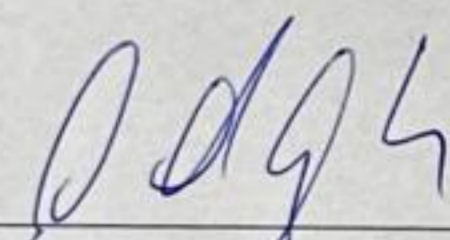
Despite the energy payback of photovoltaic systems – which relates the energy required for their manufacturing to the energy supplied throughout their lifetime – being lower than that of other renewable sources, such as hydropower, improvements in characterization and maintenance contribute to reducing losses and maximizing module performance. In this sense, the solution proposed in this work enables in-field and real-time analysis, facilitating early fault

detection, performance optimization, and extending equipment lifetime through preventive maintenance.

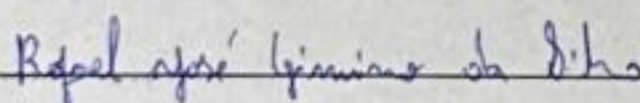
In addition to practical applications in generation systems, the developed project can also strengthen academic research and laboratory testing, as it can provide coherent and accessible data, considering that a curve tracer is typically a high-cost equipment. Thus, this study contributes to the more rational use of photovoltaic solar energy in Brazil, aligned with the need for efficiency, reliability, and diversification of the national electricity matrix.

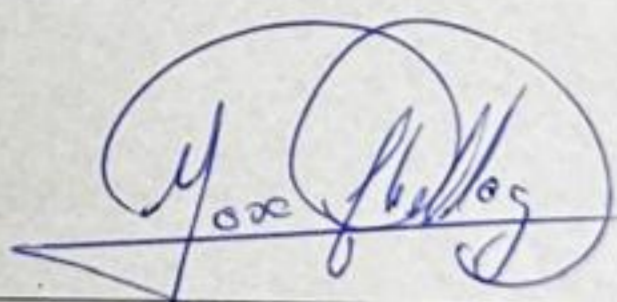
**ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

Aos quinze dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e cinco, o discente *Fernando Nascimento Teixeira dos Santos*, matriculado sob o nº **182054152**, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. *Guilherme de Azevedo e Melo*, o Doutorando *Rafael José Ginuino Da Silva* e o Dr. *José Eduardo Chillogalli Astudillo*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**ESTUDO, SIMULAÇÕES E PROTOTIPAGEM DE TRAÇADOR DE CURVAS P-V**" obtendo a nota 8,0 (oito) e conceito aprovado.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. *Guilherme de Azevedo Melo*  
- orientador -

  
\_\_\_\_\_  
Fernando Nascimento Teixeira dos Santos  
- discente -

  
\_\_\_\_\_  
Doutorando *Rafael José Ginuino Da Silva*  
- Membro da Banca -

  
\_\_\_\_\_  
Dr. *José Eduardo Chillogalli Astudillo*  
- Membro da Banca -

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, que me acompanhou e nunca deixou que nada faltasse durante o desenvolvimento deste trabalho e toda minha vida, aos meus pais, que sempre acreditaram no meu potencial e me ensinaram, com seu exemplo, a perseverar diante das dificuldades. À minha família, pelo apoio incondicional, pelas palavras de incentivo e pela compreensão em cada momento de ausência durante esta jornada.

Aos amigos que caminharam ao meu lado, oferecendo auxílio, força, amizade e companhia nos dias mais intensos. A aqueles que participaram e contribuíram na estruturação do trabalho, contribuindo com o conhecimento e componentes eletrônicos, aos amigos que auxiliaram na programação e a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este sonho se tornasse possível.

Este trabalho é reflexo de cada gesto de apoio, confiança e carinho que recebi ao longo do caminho.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pela força, proteção e sabedoria concedidas ao longo de toda esta caminhada. Sem Sua presença, este trabalho não teria sido possível. Aos meus pais Jose Teixeira dos Santos Filho e Sonia Rosangela do Nascimento Teixeira dos Santos, à minha família, pelo apoio incondicional, pela paciência nos momentos mais desafiadores e por acreditarem nos meus sonhos mesmo quando o caminho parecia difícil. Cada conquista minha também pertence a vocês.

Ao meu orientador Dr.<sup>a</sup> Guilherme de Azevedo e Melo, pela orientação, pela paciência, pela confiança depositada e pelas contribuições essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Sua dedicação e conhecimento foram fundamentais para a conclusão deste projeto.

Aos colegas, que compartilharam conhecimentos, experiências e momentos que ajudaram a moldar minha formação acadêmica e profissional.

Aos amigos que estiveram ao meu lado, oferecendo apoio, motivação e compreensão, especialmente nos dias mais intensos. Cada palavra de incentivo foi indispensável.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Minha gratidão é eterna.

“Não te mandei eu? Esforça-te, e tem bom ânimo; não temas, nem te espantes; porque o Senhor teu Deus é contigo, por onde quer que andares.”

Josué 1:9

## RESUMO

Este trabalho aborda o desenvolvimento de um projeto de traçador de curvas I-V e P-V para a caracterização de módulos fotovoltaicos. O estudo propõe uma metodologia composta por duas etapas principais: a revisão e análise dos conceitos fundamentais de energia solar fotovoltaica e a implementação prática da técnica de traçador de curvas pelo método da carga capacitiva, além de abordar o estudo teórico das cargas resistivas variáveis, cargas capacitivas, conversores CC-CC e cargas eletrônicas. Inicialmente, foram realizados estudos teóricos sobre o efeito fotovoltaico, parâmetros elétricos dos módulos e influência de variáveis como irradiância e temperatura. A proposta apresenta-se como uma solução de baixo custo e alta aplicabilidade. O projeto integra modelagem matemática, simulação computacional e construção de um circuito físico, dividido em comando/chaveamento, medição, banco de capacitores e interface de operação. Inicialmente, foram realizadas simulações utilizando modelos teóricos do módulo fotovoltaico (FV) e o comportamento dinâmico do banco de capacitores durante o regime de carga. A partir dessas análises, foi desenvolvido um software em Python, capaz de calcular e dimensionar capacitores, servindo como suporte e apoio para a fase de testes, ele opera com base nos requisitos do usuário (percentual de carga, tensão e tempo de transição), além de gerar curvas simuladas I-V e P-V a partir dos parâmetros reais de tensão e corrente de um painel fotovoltaico. Para conectar o módulo FV ao circuito do traçador, foi utilizado um optoacoplador, isolando o comando, um transistor para amplificação de corrente e um relé de 12 V para o chaveamento do banco de capacitores. No estágio de medição, empregou-se o sensor INA-219 para leitura de corrente e tensão, mas suas limitações de faixa restringiram o uso com módulos FV. Para contornar essas deficiências, adicionou-se um divisor de tensão, empregando um divisor resistivo de tensão e capacitores em paralelo para divisão de corrente, ajustando o fundo de escala do sensor para as características necessárias para seu emprego em módulos FV comerciais. Uma IHM acessada via Wi-Fi, hospedada pelo próprio controlador (ESP-32), permite ao usuário configurar parâmetros de ensaio, visualizar gráficos e monitorar o processo em tempo real. Os resultados obtidos demonstram a viabilidade do uso do método da carga capacitiva, volume elevado e dificuldade de escalabilidade.

**Palavras-chave:** Energia Solar Fotovoltaica; Curva I-V; Curva P-V; Traçador de Curvas; ESP-32, fotovoltaico; Python; INA-219.

## ABSTRACT

This work addresses the development of an I-V and P-V curve tracer project for the characterization of photovoltaic modules. The study proposes a methodology consisting of two main stages: the review and analysis of fundamental photovoltaic solar energy concepts and the practical implementation of the curve tracer technique using the capacitive load method, in addition to addressing the theoretical study of variable resistive loads, capacitive loads, DC-DC converters, and electronic loads. Initially, theoretical studies were conducted on the photovoltaic effect, electrical parameters of modules, and the influence of variables such as irradiance and temperature. The proposal presents itself as a low-cost, high-applicability solution. The project integrates mathematical modeling, computer simulation, and the construction of a physical circuit, divided into control/switching, measurement, capacitor bank, and operational interface. Initially, simulations were performed using theoretical models of the photovoltaic (PV) module and the dynamic behavior of the capacitor bank during the charging regime. From these analyses, a Python software was developed, capable of calculating and sizing capacitors, serving as support for the testing phase. It operates based on user requirements (charge percentage, voltage, and transition time), and can also generate simulated I-V and P-V curves from the real voltage and current parameters of a photovoltaic panel. To connect the PV module to the tracer circuit, an optocoupler was used to isolate the control signal, a transistor for current amplification, and a 12 V relay for switching the capacitor bank. In the measurement stage, the INA-219 sensor was employed for reading current and voltage, but its range limitations restricted its use with PV modules. To overcome these deficiencies, a voltage divider was added, employing a resistive voltage divider and parallel capacitors for current division, thereby adjusting the sensor's full scale to the characteristics required for its application with commercial PV modules. A Wi-Fi-accessible HMI, hosted by the controller itself (ESP-32), allows the user to configure test parameters, view graphs, and monitor the process in real time. The obtained results demonstrate the viability of using the capacitive load method, but also highlight challenges related to the large physical volume of capacitors and the difficulty of scalability.

**Keywords:** Photovoltaic Solar Energy; I-V Curve; P-V Curve; Curve Tracer; ESP32; Photovoltaics; Python; INA219.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Representação de uma junção PN.....                                                                                                                            | 22 |
| Figura 2: Representação esquemática dos componentes de um módulo fotovoltaico. ....                                                                                      | 23 |
| Figura 3: Módulo Fotovoltaico Monocristalino de 380W.....                                                                                                                | 23 |
| Figura 4: Modelo elétrico equivalente do FV.....                                                                                                                         | 25 |
| Figura 5: Curva característica e curva de potência de um módulo.....                                                                                                     | 27 |
| Figura 6: Curvas características para diferentes valores de irradiância.....                                                                                             | 28 |
| Figura 7: Curva características medidas sob diferentes temperaturas.....                                                                                                 | 29 |
| Figura 8: Variação da curva P-V em função da temperatura em um módulo FV.....                                                                                            | 29 |
| Figura 9: Esquema geral de um traçador de curva I-V.....                                                                                                                 | 30 |
| Figura 10: Curva simulada a partir de uma resistência variável como carga, considerando uma boa dispersão de pontos.....                                                 | 31 |
| Figura 11: Configuração das resistências: a) seleção em paralelo; b) seleção em série.....                                                                               | 32 |
| Figura 12: Curvas de corrente e tensão no capacitor inicialmente descarregado, utilizando um módulo FV como fonte.....                                                   | 32 |
| Figura 13: Configuração de carga capacitiva: a) com resistência para a descarga; b) com uma fonte de tensão para pré-carrega do capacitor e resistência de descarga..... | 33 |
| Figura 14: Carga resistiva fixa através de um conversor CC-CC.....                                                                                                       | 34 |
| Figura 15: Principais tipos de cargas eletrônicas.....                                                                                                                   | 34 |
| Figura 16: Circuito equivalente para o primeiro intervalo. ....                                                                                                          | 35 |
| Figura 17: Circuito equivalente para o segundo intervalo.....                                                                                                            | 36 |
| Figura 18: Carregamento do Capacitor – Tensão e Corrente. ....                                                                                                           | 38 |
| Figura 19: Curva I-V do arranjo FV.....                                                                                                                                  | 38 |
| Figura 20: Curva P-V do arranjo FV.....                                                                                                                                  | 39 |
| Figura 21: Circuito do traçador de curvas. ....                                                                                                                          | 40 |
| Figura 22: Sinal de comando para o circuito do traçador de curvas.....                                                                                                   | 40 |
| Figura 23: Curvas de Tensão e Corrente de carga e descarga no capacitor. <b>Erro! Indicador não definido.</b>                                                            |    |
| Figura 24: Curva I-V (PSIM). ....                                                                                                                                        | 41 |
| Figura 25: Curva P-V (PSIM). ....                                                                                                                                        | 41 |
| Figura 26: Circuito do Traçador de Curvas I-V e P-V .....                                                                                                                | 44 |
| Figura 27: Parâmetros Configuráveis da Interface.....                                                                                                                    | 46 |
| Figura 28: Multiplicadores da Interface. ....                                                                                                                            | 47 |
| Figura 29: Controle de Pontos.....                                                                                                                                       | 48 |

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 30:Sistema de Média Móvel.....                             | 49 |
| Figura 32: Tabela de Dados Dinâmicos. ....                        | 52 |
| Figura 33: Software de apoio (Simulação IV e PV).....             | 53 |
| Figura 34: Software de apoio (Dimensionamento do Capacitor).....  | 55 |
| Figura 35: Testes do circuito elaborado. ....                     | 56 |
| Figura 36: Dados gráficos da coleta de número 1 .....             | 57 |
| Figura 37 Dados gráficos da coleta de número 4 .....              | 57 |
| Figura 38: Curva I-V do datasheet da placa. ....                  | 59 |
| Figura 39: Sobreposição dos dados coletados com o datasheet. .... | 59 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Dados da placa SW245-POLY em condições ideais..... | 58 |
| Tabela 2: Dados coletados experimentalmente. ....            | 58 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

FV — Fotovoltaico(a)

CC — Corrente Contínua

CC-CC — Conversor de Corrente Contínua para Corrente Contínua

AC — Corrente Alternada

PN — Junção tipo P-N

I-V — Corrente versus Tensão (Current-Voltage)

P-V — Potência versus Tensão (Power-Voltage)

IHM — Interface Homem-Máquina

IGBT — Transistor Bipolar de Porta Isolada (Insulated Gate Bipolar Transistor)

MOSFET — Transistor de Efeito de Campo de Óxido Metálico (Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor)

TBJ — Transistor Bipolar de Junção

## LISTA DE SÍMBOLOS

|            |                                                                    |
|------------|--------------------------------------------------------------------|
| $I$        | – Corrente elétrica (A)                                            |
| $V$        | – Tensão elétrica (V)                                              |
| $P$        | – Potência elétrica (W)                                            |
| $C$        | – Capacitância (F)                                                 |
| $V_C$      | – Tensão no capacitor (V)                                          |
| $I_C$      | – Corrente no capacitor (A)                                        |
| $I_{sc}$   | — Corrente de curto-circuito (A)                                   |
| $V_{oc}$   | — Tensão de circuito aberto (V)                                    |
| $P_{max}$  | — Potência máxima (W)                                              |
| $V_{mp}$   | — Tensão no ponto de potência máxima (V)                           |
| $I_{mp}$   | — Corrente no ponto de potência máxima (A)                         |
| $R_S$      | — Resistência Série ( $\Omega$ )                                   |
| $R_{sh}$   | — Resistência Shunt ( $\Omega$ )                                   |
| $q$        | — Carga elementar do elétron ( $1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$ ) |
| $k$        | — Constante de Boltzmann ( $1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ )   |
| $T$        | — Temperatura (K)                                                  |
| $n$        | — Fator de idealidade do diodo                                     |
| $I_0$      | — Corrente de saturação reversa do diodo (A)                       |
| $I_d$      | — Corrente através do diodo (A)                                    |
| $I_{sh}$   | — Corrente de fuga pela resistência shunt (A)                      |
| $G$        | — Irradiância solar ( $\text{W/m}^2$ )                             |
| $\Delta t$ | — Intervalo de tempo (s)                                           |

## SUMÁRIO

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>                                                | <b>19</b> |
| <b>1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                                   | 19        |
| 1.1.1 Energia Solar Fotovoltaica.                                  | 20        |
| 1.1.2 Célula Solar Fotovoltaica                                    | 21        |
| 1.1.3 Efeito Fotovoltaico                                          | 21        |
| 1.1.4 Módulo Fotovoltaico                                          | 22        |
| <b>1.2 ORGANIZAÇÃO TEXTUAL</b>                                     | 24        |
| <b>2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>                                      | <b>24</b> |
| <b>2.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS</b>                                  | 26        |
| <b>2.2 DESEMPENHO DE UMA FONTE FV</b>                              | 27        |
| 2.2.1 Variação da Irradiância Sobre a Curva Característica         | 28        |
| 2.2.2 Variação da Temperatura Sobre a Curva Característica         | 28        |
| <b>2.3 TRAÇADORES DE CURVA I-V E P-V</b>                           | 30        |
| <b>2.4 PRINCIPAIS MÉTODOS PARA OBTER AS CURVAS CARACTERÍSTICAS</b> | 31        |
| 2.4.1 Carga Resistiva Variável                                     | 31        |
| 2.4.2 Carga Capacitiva                                             | 32        |
| 2.4.3 Conversor CC-CC com Carga Resistiva                          | 33        |
| 2.4.4 Carga Eletrônica                                             | 34        |
| <b>3 DESENVOLVIMENTO DA MÉTODOLOGIA DA CARGA CAPACITIVA</b>        | <b>34</b> |
| <b>3.1 DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO</b>                              | 35        |
| 3.1.1 Simulação de Acordo com a Descrição Matemática               | 37        |
| <b>3.2 SIMULAÇÃO NO PSIM</b>                                       | 39        |
| <b>4 DESENVOLVIMENTO DA ARQUITETURA DO SISTEMA</b>                 | <b>41</b> |
| <b>4.1 IDEALIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO PROJETO</b>                   | 42        |
| 4.1.1 Especificações Técnicas                                      | 42        |
| <b>4.2 ESTRUTURA ELÉTRICA</b>                                      | 43        |
| 4.2.1 Bloco de Comando                                             | 43        |
| 4.2.2 Bloco de Isolamento e Amplificação                           | 43        |
| 4.2.3 Bloco de Medição                                             | 44        |

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.3 FUNCIONALIDADES, MECANISMOS E MISCELÂNEOS</b>        | <b>45</b> |
| 4.3.1 Mecanismo de Aquisição em Tempo Real                  | 45        |
| 4.3.2 Parâmetros Configuráveis                              | 45        |
| 4.3.3 Sistema de Multiplicadores                            | 46        |
| 4.3.4 Controle de Qualidade                                 | 47        |
| 4.3.5 Sistema de Média Móvel                                | 48        |
| 4.3.6 Algoritmo para Detecção de Estabilidade               | 49        |
| 4.2.6 Estados de Operação                                   | 49        |
| 4.3.7 Exportação de Dados                                   | 50        |
| <b>4.4 INTERFACE WEB E VISUAL</b>                           | <b>50</b> |
| 4.4.1 Sistema de Gráficos Interativos                       | 50        |
| 4.4.2 Tabela de Dados Dinâmica                              | 51        |
| <b>4.5 SOFTWARE DE APOIO</b>                                | <b>52</b> |
| 4.5.1 Software de Apoio Para Dimensionamento de Capacitores | 53        |
| <b>5 RESULTADOS</b>                                         | <b>55</b> |
| <b>6 CONCLUSÃO</b>                                          | <b>60</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b>                                          | <b>62</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda por fontes de energia renovável tem impulsionado o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias fotovoltaicas em diferentes contextos, desde grandes usinas solares até sistemas de geração distribuída. Os módulos fotovoltaicos são os principais dispositivos responsáveis pela conversão da energia solar em energia elétrica, e seu desempenho está diretamente relacionado à eficiência e à confiabilidade dos sistemas em que são empregados. Nesse cenário, a caracterização elétrica por meio das curvas corrente versus tensão (I-V) e potência versus tensão (P-V) torna-se essencial para avaliar a condição operacional dos módulos, identificar falhas e otimizar a produção de energia. (Villalva,2012)

Essas curvas permitem extrair parâmetros-chave como a corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ), a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e, principalmente, o ponto de máxima potência (Pmax). A forma da curva I-V revela, por exemplo, a presença de degradação de células, falhas em diodos de bypass ou sombreamentos parciais. Já a curva P-V identifica diretamente a potência real gerada, possibilitando o cálculo da eficiência do módulo e a comparação com sua especificação nominal. Dessa forma, sendo uma ferramenta indispensável para manutenção preditiva, garantia de qualidade e validação de desempenho. (Campos, 2019) (Villalva,2012)

A análise das curvas I-V e P-V permite compreender como variáveis ambientais, como irradiância e temperatura, influenciam no comportamento elétrico dos módulos, possibilitando comparações com parâmetros fornecidos em fábrica e assegurando maior confiabilidade no processo de geração. Entretanto, equipamentos comerciais destinados a essa finalidade geralmente apresentam custo elevado, o que limita seu acesso em aplicações de menor porte, além de restringir o desenvolvimento de soluções portáteis voltadas a medições em campo. (Gasparin, 2009)

Nesse contexto, diversas metodologias têm sido estudadas para o traçado das curvas características de módulos fotovoltaicos, como cargas resistivas variáveis, cargas capacitivas, conversores CC-CC e cargas eletrônicas. Cada abordagem apresenta vantagens e limitações quanto à precisão, ao custo e à aplicabilidade em campo, sendo o método da carga capacitiva uma alternativa promissora por sua simplicidade e viabilidade de implementação. (Bühler, 2011)

### 1.1 Revisão Bibliográfica

A caracterização elétrica de módulos fotovoltaicos por meio das curvas I-V e P-V é uma ferramenta amplamente utilizada para avaliar o desempenho e identificar falhas em sistemas

solares, permitindo diagnósticos mais precisos e intervenções corretivas direcionadas. Diversos estudos têm explorado métodos e tecnologias para o traçado dessas curvas, visando maior precisão, redução de custos e portabilidade dos equipamentos.

Entre as abordagens mais estudadas, destacam-se o uso de cargas resistivas variáveis, cargas capacitivas, conversores CC-CC e cargas eletrônicas, cada uma apresentando vantagens e limitações conforme a aplicação. Pesquisas como as de Gasparin (2009) e Campos (2019) demonstram a relevância da automação no processo de medição, ressaltando que a aquisição simultânea de tensão, corrente e dados ambientais, como irradiância e temperatura, são essenciais para a correlação com condições de teste laboratoriais.

Trabalhos como os de Oliveira (2015) e Araújo et al. (2020) aprofundam o estudo dos modelos elétricos equivalentes dos módulos fotovoltaicos, permitindo simulações mais precisas e a interpretação detalhada dos parâmetros elétricos extraídos das curvas. Além disso, estudos de Saldanha et al. (2019) e Villalva (2012) reforçam a importância da análise do impacto de variáveis ambientais, evidenciando como a irradiância e a temperatura influenciam diretamente a potência máxima gerada.

### **1.1.1 Energia Solar Fotovoltaica.**

A Energia Solar Fotovoltaica pode ser compreendida como a transformação da energia luminosa proveniente do Sol em energia elétrica, este fenômeno por sua vez teve sua primeira descrição em 1839 por Edmond Becquerel, tal qual observou uma tensão elétrica resultante da ação da luz sobre um eletrodo metálico submerso em uma solução química. Os estudos sobre este fenômeno continuaram a se desdobrar no decorrer dos anos, até que em 1905 o efeito fotoelétrico foi explicado por Albert Einstein. Porém o destaque deste fenômeno se tornou notório no período da guerra fria. Esta tecnologia, apesar de cara, se demonstrava necessária para suprir as necessidades energéticas das missões espaciais, visto que se desdobrava a corrida espacial neste período (Villalva,2012).

Durante a década de 70, com a crise do petróleo, foram investidos recursos em fontes alternativas de energia, entretanto surgiam desafios, uma vez que a implementação em solo era completamente diferente da utilizada em missões espaciais. Durante o desenvolvimento desta tecnologia ainda neste período, foram criadas as células de silício policristalino, economicamente mais viável, entretanto com menor eficiência quando comparadas as de silício monocristalino (Villalva,2012).

Atualmente existem diversos materiais semicondutores para a fabricação das células fotovoltaicas. O silício cristalino e o silício amorfo hidrogenado são os mais comumente utilizados. O silício cristalino tem seus átomos ocupando posições regulares no espaço, formando uma rede perfeitamente periódica. Já o segundo caso possui imperfeições, ou seja, a estrutura não é respeitada, o que pode levar a uma compensação da estrutura com átomos de hidrogênio. A partir do silício amorfo hidrogenado, é possível a confecção de filmes muito finos, que são suficientes para a produção de células solares, estas por sua vez utilizam de um menor número de recursos em sua produção, logo, sendo mais acessíveis, além de possuírem vastas aplicações, no entanto, estes benefícios vem ao custo de uma menor vida útil junto a um rendimento inferior (Villalva, 2012).

### **1.1.2 Célula Solar Fotovoltaica**

As células fotovoltaicas são as responsáveis pela conversão da luz solar em eletricidade através do efeito fotoelétrico. Em termos de rendimento, as primeiras células fotovoltaicas construídas possuíam um rendimento próximo a 2%. No final da década de 80, foi atingido um rendimento que podia superar a marca 20% para células de silício e de arseneto de gálio (Braga, 2008) (Bühler, 2011).

Na busca por células de maior eficiência, voltaram-se os estudos para células de multijunção (células formadas por duas ou mais sub células de materiais diferentes) e em dezembro de 2006 o departamento de Energia Renováveis dos estados Unidos anunciou ter obtido uma eficiência de 40.7%. (Bühler, 2011).

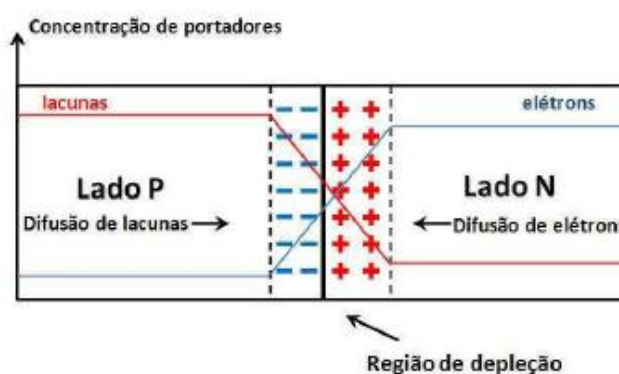
### **1.1.3 Efeito Fotovoltaico**

O efeito fotovoltaico é o fenômeno responsável pela conversão direta de energia solar em energia elétrica, este fenômeno ocorre em dispositivos semicondutores chamados de células solares fotovoltaicas (células FV). A célula FV pode ser interpretada como um diodo de grande área que possui suas junções PN expostas a luz solar. O silício é um material do tipo tetravalente, e faz 4 ligações covalentes para formar sua estrutura cristalina. Um material tipo N é obtido ao se contaminar uma amostra de silício com átomos de um elemento pentavalente, assim ocasionando a sobra de um elétron para cada ligação desses elementos com a estrutura cristalina do silício. Já o material P é obtido com a adição de átomos de um elemento trivalente na estrutura cristalina do silício, o que ocasiona a falta de um elétron, isto acaba por gerar um excesso de lacunas que tem o comportamento de portadores de carga positiva (Oliveira, 2015).

Em um diodo sem polarização, haverá a passagem de elétrons do lado N para o lado P e lacunas do lado P para o lado N, a região dessa junção é denominada de “zona de depleção”, onde é estabelecido o campo elétrico até o limite em que seja inibida a difusão dos portadores de carga de uma região para outra (Oliveira,2015).

O fenômeno fotoelétrico ocorre quando a zona de depleção é exposta a luz (fótons com energia maior do que o gap), ocorre a geração de pares elétron-lacunas que caso forem acelerados (gerados em uma região de campo elétrico não nulo), é dada a origem a uma corrente elétrica através da junção, e por sua vez uma diferença de potencial entre as superfícies da camada P e N. A Figura 1 mostra a representação de uma junção PN (Bühler, 2011).

Figura 1: Representação de uma junção PN.



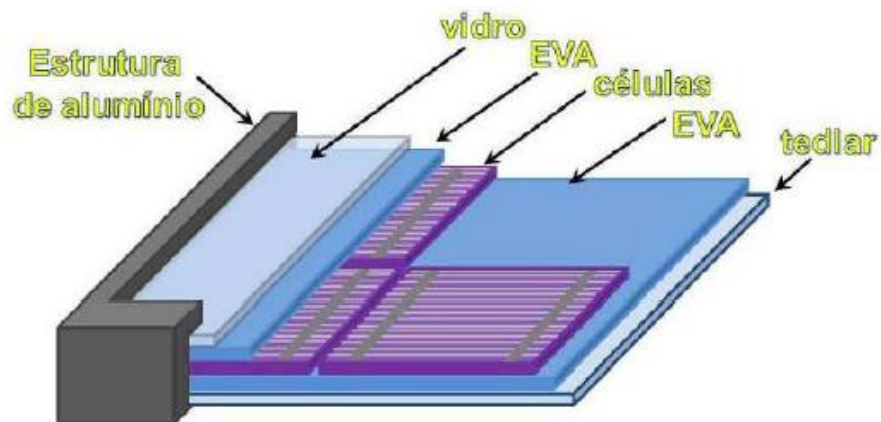
Fonte: Adaptado (Bühler, 2011).

### 1.1.4 Módulo Fotovoltaico

Para que as células fotovoltaicas sejam utilizadas, as mesmas devem ser associadas em série e encapsuladas de modo a formar uma unidade básica de geração de energia elétrica, esta unidade se denomina de módulo fotovoltaico. Este agrupamento se justifica devido ao fato de que a tensão gerada por uma única célula FV é incompatível com a grande maioria dos equipamentos elétricos. A soma das tensões de circuito aberto de célula, é igual a tensão de circuito aberto do módulo e a corrente de curto circuito igual a corrente da célula (Oliveira ,2015).

Módulos comerciais possuem uma estrutura que tem a proposta de protegê-los, essa estrutura pode ser visualizada na Figura 2, onde é ilustrada a esquemática de componentes de um módulo fotovoltaico (Bühler, 2011).

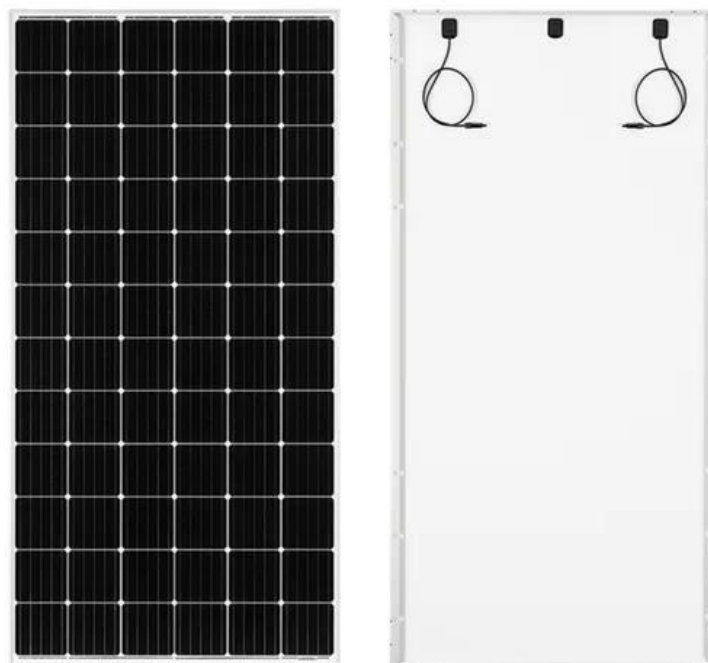
Figura 2: Representação esquemática dos componentes de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Bühler, 2011

A Figura 3 representam a parte frontal e traseira de um Módulo FV comercial Monocristalino de 380W Intelbras modelo EMST 380M e 72 células e sua parte posterior.

Figura 3: Módulo Fotovoltaico Monocristalino de 380W.



Fonte: Adaptado de (ITELBRAS, 2025).

## 1.2 Organização Textual

A estrutura deste Trabalho de Graduação foi organizada em seis capítulos principais, além das referências bibliográficas:

Capítulo 1 – Introdução: Apresenta a contextualização do tema, destacando a relevância do estudo sobre traçadores de curvas fotovoltaicos, além da motivação, objetivos gerais e específicos, organização textual e revisão bibliográfica, que reúne os principais conceitos e pesquisas relacionadas.

Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos: Aborda a base conceitual necessária para o desenvolvimento do trabalho, incluindo a descrição das curvas características I-V e P-V, a influência de variáveis como irradiância e temperatura, os diferentes métodos de traçado de curvas e a análise de topologias aplicadas a traçadores de curvas.

Capítulo 3 – Desenvolvimento da Metodologia da Carga Capacitiva: Detalha a metodologia escolhida para a pesquisa, com a formulação matemática do método da carga capacitiva, simulações baseadas nessa modelagem e a validação no software PSIM, contemplando a análise dos resultados obtidos.

Capítulo 4 – Desenvolvimento da Arquitetura do Sistema: Apresenta o projeto prático, descrevendo a idealização, estruturação, funcionalidades, interface web e software de apoio, bem como a estrutura elétrica do protótipo desenvolvido, incluindo seus componentes e soluções implementadas.

Capítulo 5 – Resultados: Expõe os dados experimentais obtidos com o protótipo, comparando-os com informações de fabricante e analisando a viabilidade e os limites da solução proposta.

Capítulo 6 – Conclusão: Apresenta as considerações finais sobre o trabalho, destacando as principais contribuições, as limitações encontradas e as sugestões para estudos futuros.

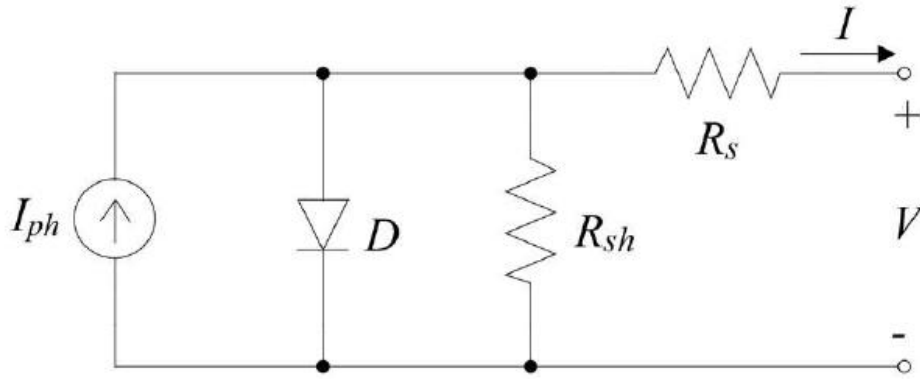
Referências: Reúne todas as obras, artigos e materiais consultados para fundamentar e desenvolver a pesquisa.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para fins de estudos e simulações se torna interessante o entendimento do circuito equivalente do módulo FV que pode ser visualizado na Figura 4, este modelo equivalente possui uma fonte de corrente  $I_{ph}$  que depende da irradiação a qual a célula é submetida, sendo a irradiação compreendida como a quantidade de energia solar em uma dada área, sua unidade é dada em Watts por metro quadrado ( $W/m^2$ ). As resistências série e em paralelo  $R_s$  (resistência

do material, somada com as resistências de contatos, interconexões, contatos metálicos e o semicondutor) e  $R_{sh}$  (resistência Shunt, que é derivada de fugas de pequenas correntes que fluem internamente ao painel) (Araújo et al, 2020).

Figura 4: Modelo elétrico equivalente do FV.



Fonte: Araújo et al, 2020.

A partir da Lei de Kirchhoff, aplicada no circuito equivalente e a partir da Equação (1), onde  $I_d$  representa a corrente do diodo  $D$  e  $I_{Rsh}$  a corrente da resistência Shunt, sendo representadas pela Equação (2) e Equação (3) (Araújo et al, 2020).

$$I = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \quad (1)$$

$$I_d = I_0 \left[ \exp \left( q \cdot \frac{V_d}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

$$I_{Rsh} = V_d / R_{sh} \quad (3)$$

Onde,  $I_0$  representa a corrente de saturação reversa do diodo,  $n$  representa a constante de idealidade do diodo,  $q$  a carga do elétron ( $1,602 \cdot 10^{-19} C$ ),  $T$  representa a temperatura da célula FV expressa em Kelvin,  $k$  representa a constante de Boltzmann ( $1,38065 \cdot 10^{-23} J/K$ ) e  $V_d$  representa a tensão no diodo que respeita a Equação (4) (Araújo et al, 2020).

$$V_d = V + I \cdot R_s \quad (4)$$

Substituindo a Equação (4) nas Equações (2) e (3) e por fim substituindo o resultado em (1), é obtido a corrente da célula FV, sendo representada pela Equação (5) (Araújo et al, 2020).

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[ \exp \left( q \cdot \frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (5)$$

Para um módulo fotovoltaico com  $N_s$  células em série, em condições ideais (supondo todas idênticas e sob o mesmo nível de irradiância), a corrente do módulo será dada pela Equação (6). Onde as resistências série e Shunt serão  $R'_s = R_s \cdot N_s$  e  $R'_{sh} = R_{sh} \cdot N_s$  (Araújo et al, 2020).

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[ \exp \left( q \cdot \frac{V + I \cdot R'_s}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R'_s}{R'_{sh}} \quad (6)$$

## 2.1 Curvas Características

A função das curvas características I-V e P-V é dupla, podendo determinar a potência máxima gerada pelo módulo e diagnosticar possíveis falhas operacionais. A partir da análise de seu formato e dos parâmetros extraídos (como  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  e o ponto de máxima potência), é possível identificar problemas como células danificadas, sujeira acentuada, sombreamento parcial, diodos de bypass em curto-circuito, entre outras anomalias.

Todo módulo passa por teste em laboratório, sendo padronizados, segue que o padrão de testes é 1000 W/m<sup>2</sup> e 25°C (Saldanha et al, 2019).

Quando em campo, é levado um medidor de irradiância e um medidor de temperatura, assim correlacionando com os valores de laboratório e possibilitando a obtenção da curva I-V. Para o teste em campo existem pré-requisitos (Saldanha et al, 2019):

- Irradiância acima de 700 watts/m<sup>2</sup>;
- Céu ensolarado, sem presença de fumaça;
- Tempo e condições aceitáveis para teste em campo.

O módulo FV possui tanto sua tensão como corrente variáveis, uma vez que estes parâmetros dependem da carga ou equipamento conectado aos terminais do módulo FV. Logo para que suas características possam ser aferidas pode ser traçada a curva características I-V (corrente versus tensão), uma vez que esta mostra todos os pontos de operação e representa o comportamento do módulo FV sob determinadas condições de temperatura e irradiância. Ainda assim, partindo da coleta dos dados, pode ser obtido a curva característica P-V (potência versus tensão), que tem como informação fundamental a potência máxima fornecida nas condições aplicadas. (Campos, 2019).

A Figura 5 mostra as curvas característica I-V e P-V, onde:

$I_{SC}$ : corrente de curto-circuito (corrente máxima gerada pelo módulo FV quando a tensão entre seus terminais é zero).

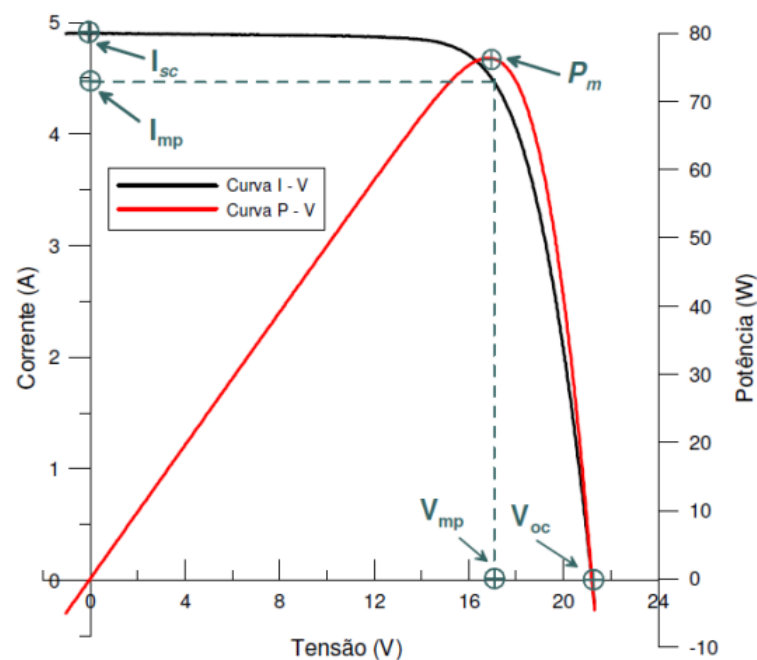
$V_{OC}$ : tensão de circuito aberto (tensão máxima gerada pelo módulo FV sem corrente através dele).

$P_{max}$ : potência máxima.

$V_{mp}$ : tensão de potência máxima (valor de tensão quando a potência é máxima).

$I_{mp}$ : corrente de potência máxima (valor de corrente quando a potência gerada é máxima).

Figura 5: Curva característica e curva de potência de um módulo.



Fonte: Gasparin, 2009.

Essas curvas apresentam uma trajetória típica, onde o valor de corrente acaba por decrescer conforme o aumento da tensão, e cada valor de tensão possui um único valor de corrente, considerando os outros parâmetros constantes (Campos, 2019).

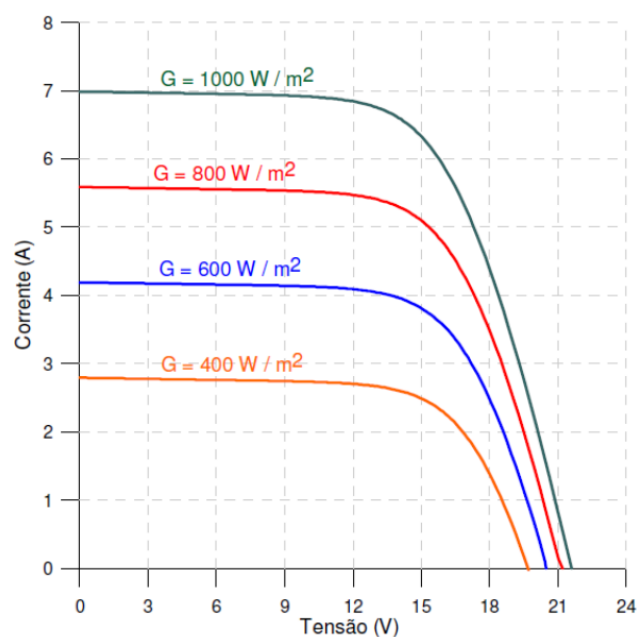
## 2.2 Desempenho de uma Fonte FV

A corrente gerada por um módulo FV sofre a influência de vários parâmetros, em destaque para fatores ambientais como a irradiância e temperatura, ou fatores da própria placa, como as resistências parasitas.

### 2.2.1 Variação da Irradiância Sobre a Curva Característica

A variação da irradiância acaba por influenciar tanto a corrente como a tensão de um gerador FV. Supondo um cenário controlado onde a temperatura se mantém constante, o efeito a irradiância segue uma relação proporcional sobre a corrente e logarítmica para a tensão. A Figura 6 mostra as diferentes curvas características para um módulo FV com temperatura constante e diferentes valores de irradiância.

Figura 6: Curvas características para diferentes valores de irradiância.

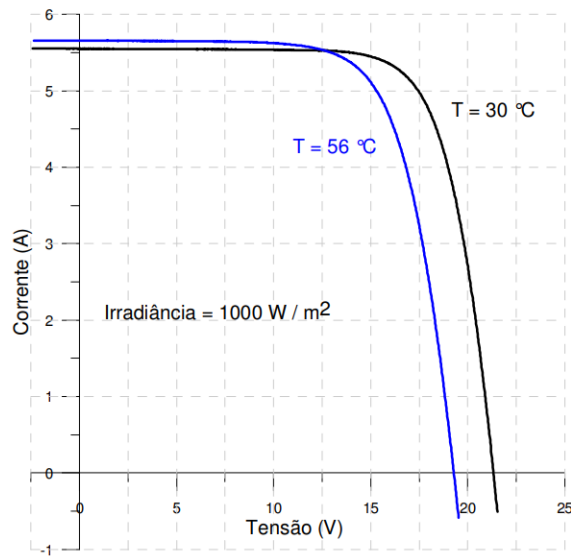


Fonte: Gasparin, 2009.

### 2.2.2 Variação da Temperatura Sobre a Curva Característica

A variação da temperatura, assim como em dispositivos eletrônicos, acaba por influenciar no desempenho do módulo FV. Supondo um cenário onde a irradiância é constante e as curvas foram aferidas sobre duas temperaturas 25°C e 56°C. Assim como pode ser visto na Figura 7, a corrente de curto-circuito sofre um pequeno incremento com o aumento da temperatura, em contrapartida a tensão de circuito aberto sofre um declínio (Gasparin, 2009).

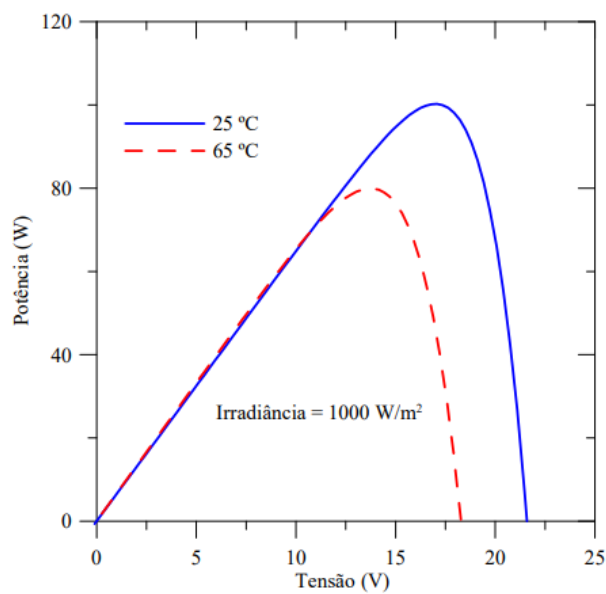
Figura 7: Curva características medidas sob diferentes temperaturas.



Fonte: Gasparin, 2009.

Assim como ilustra a Figura 8, a potência diminui com o aumento da temperatura, uma vez que o acréscimo na corrente não compensa a queda da tensão ao longo da curva (Oliveira,2015).

Figura 8: Variação da curva P-V em função da temperatura em um módulo FV.



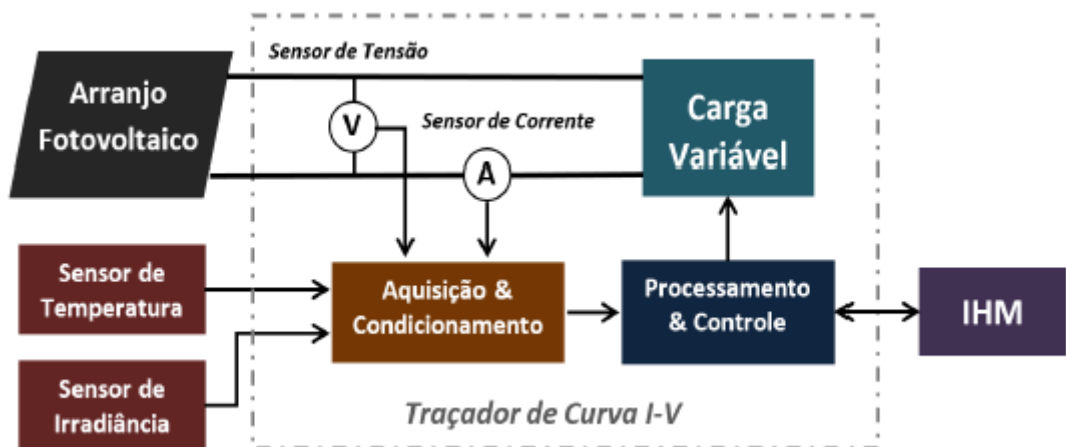
Fonte: Oliveira,2015.

### 2.3 Traçadores de Curva I-V e P-V

A análise da curva I-V desempenha um papel essencial na indústria fotovoltaica, sendo utilizada tanto em processos de fabricação de células e módulos solares quanto em avaliações de campo para verificar o desempenho de módulos, strings e arranjos instalados. Seu formato fornece informações valiosas para especialistas, permitindo a identificação rápida de anomalias e variações de desempenho. Além disso, quando combinada com dados ambientais, como irradiância e temperatura, a curva possibilita uma comparação precisa entre o rendimento esperado que foi aferido em laboratório e o desempenho obtido em condições reais (não ideais) (Campos,2019).

Para que as curvas características sejam traçadas, são utilizadas cargas variáveis, assim, permitindo que todos os pontos de operação da fonte sejam explorados, essa ideia altera a corrente gerada entre seus limites, ou seja, do ponto de curto-circuito ( $I_{SC}$ ) até o ponto de circuito aberto ( $V_{OC}$ ). As medições de tensão e corrente devem ser obtidas simultaneamente, uma vez que este par de dados forma um ponto na curva e o conjunto deles forma a curva propriamente dita, sendo que, quanto maior a quantidade de pontos, melhor a resolução da curva obtida. Um equipamento para traçar a curvas características pode ser generalizado como sendo um dispositivo que possui uma carga variável, que permite a varredura entre os pontos da curva, sensores para aferir irradiância e temperatura, uma interface homem-máquina (IHM) para manipulação e visualização dos dados no equipamento, um bloco de processamento e um bloco de aquisição e condicionamento de dados, assim como ilustra a Figura 9 (Campos,2019).

Figura 9: Esquema geral de um traçador de curva I-V.



Fonte: Campos, 2019.

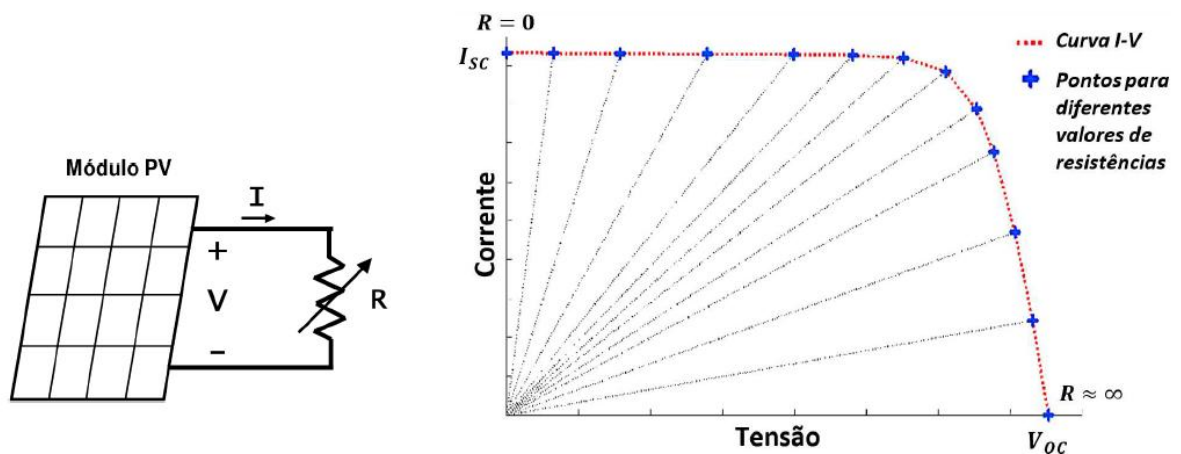
## 2.4 Principais Métodos para Obter as Curvas Características

Existem diferentes métodos que podem caracterizar e traçar as curvas I-V e P-V de módulos FV. A principal diferença pode ser vista nos métodos de aquisição e amostra dos dados, nos equipamentos de controle e tipos de carga variável. Foram analisados e estudados quatro métodos, carga resistiva variável, carga capacitiva, carga eletrônica e o uso do conversor CC-CC com carga resistiva.

### 2.4.1 Carga Resistiva Variável

Uma das formas de se traçar a curva característica perfeita de um módulo FV seria através uso manual de um potenciômetro, com uma resistência com valores que iriam idealmente de  $R=0$  até  $R \approx \infty$ , isto pode ser visualizado na Figura 10. Essa abordagem pode trazer alguns problemas, pois, não seria possível encontrar uma resistência com tais características e a potência dissipada por ela limitaria a caracterização do sistema, além do fato de manter a constância de tempo e valores para coleta de dados em testes manuais (Campos,2019).

Figura 10: Curva simulada a partir de uma resistência variável como carga, considerando uma boa dispersão de pontos.

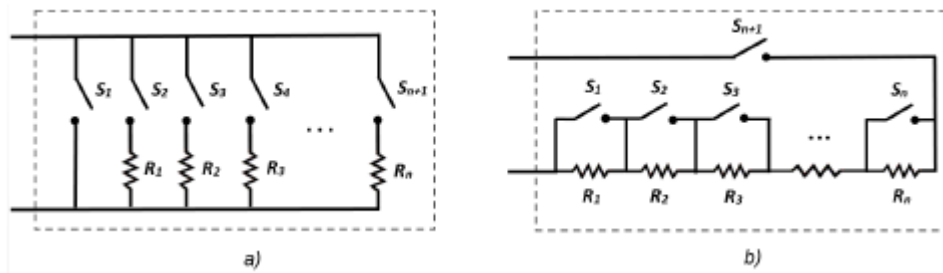


Fonte: Campos,2019.

É possível a automatização deste método, isto é feito através de um arranjo de resistências de valores fixos, que são selecionadas de acordo com uma sequência de chaveamentos. Uma maneira de realizar este chaveamento é utilizando em conjunto a cada resistência um relé, com a finalidade de se obter combinações de diferentes valores através de suas combinações e um relé adicional para condição de curto-circuito. Outro método é através

da aplicação do conjunto de sete resistências, cada uma associada a um IGBT (Transistor Bipolar de Porta Isolada), com configuração que permite a seleção das resistências de maneira independente ou em ligação série, isto garante um vasto número de pontos para a curva. Também é possível a utilizar seis resistências, podendo ser ativadas de modo independente e em sequência através de relés. A Figura 11 ilustra as configurações citadas para as conexões (Campos,2019).

Figura 11: Configuração das resistências: a) seleção em paralelo; b) seleção em série.

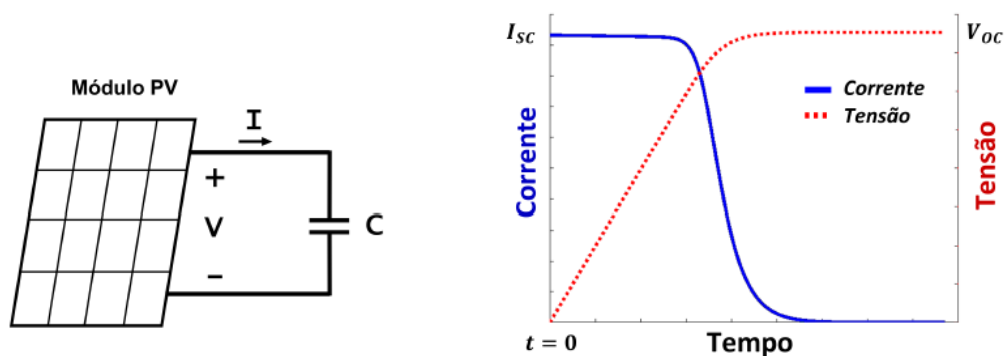


Fonte: Campos,2019.

#### 2.4.2 Carga Capacitiva

Outra abordagem para a coleta de dados da curva característica é através do capacitor. Em um cenário onde este componente inicialmente se encontra descarregado e uma tensão é aplicada em seus terminais, a carga do componente começa a aumentar gradualmente, até que chegue à tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ). Essa transição pode ser vista como um comportamento que varia desde um curto-circuito até um circuito aberto no final, assim como ilustra a Figura 12. (Campos,2019).

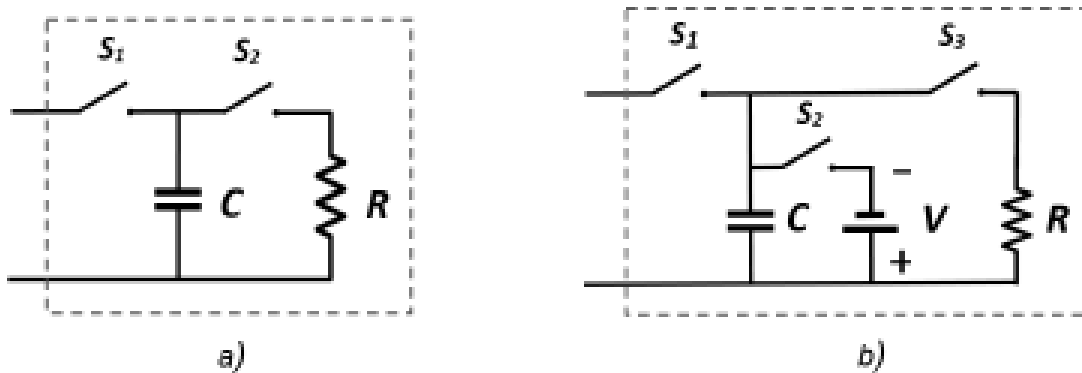
Figura 12: Curvas de corrente e tensão no capacitor inicialmente descarregado, utilizando um módulo FV como fonte.



Fonte: Campos, 2019.

Partindo do princípio de operação do capacitor aplicado a uma fonte FV, pode ser feita uma análise onde se estabelece uma relação direta entre o valor da capacitância e o tempo de estabilização (tempo que dura o processo). Para isso é considerado uma resistência para a descarga do capacitor e chaves para a troca de estado entre a carga e descarga. Outra possível abordagem envolve a utilização de uma fonte CC, com o intuito de pré-carregar o banco de capacitores com tensão negativa, assim, compensando as quedas de tensão e permitindo que o ponto de curto-circuito seja obtido. Aplicações similares podem ser feitas com o uso de IGBT e MOSFET permitindo um chaveamento do sistema. A Figura 13 demonstra a configuração para os sistemas descritos (Campos, 2019).

Figura 13: Configuração de carga capacitiva: a) com resistência para a descarga; b) com uma fonte de tensão para pré-carrega do capacitor e resistência de descarga.

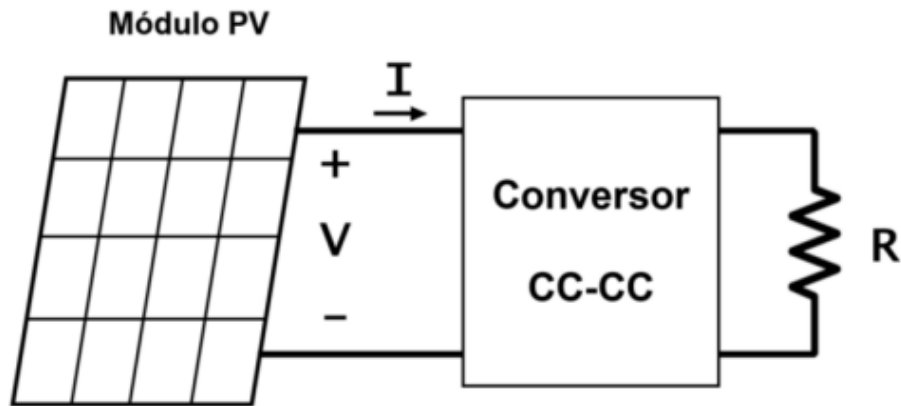


Fonte: Campos,2019.

### 2.4.3 Conversor CC-CC com Carga Resistiva

Um conversor CC-CC é um dispositivo eletrônico que possui a característica de alterar o valor da tensão contínua na entrada para um nível de tensão contínua diferente na saída, de acordo com a largura do pulso do sinal de controle. Esses circuitos geralmente possuem alta eficiência, podendo transferir grande parte da potência de entrada para a saída. Quando uma fonte de corrente contínua (FV) é conectada à entrada do conversor e uma carga resistiva fixa à saída, como ilustrado na Figura 14, é possível ajustar a potência na saída variando a tensão nela, o que causa mudanças nos valores de corrente e tensão da fonte, permitindo a obtenção da curva característica dessa fonte. Dessa forma, o conversor e a resistência fixa atuam como uma resistência variável, sendo que o valor da resistência equivalente pode ser ajustado por meio do sinal de controle do conversor (Campos, 2019).

Figura 14: Carga resistiva fixa através de um conversor CC-CC.

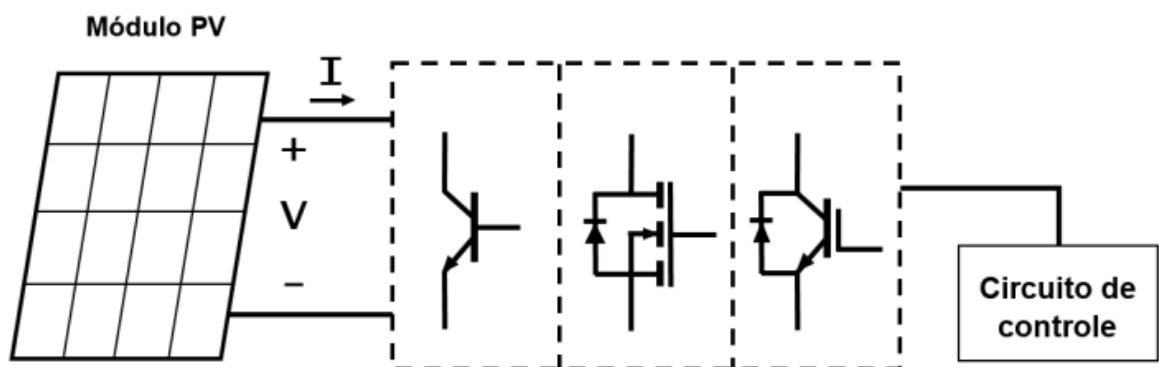


Fonte:Campos,2019.

#### 2.4.4 Carga Eletrônica

Uma carga eletrônica pode ser implementada utilizando dispositivos semicondutores, podendo ser controlados eletronicamente dependendo da aplicação de tensão e corrente em seus terminais de controle. Dentre os dispositivos possíveis destaca-se os transistores TBJ (Transistor Bipolar de Junção), MOSFET e IGBT. Esses componentes, podem ser utilizados como uma resistência variável sob um controle apropriado. A Figura 15 ilustra os principais tipos de cargas eletrônicas (Campos, 2019).

Figura 15: Principais tipos de cargas eletrônicas.



Fonte: Campos, 2019.

### 3 DESENVOLVIMENTO DA MÉTODOLOGIA DA CARGA CAPACITIVA

Para este estudo, foi abordado o método da carga capacitiva como foco, sendo levado em conta seu modelo matemático e simulação no PSIM. Este desenvolvimento tem como

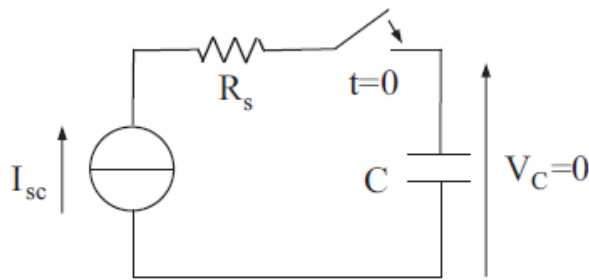
objetivo uma melhor compreensão do circuito adotado, bem como descrever de seu comportamento.

### 3.1 Desenvolvimento Matemático

Para que seja possível a descrição desta metodologia, utilizou-se de um modelo matemático aproximado, o modelo não representa o comportamento de corrente de uma célula fotovoltaica, mas resulta em uma curva  $I \times V$  adequada.

A principal diferença entre a o modelo matemático adotado com a curva real no comportamento da corrente pode ser visto quando a corrente começa a decair, no circuito original se espera que a mesma tenha um declínio mais suave, tal como pode ser visto na Figura 23. No modelo utilizado nesta seção, ocorre uma modificação no circuito que resulta em duas etapas, sendo que a corrente descreve uma função divergente da realidade. Como o objetivo do modelo é a obtenção das curvas  $I \times V$  e  $P \times V$ , a técnica atende sua finalidade, assim, o princípio de funcionamento pode ser dividido em duas etapas distintas, um regime inicial de corrente constante e um regime de carga exponencial. No instante inicial ( $t = 0$ ), o capacitor encontra-se totalmente descarregado e se comporta como um curto-circuito, assim como ilustra a Figura 16. Nessa condição, a corrente fornecida pelo módulo fotovoltaico é aproximadamente igual à sua corrente de curto-circuito, escalada pelo número de módulos em paralelo ( $N_p$ ), conforme expresso na Equação (7) (Spertino, 2015).

Figura 16: Circuito equivalente para o primeiro intervalo.



Fonte: Adaptado de (Spertino, 2015).

$$i(t) \approx I_{sc} \cdot N_p \quad (7)$$

Nesse regime, a tensão nos terminais do capacitor cresce linearmente com o tempo, de acordo com a relação fundamental de um capacitor carregado por corrente constante, representada na Equação (8) (Spertino, 2015).

$$v(t) = \frac{I_{sc} \cdot N_p}{C} \cdot t \quad (8)$$

A transição entre o regime linear e o regime exponencial ocorre quando a tensão no capacitor atinge o instante  $t_0$ , quando sua carga assume o valor  $V_0$ , aproximadamente a tensão de máxima potência ( $V_{mpp}$ ) do arranjo,  $t_0$  pode ser calculado como na Equação (9), onde  $N_s$  corresponde ao número de módulos em série e  $V_{mpp}$  é estimada como cerca de 80% da tensão de circuito aberto total do arranjo ( $V_{OC}$ ). Vale ressaltar que no instante da transição de  $t$  para  $t_0$  a tensão em  $t_0$  permanece a mesma que no instante  $t$  (Spertino, 2015).

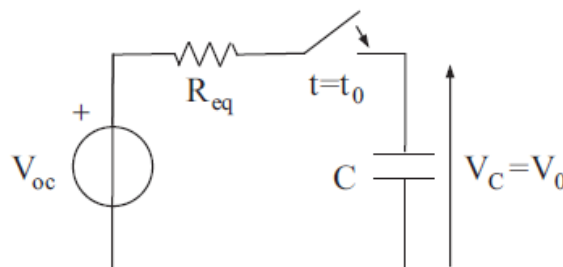
$$t_0 = C \cdot \frac{(V_{oc} \cdot N_s - R_{eq} \cdot I_{sc} \cdot N_p)}{I_{sc} \cdot N_p} \quad (9)$$

A partir de  $t_0$  o comportamento do sistema aproxima-se do de uma fonte de tensão  $V_{OC}$  em série com uma resistência equivalente  $R_{eq}$ , e que pode ser estimada segundo a Equação (10), o circuito é ilustrado pela Figura 17 (Spertino, 2015).

$$R_{eq} = 0,2 \cdot \frac{N_s \cdot V_{OC}}{I_{sc} \cdot N_p} \quad (10)$$

Neste segundo regime, a tensão nos terminais do capacitor evolui de forma exponencial até atingir  $V_{OC}$ , de acordo com a Equação (11) (Spertino, 2015).

Figura 17: Circuito equivalente para o segundo intervalo.



Fonte: Adaptado de (Spertino, 2015).

$$v(t) = V_{oc} \cdot N_s + \left( \frac{t_0 \cdot I_{sc} \cdot N_p}{C} - V_{oc} \cdot N_s \right) \cdot e^{\frac{-(t-t_0)}{R_{eq} \cdot C}} \quad (11)$$

A corrente no capacitor (e no ramo) é dado pela Equação (12) (Spertino, 2015).

$$i(t) = C \cdot \frac{dv}{dt} = \left( \frac{V_{oc} \cdot N_s}{R_{eq}} - \frac{t_0 \cdot I_{sc} \cdot N_p}{R_{eq} \cdot C} \right) \cdot e^{\frac{-(t-t_0)}{R_{eq} \cdot C}} \quad (12)$$

O tempo necessário para percorrer toda a curva até valores próximos a  $V_{oc}$  pode ser estimado pela Equação (13), e para obter o cálculo aproximado da carga capacitiva, pode ser utilizado a Equação (14).

$$t_f = t_0 + 5 \cdot R_{eq} \cdot C \quad (13)$$

$$C \approx 0,55 \cdot t_f \cdot \frac{I_{sc} \cdot N_p}{V_{oc} N_s} \quad (14)$$

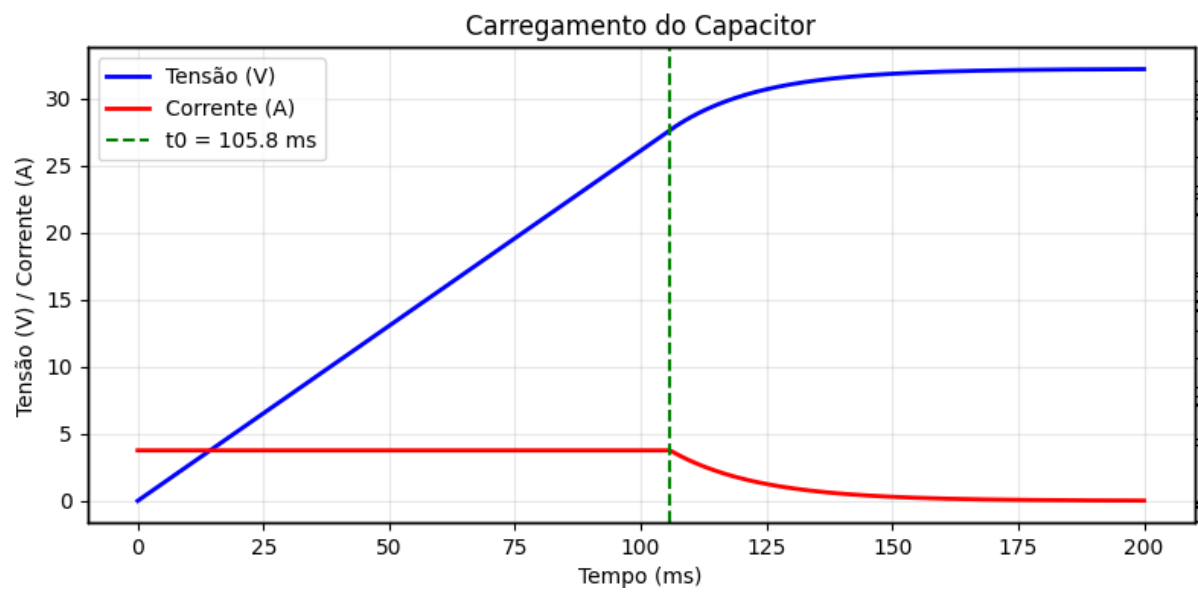
### 3.1.1 Simulação de Acordo com a Descrição Matemática

Partindo das equações descritas, podem ser traçados os gráficos da tensão no capacitor durante o carregamento, Figura 18, o gráfico da corrente e tensão no capacitor, a curva I-V do modelo equivalente do painel FV, Figura 19 e a curva P-V do modelo equivalente do painel FV, Figura 20.

Dados utilizados:

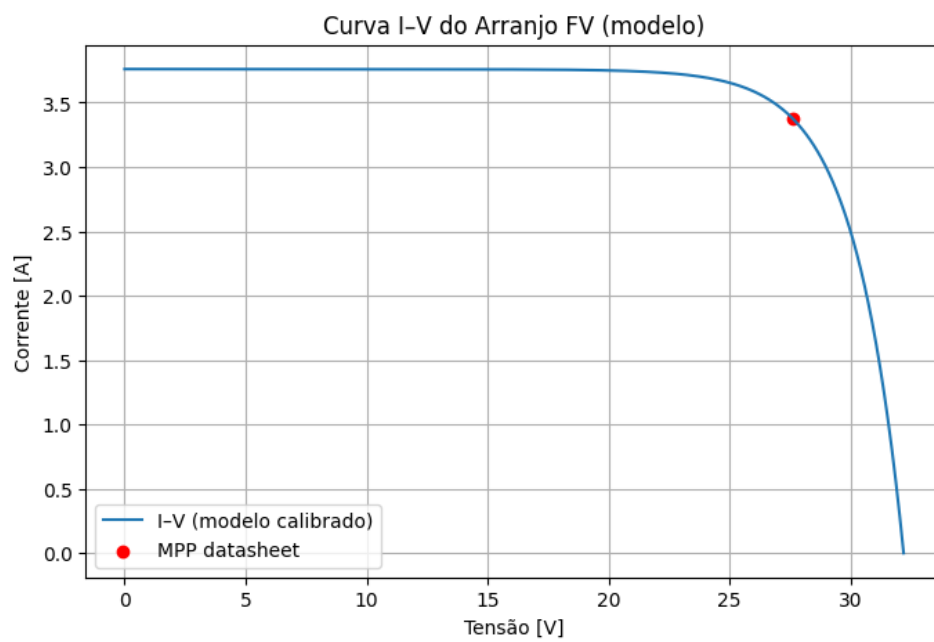
- $I_{sc} = 3,76A$
- $V_{oc} = 32,19V$
- $N_p = 1$
- $N_s = 1$
- $C = 14400\mu F$  (três capacitores de  $4800\mu F$  em paralelo)

Figura 18: Carregamento do Capacitor – Tensão e Corrente.



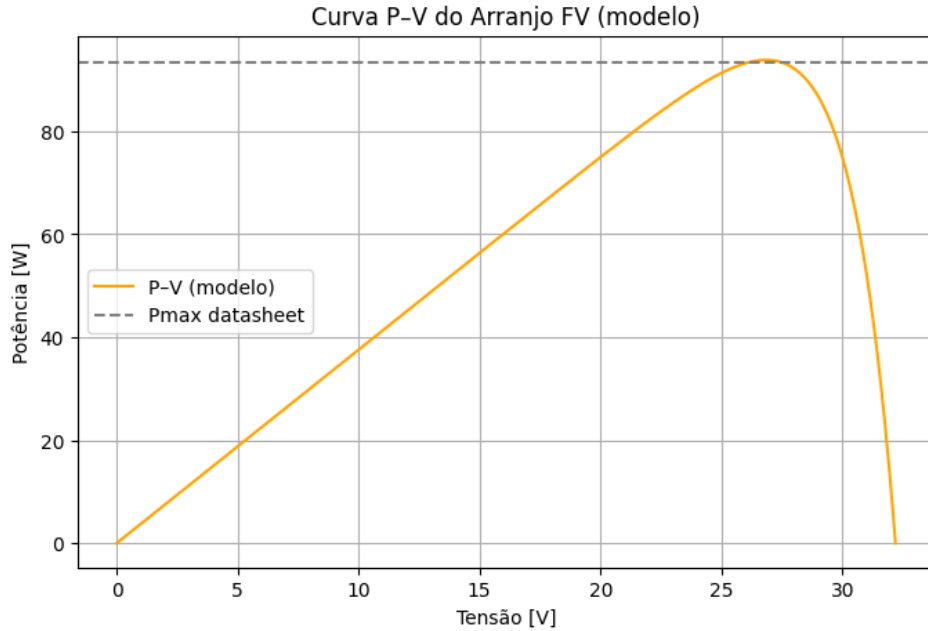
Fonte: Próprio autor.

Figura 19: Curva I-V do arranjo FV.



Fonte: Próprio autor.

Figura 20: Curva P-V do arranjo FV.



Fonte: Próprio autor.

A diferença observada entre o ponto de máxima potência do modelo matemático e o especificado em datasheet ocorre porque o modelo de um diodo é uma aproximação. A equação é feita com base em  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  e no ponto de máxima potência, mas não consegue representar com perfeição toda a curva I-V. Além disso, parâmetros como a resistência série e a resistência de shunt são considerados constantes, quando na prática variam com a tensão, corrente e temperatura. Por esses motivos, que o modelo apresente valores de potência ligeiramente superiores ao  $P_{max}$  especificado.

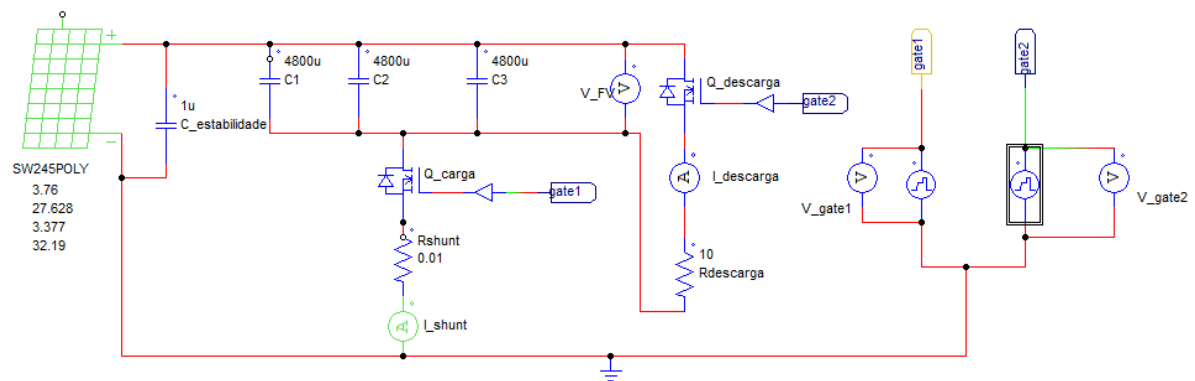
### 3.2 Simulação no PSIM

Para a validação da metodologia proposta, foram realizadas simulações computacionais no software PSIM. O ambiente de simulação foi configurado de forma a representar o circuito equivalente do método da carga capacitiva, permitindo observar o comportamento dinâmico da tensão e da corrente ao longo do processo de carga e descarga do capacitor conectado ao módulo fotovoltaico.

A simulação no ambiente do PSIM foi concebida de acordo com o circuito da Figura 21, que descreve o circuito traçador de curvas desenvolvido, desta vez, o circuito possui

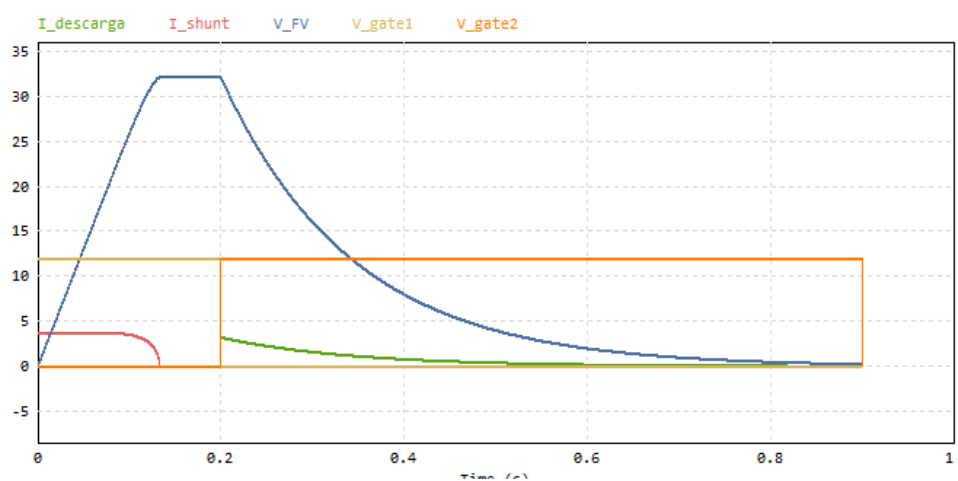
MOSFETs em sua composição, assim, permitindo alterar entre o modo de aquisição de curva (carga do banco de capacitores) e modo de descarga do banco de capacitores (descarga pelo resistor em paralelo ao banco de capacitores), (nesta configuração, foi adicionado um capacitor em paralelo a placa, sua função é apenas garantir estabilidade para a simulação). Este controle é feito de acordo com o sinal ilustrado na Figura 22, juntamente com as curvas obtidas das medições. E as curvas I-V e P-V respectivamente nas Figura 23 e Figura 24.

Figura 21: Circuito do traçador de curvas.



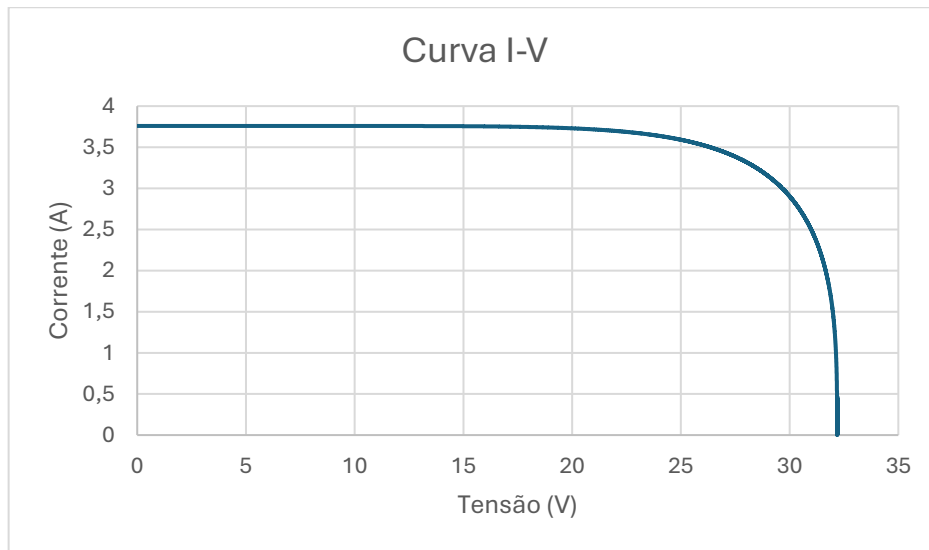
Fonte: Próprio autor.

Figura 22: Curvas de Tensão da simulação de carga e descarga no capacitor.



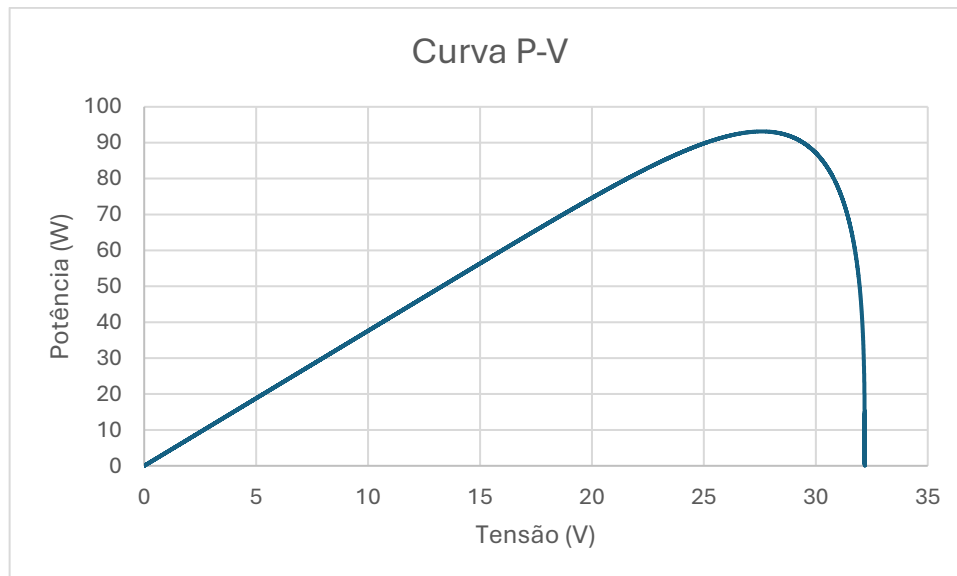
Fonte: Próprio autor.

Figura 23: Curva I-V (PSIM).



Fonte: Próprio autor.

Figura 24: Curva P-V (PSIM).



Fonte: Próprio autor.

#### 4 DESENVOLVIMENTO DA ARQUITETURA DO SISTEMA

A concepção prática do projeto foi idealizada com o objetivo de desenvolver um sistema capaz de realizar o traçado das curvas características I-V e P-V de módulos fotovoltaicos. A proposta inicial contempla a utilização de um banco de capacitores dimensionado para fornecer a carga necessária à execução das medições de corrente e tensão durante o período de carga, assim, captando o comportamento de um módulo fotovoltaico sob diferentes condições de operação.

## 4.1 Idealização e Estruturação do Projeto

O sistema foi concebido como uma plataforma integrada de aquisição e análise, baseada no microcontrolador ESP-32. Esta escolha fundamenta-se nas capacidades avançadas deste chip, que inclui processamento dual-core, conectividade Wi-Fi nativa e ampla variedade de interfaces de comunicação. A arquitetura adotada organiza-se em três camadas principais que trabalham em conjunto para fornecer uma solução robusta e versátil.

A camada física compreende o hardware propriamente dito, onde o ESP-32 atua como cérebro do sistema, coordenando todas as operações. O sensor INA-219, conectado via interface I2C, fornece medições precisas de tensão e corrente, enquanto circuitos auxiliares garantem o condicionamento adequado dos sinais.

Na camada de processamento, o firmware utilizado implementa algoritmos de aquisição em tempo real e filtragem. Esta camada gerencia eficientemente os recursos de memória, processa os dados brutos do sensor e prepara as informações para visualização.

A camada de apresentação consiste em uma interface web responsiva que permite ao usuário interagir com o sistema através de qualquer dispositivo com navegador moderno. Esta separação em camadas proporciona modularidade, facilitando manutenções e expansões futuras.

### 4.1.1 Especificações Técnicas

O núcleo do sistema reside no microcontrolador ESP-32. Este componente apresenta arquitetura de duplo núcleo operando a 240 MHz, o que o permite realizar processamento de sinais em tempo real. Com 520 KB de memória RAM e 4 MB de armazenamento flash.

A conectividade Wi-Fi permite que o dispositivo funcione tanto como estação conectada a redes existentes quanto como ponto de acesso independente, assim fornecendo uma variedade de operações em ambientes diversos.

Para medições elétricas, o sistema emprega o sensor INA-219, um circuito integrado especializado que combina digitalizador de alta precisão com interface I2C. Este sensor cobre faixas de 0V a 26V para tensão e  $\pm 3,2A$  para corrente, com resolução de 0,1 mA e precisão de 1%. Sua comunicação via I2C a 400 kHz garante atualização rápida dos dados, essencial para captura de curvas dinâmicas.

## **4.2 Estrutura Elétrica**

Houve a reformulação do arranjo eletrônico de comando, chaveamento e medição, visando confiabilidade, isolamento e versatilidade. A nova idealização, dividida em blocos lógicos conta com a seguinte disposição, comando/chaveamento, medição, banco de capacitores, e interface de operação.

Para aumentar a robustez e a segurança do protótipo, o circuito foi reorganizado em três blocos eletricamente isolados:

### **4.2.1 Bloco de Comando**

A placa ESP32 permanece como controlador principal e gerador da IHM (rede Wi-Fi, servidor web e parâmetros de teste). A ESP32 envia sinais de comando lógicos para o bloco de isolamento/acionamento. A interface Wi-Fi e a IHM permitem configurar quantidade de medidas, tempo de amostragem, e visualizar tabelas e gráficos de pontos coletados

### **4.2.2 Bloco de Isolamento e Amplificação**

A reestruturação de projeto se motiva devido ao fato de que a concepção anterior utilizava um MOSFET acionado diretamente pela ESP-32; essa solução mostrou-se problemática porque o nível de tensão e corrente na saída da ESP-32 não era suficiente para garantir um acionamento estável do gate em todas as condições, ou seja, o gate do MOSFET se encontrava sub-tensionado, em condução parcial. Assim, optou-se por reduzir a dependência do acionamento direto por 3,3 V e introduzir isolamento e um estágio de potência dedicado. Para solucionar esta problemática, o sinal lógico da ESP-32 é acoplado a um optoacoplador (garantindo isolamento) o optoacoplador comuta um transistor que fornece corrente suficiente para energizar a bobina de um relé de 12 V. O relé faz o chaveamento de potência entre o banco de capacitores e o módulo FV (ou entre modos carga/descarga). A alimentação do relé é proveniente de uma fonte 12 V dedicada, separada do bloco de comando. Para a proteção do circuito, a bobina do relé é protegida com um diodo em anti-paralelo (flyback) para suprimir picos de tensão reversa na desenergização. Essa proteção reduz tensões transitórias que poderiam danificar o transistor ou o optoacoplador ou provocar ruído nas medições, assim o acionamento do relé tornou-se independente do nível lógico da ESP-32, eliminando problemas de gate sub-tensionado do MOSFET e fornecendo isolamento e repetibilidade nas comutações.

Do mesmo modo opera o bloco de descarga, só que desta vez operando com um resistor em sua conexão normalmente aberta, para descarga dos capacitores de modo automático ao final da operação

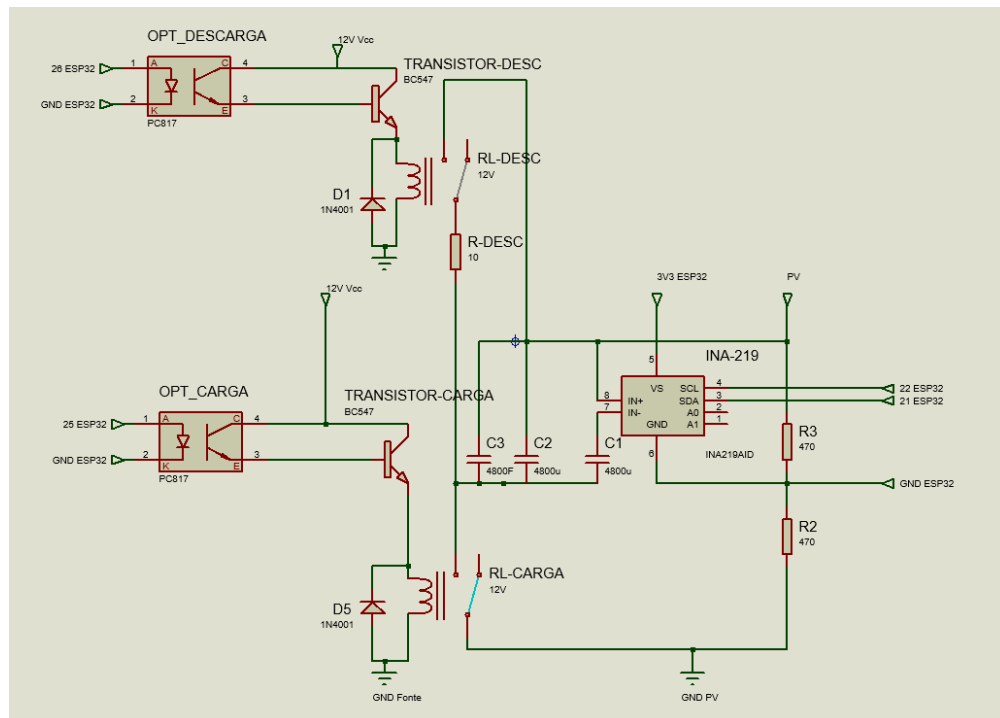
### 4.2.3 Bloco de Medição

A medição de corrente e tensão do arranjo fotovoltaico foi implementada utilizando o sensor INA-219. Nesse arranjo, o INA-219 é instalado em série com a linha de alimentação para aferir corrente via shunt interno e medir tensão entre seus terminais conforme sua referência  $V_{in-}$  e  $V_{in+}$ .

Com relação a limitações por parte do INA-219, o componente impôs restrições importantes (alcance máximo de tensão e limite de corrente, sensibilidade do shunt disponível no módulo), que limitaram a capacidade de medir painéis reais com tensões e correntes maiores.

Para permitir medições de tensões superiores ao limite do INA-219, implementou-se um divisor resistivo na entrada de tensão do sensor, reduzindo a amplitude até metade do valor real. Além disso, a topologia de conexão do banco de capacitores (paralelo entre capacitores) altera a distribuição de corrente e a tensão nos terminais de medição, quando capacitores são ligados em paralelo, a corrente se divide entre os elementos. A Figura 25 ilustra a concepção do circuito desenvolvido.

Figura 2525: Circuito do Traçador de Curvas I-V e P-V



Fonte: Próprio autor.

### **4.3 Funcionalidades, Mecanismos e Miscelâneos**

Para uma maior estabilidade, funcionalidade e praticidade, se fez necessário implementar vários pontos de ajuste, melhoria, filtragem e qualidade de uso para uma melhor compreensão, experiência e resultados mais precisos.

#### **4.3.1 Mecanismo de Aquisição em Tempo Real**

A aquisição de dados é feita com base no hardware interno ESP-32, garantindo intervalos constantes entre amostras e sincronizado com a aquisição da placa INA-219, assim, após a captura, os valores sofrem o processamento inicial que inclui a aplicação de multiplicadores configuráveis. Estes multiplicadores permitem ajuste fino das leituras, possibilitando compensação de erros ou adaptação a diferentes escalas de medição, podendo ser citado como exemplo a aplicação de um divisor resistivo o que altera os valores medidos. A potência instantânea é calculada como produto dos valores já ajustados de tensão e corrente.

#### **4.3.2 Parâmetros Configuráveis**

Com relação as configurações para a operação do sistema, temos, número total de leituras podendo variar de 10 a 500 amostras, permitindo desde varreduras rápidas para identificação de tendências até aquisições detalhadas para análise minuciosa. A duração total da varredura ajusta-se de 0,1 a 10 segundos, com o intervalo entre amostras calculado automaticamente para distribuição uniforme. O tempo de descarga, configurável entre 1 e 30 segundos, assegura que os capacitores do circuito sejam completamente descarregados entre coletas, prevenindo interferências entre medições consecutivas e a segurança em caso de manuseio. Este pedaço da interface pode ser visualizado na Figura 26.

Figura 266: Parâmetros Configuráveis da Interface.

**Tracador I-V e P-V**  
Sistema de Análise Fotovoltaica - ESP32 V20.2

STATUS: Sistema Pronto    AMOSTRAS: 73    INDICADORES: [Toggle]

**Controles de Coleta**

Nº de Leituras: 100

Duração (s): 0,1

Descarga (s): 0

Limiar (V): 25

**Multiplicadores**

Fonte: Próprio autor.

#### 4.3.3 Sistema de Multiplicadores

O sistema de multiplicadores consiste na implementação de multiplicadores independentes para cada grandeza física medida. Estes multiplicadores, ajustáveis individualmente com resolução de 0,1 e faixa de -10 a +10, oferecem múltiplas possibilidades de aplicação. Na prática, os multiplicadores permitem compensação calibrada de erros sistemáticos do sensor, adaptação a diferentes faixas de operação através de divisores de tensão ou shunts de corrente, e até simulação de condições extremas. A Figura 27 ilustra este campo na interface.

Figura 277: Multiplicadores da Interface.

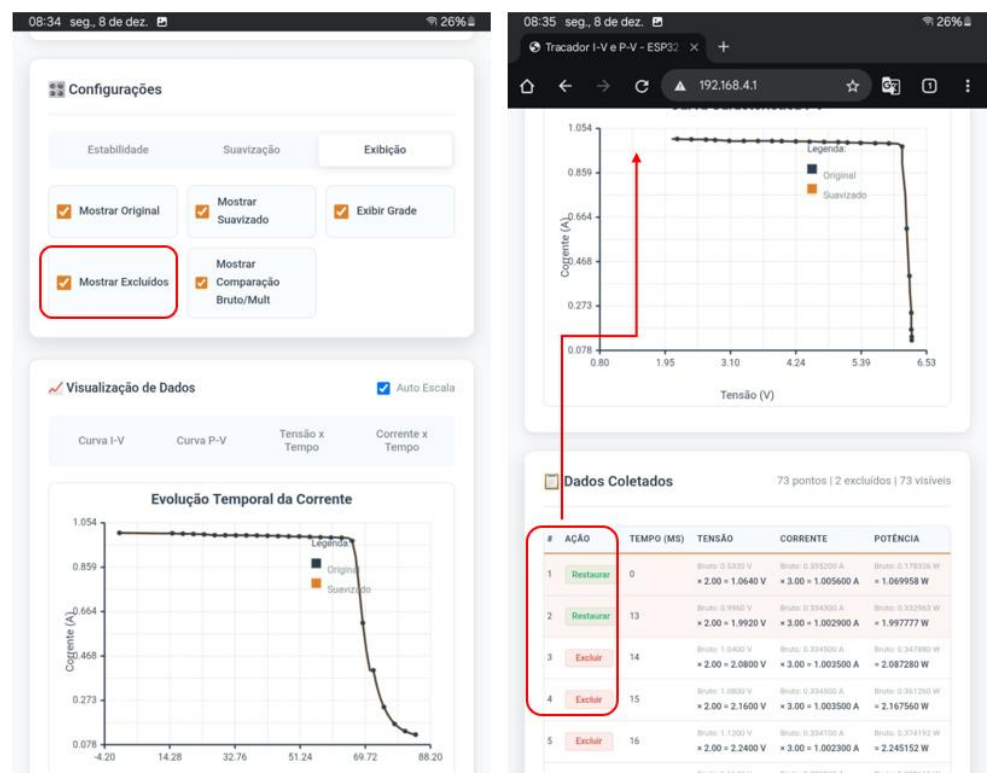
The image shows a web interface titled "Multiplicadores". It contains three input fields for numerical values: "Tensão" with the value "2", "Corrente" with the value "3", and "Potência" with the value "1,0". Below these fields are four buttons: "Iniciar Coleta" (dark blue), "Parar" (orange), "Resetar" (light gray), and "Exportar CSV" (green). Red rectangular boxes highlight the title and each of the three input fields.

Fonte: Próprio autor.

#### 4.3.4 Controle de Qualidade

Durante testes, notou-se que alguns pontos coletados fugiram muito do esperado, assim sendo, foi implementado uma funcionalidade que permite ao usuário marcar manualmente pontos considerados suspeitos, excluindo-os temporariamente da análise sem eliminação permanente. Esta exclusão seletiva mantém os dados originais intactos enquanto remove interferências pontuais, com possibilidade de restauração posterior se necessário. Pontos excluídos são visualmente diferenciados na interface, proporcionando transparência completa sobre o processamento aplicado. A ilustração pode ser vista na Figura 28.

Figura 288: Controle de Pontos.



Fonte: Próprio autor.

### 4.3.5 Sistema de Média Móvel

O sistema apresenta um algoritmo de filtragem, a média móvel simples opera calculando a média aritmética das últimas N amostras, onde N representa a janela do filtro ajustável entre 2 e 10 pontos. Este método, linear e causal, é particularmente eficaz para sinais com ruído, proporcionando suavização uniforme ao custo de introduzir certo atraso na resposta. Esta configuração é ilustrada na Figura 29.

Figura 29: Sistema de Média Móvel.

Fonte: Próprio autor.

#### 4.3.6 Algoritmo para Detecção de Estabilidade

Um dos aspectos mais críticos na aquisição de curvas fotovoltaicas é determinar o momento adequado para interromper a varredura. O sistema implementa um algoritmo que avalia múltiplos critérios em tempo para esta decisão. O primeiro critério baseia-se na estabilidade das leituras, calculando diferenças entre amostras consecutivas e comparando-as com um limiar configurável pelo usuário. Quando um número pré-definido de amostras apresenta variação inferior a este limiar, o sistema considera atingida condição de estabilidade. Em paralelo a esta operação, monitora-se a tensão medida, interrompendo imediatamente a aquisição se ultrapassar valor máximo de segurança. Este mecanismo protege o sistema de medição contra condições potencialmente danosas e pode ser configurado pelo usuário. Como alternativa adicional, um contador de amostras garante término da varredura após atingir número máximo configurado, prevenindo loops infinitos em caso de falha nos outros critérios, e ainda, o usuário mantém sempre a capacidade de interromper manualmente a aquisição através da interface.

#### 4.2.6 Estados de Operação

O sistema possui estados de operação, sendo eles, “Pronto”, “Coletando”, “Em Descarga”, “Processando” e “Erro”, e cada um pode ser indicado através do indicador de STATUS, localizado na parte superior da interface.

No estado "Pronto", o sistema aguarda comando de início, com todos os periféricos inicializados, ao receber comando, transiciona para estado "Coletando", onde efetua aquisições segundo parâmetros configurados. Concluída a coleta, entra em estado "Em Descarga", ativando circuitos para dissipação de energia residual nos componentes reativos.

Após período configurável de descarga, passa ao estado "Processando", onde realiza análises estatísticas e prepara dados para visualização. Em caso de detecção de condições anômalas, transiciona para estado "Erro", registrando informações de diagnóstico e aguardando intervenção. Cada transição de estado é validada quanto a pré-condições necessárias. Este gerenciamento estruturado assegura comportamento previsível e confiável mesmo em condições operacionais variáveis.

#### **4.3.7 Exportação de Dados**

Sabe-se que dados adquiridos frequentemente requerem processamento adicional ou incorporação em relatórios, o sistema oferece a opção de exportação no formato CSV (Valores Separados por Vírgulas).

### **4.4 Interface Web e Visual**

A comunicação com o usuário estabelece-se através de interface web hospedada no próprio ESP-32. Esta abordagem elimina necessidade de softwares específicos, bastando dispositivo com navegador moderno e conectividade Wi-Fi.

Ao energizar o sistema, o ESP32 cria automaticamente rede Wi-Fi com identificador "TracadorIVPV", protegida por senha configurável. Conectando-se a esta rede e acessando endereço IP padrão do dispositivo, o usuário encontra página inicial carregada diretamente da memória flash do microcontrolador.

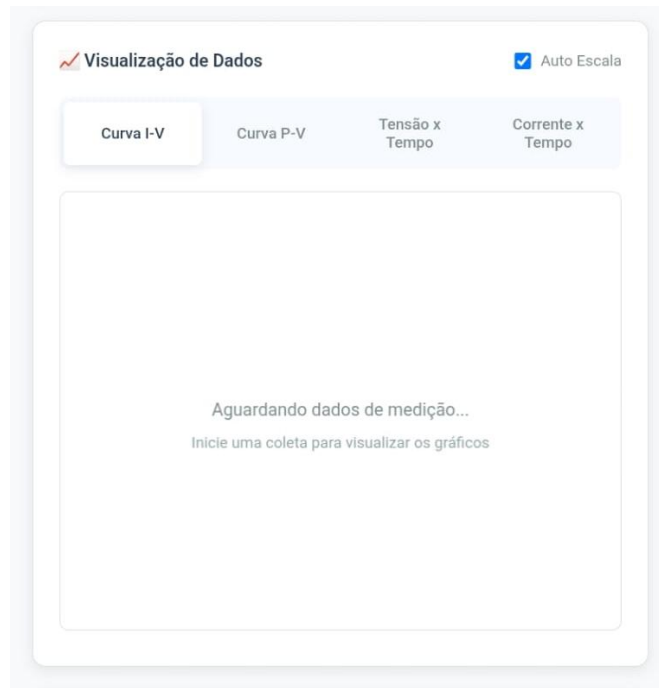
#### **4.4.1 Sistema de Gráficos Interativos**

Quatro tipos de visualizações estão disponíveis: a curva I-V clássica mostrando relação entre tensão e corrente; a curva P-V exibindo potência em função da tensão; gráfico tensão versus tempo, apresentando evolução temporal da tensão; e gráfico corrente versus-tempo mostrando variação da corrente ao longo da aquisição.

Cada gráfico oferece conjunto completo de funcionalidades interativas, com grades auxiliares, ativáveis conforme preferência, facilitando a leitura precisa de valores, elementos

visuais que destacam pontos importantes, particularmente o ponto de máxima potência nas curvas P-V, marcado com círculo vermelho e anotação textual. Legendas dinâmicas identificam claramente cada curva apresentada, utilizando esquema de cores consistente em todas as visualizações. A Figura 30 ilustra a tela gráfica.

Figura 30: Gráficos Ilustrados na Interface.



Fonte: Próprio autor.

#### 4.4.2 Tabela de Dados Dinâmica

Complementando as visualizações gráficas, a tabela interativa apresenta dados numéricos completos em formato tabular. Esta tabela organiza-se com colunas, possui controles de exclusão manual, e valores de tensão, corrente e potência. Linhas correspondentes a pontos marcados como excluídos destacam-se visualmente com fundo diferenciado, mantendo transparência sobre o processamento aplicado. Esta aplicação pode ser vista na Figura 31.

Figura 30: Tabela de Dados Dinâmicos.

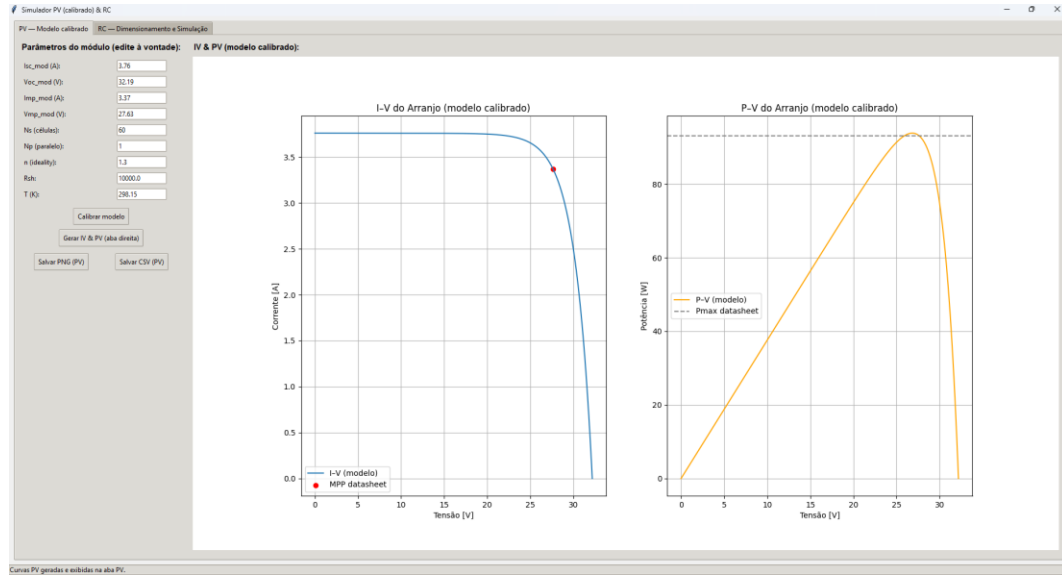
| #  | AÇÃO    | TEMPO (MS) | TENSÃO                               | CORRENTE                                   | POTÊNCIA                            |
|----|---------|------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1  | Excluir | 4          | Bruto: 4.5440 V<br>× 1.00 = 4.5440 V | Bruto: 0.000200 A<br>× 2.00 = 0.000400 A   | Bruto: 0.000909 W<br>= 0.001818 W   |
| 2  | Excluir | 5          | Bruto: 4.5440 V<br>× 1.00 = 4.5440 V | Bruto: 0.000200 A<br>× 2.00 = 0.000400 A   | Bruto: 0.000909 W<br>= 0.001818 W   |
| 3  | Excluir | 6          | Bruto: 4.5440 V<br>× 1.00 = 4.5440 V | Bruto: 0.000200 A<br>× 2.00 = 0.000400 A   | Bruto: 0.000909 W<br>= 0.001818 W   |
| 4  | Excluir | 7          | Bruto: 0.6920 V<br>× 1.00 = 0.6920 V | Bruto: -0.000200 A<br>× 2.00 = -0.000400 A | Bruto: -0.000138 W<br>= -0.000277 W |
| 5  | Excluir | 8          | Bruto: 0.9960 V<br>× 1.00 = 0.9960 V | Bruto: 3.200000 A<br>× 2.00 = 6.400000 A   | Bruto: 3.187200 W<br>= 6.374400 W   |
| 6  | Excluir | 9          | Bruto: 1.3600 V<br>× 1.00 = 1.3600 V | Bruto: 2.782700 A<br>× 2.00 = 5.565400 A   | Bruto: 3.784472 W<br>= 7.568944 W   |
| 7  | Excluir | 10         | Bruto: 1.7040 V<br>× 1.00 = 1.7040 V | Bruto: 2.771700 A<br>× 2.00 = 5.543400 A   | Bruto: 4.722977 W<br>= 9.445954 W   |
| 8  | Excluir | 11         | Bruto: 2.0560 V<br>× 1.00 = 2.0560 V | Bruto: 2.752200 A<br>× 2.00 = 5.504400 A   | Bruto: 5.658523 W<br>= 11.317046 W  |
| 9  | Excluir | 12         | Bruto: 2.4080 V<br>× 1.00 = 2.4080 V | Bruto: 2.780500 A<br>× 2.00 = 5.501000 A   | Bruto: 6.623204 W<br>= 13.246408 W  |
| 10 | Excluir | 13         | Bruto: 2.7560 V<br>× 1.00 = 2.7560 V | Bruto: 2.743900 A<br>× 2.00 = 5.487800 A   | Bruto: 7.562188 W<br>= 15.124377 W  |
| 11 | Excluir | 14         | Bruto: 3.1040 V<br>× 1.00 = 3.1040 V | Bruto: 2.746600 A<br>× 2.00 = 5.493200 A   | Bruto: 8.525447 W<br>= 17.050893 W  |
| 12 | Excluir | 15         | Bruto: 3.1040 V<br>× 1.00 = 3.1040 V | Bruto: 2.744400 A<br>× 2.00 = 5.488800 A   | Bruto: 8.518618 W<br>= 17.037235 W  |
| 13 | Excluir | 17         | Bruto: 3.7200 V<br>× 1.00 = 3.7200 V | Bruto: 1.733800 A<br>× 2.00 = 3.467600 A   | Bruto: 6.449736 W<br>= 12.899472 W  |

Fonte: Próprio autor.

## 4.5 Software de Apoio

Com o intuito de maior praticidade e expansão, se viu a oportunidade de se criar um software extra de apoio em Python para dimensionamento e simulação. O software de apoio, assim como ilustrado na Figura 32, traz consigo a possibilidade de simular as curvas teóricas, provenientes do modelo matemático já descrito na seção 3.1.1. Também existe a possibilidade de se simular o capacitor ideal para uma dada situação, ou seja, uma rotina de cálculos para parametrização do capacitor de acordo com a operação desejada, assim como ilustra a Figura 33.

Figura 31: Software de apoio (Simulação IV e PV)



Fonte: Próprio autor.

#### 4.5.1 Software de Apoio Para Dimensionamento de Capacitores

O software de dimensionamento aceita requisitos de projeto fornecidos pelo usuário (por exemplo: carregar o capacitor até 90% da tensão nominal em 0,1 s) e calcula o valor de capacitância necessário a partir das equações de carga de capacitor.

Sua operação parte da Equação (15), podemos modelar o comportamento de um circuito RC série:

$$V_c(t) = V_{in} \cdot (1 - e^{-t/RC}) \quad (15)$$

Assim sendo, considera-se um tempo alvo, e neste tempo alvo é definido um percentual  $P$  da tensão final de  $V_{in}$ , assim como define a Equação (16):

$$V_c(t_{alvo}) = P \cdot V_{in} \quad (16)$$

Substituindo a Equação (16) na Equação (15) e isolando o termo exponencial, temos:

$$e^{-t_{alvo}/RC} = 1 - P \quad (17)$$

Aplicando logaritmo e multiplicando por  $-1$  chegamos à Equação (18):

$$\frac{t_{alvo}}{RC} = \ln(1 - P) \quad (18)$$

Isolando RC, chegamos à Equação (18) e continuando a operação chegamos à Equação (21):

$$RC = \frac{t_{alvo}}{-\ln(1 - P)} \quad (19)$$

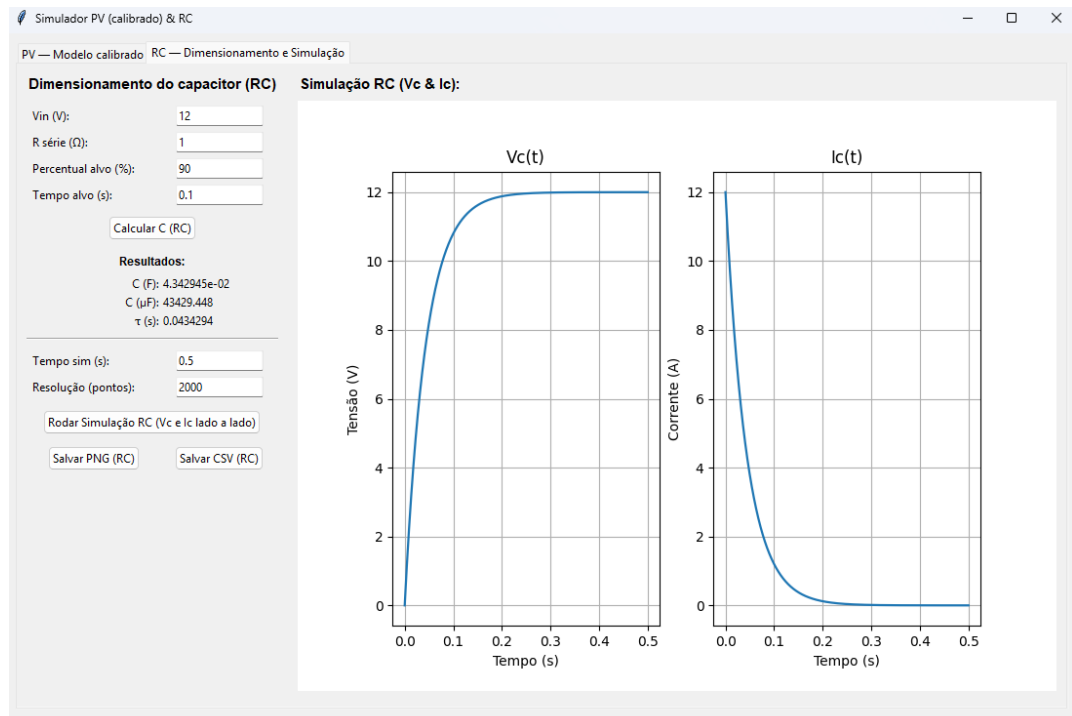
Como:

$$-\ln(1 - P) = \ln\left(\frac{1}{1 - P}\right) \quad (20)$$

Então:

$$\tau = RC = \frac{t_{alvo}}{\ln\left(\frac{1}{1 - P}\right)} \quad (21)$$

Figura 323: Software de apoio (Dimensionamento do Capacitor)



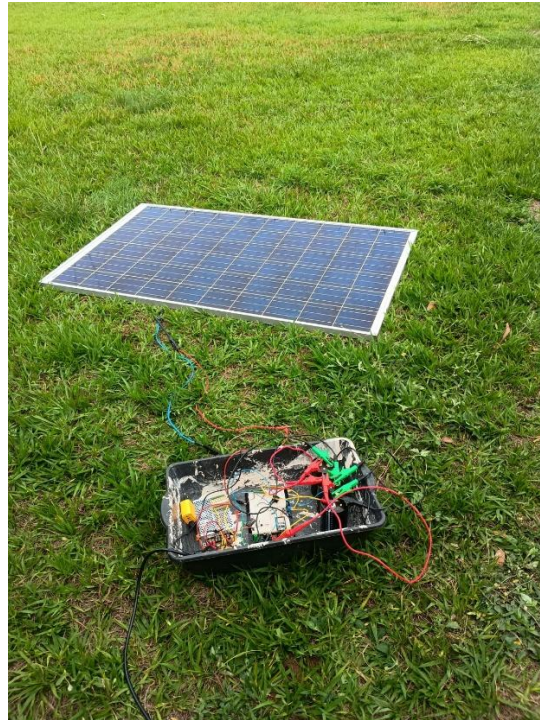
Fonte: Próprio autor.

## 5 RESULTADOS

A etapa de coleta de dados foi conduzida nas dependências da instituição de ensino, utilizando uma unidade fotovoltaica do modelo SolarWorld SW245-POLY para fins de experimentação. Sobre este módulo foi testado o circuito projetado no trabalho, respeitando a topologia previamente definida e todas as configurações estabelecidas para o traçador de curvas.

O circuito empregado na coleta, respeitava todos os parâmetros teóricos definidos anteriormente. Na etapa de medição, adotou-se um divisor resistivo utilizando dois resistores de  $470\ \Omega$  conectado à saída do módulo fotovoltaico, cuja função era reduzir a tensão medida em um fator de  $1/2$  para compatibilidade com a faixa operacional do sensor de aquisição. Paralelamente, o sistema utilizava três capacitores de  $4800\ \mu F$  conectados em paralelo, formando o banco de carga destinado ao traçado da curva I–V por meio do método da carga capacitiva. A associação paralela dos capacitores possibilitava uma divisão de corrente proporcional, resultando em uma redução de três vezes no valor da corrente que chegava ao sensor, permitindo ao INA-219 operar dentro de sua região segura. A Figura 34 ilustra o teste em andamento.

Figura 334: Testes do circuito elaborado.

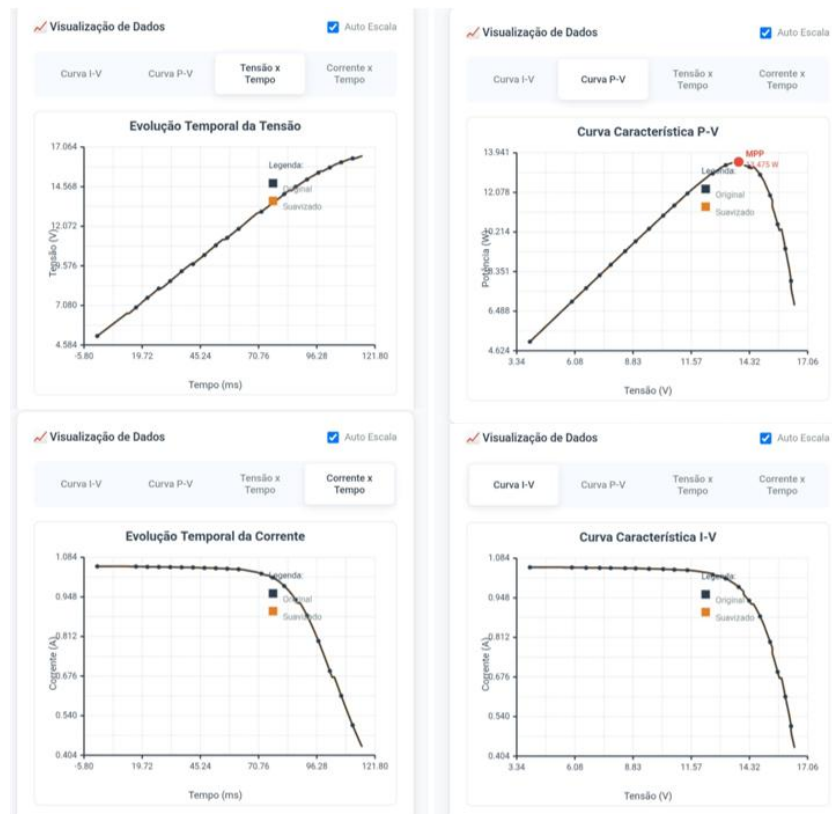


Fonte: Próprio autor.

Com o circuito montado, foram iniciados os ensaios experimentais. A placa SolarWorld SW245-POLY foi submetida à varredura gerada pelo sistema de controle, acionado a partir da interface. Cada varredura consistiu na carga controlada do banco de capacitores, enquanto o sensor realizava a leitura simultânea de tensão e corrente, registrando cada ponto.

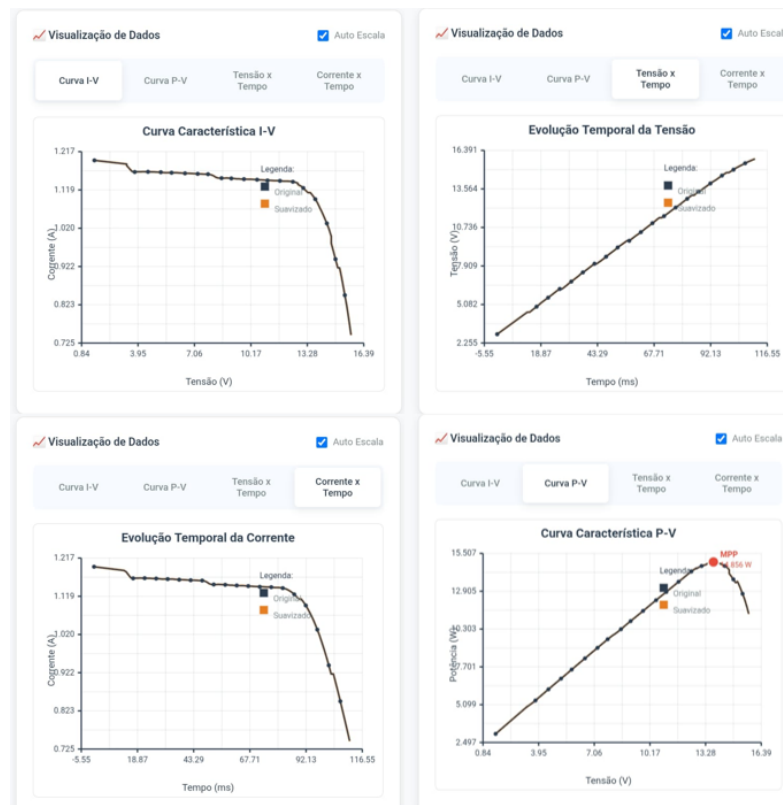
O procedimento experimental foi repetido dez vezes, visando garantir repetibilidade e confiabilidade estatística às medições. Ao final de cada execução, os dados coletados eram armazenados. A Figura 35 e Figura 36 ilustram padrões de coleta provenientes dos testes coleta 1 e coleta 4 respectivamente. Deve ser ressaltado que nos testes não foram aplicados os multiplicadores, ou seja, os valores são dados brutos e não corrigidos em função do divisor de tensão e da associação em paralelo do banco de capacitores.

Figura 345: Dados gráficos da coleta de número 1



Fonte: Próprio autor.

Figura 356 Dados gráficos da coleta de número 4



Fonte: Próprio autor.

É importante destacar que todas as coletas foram realizadas em condições climáticas não ideais. No momento dos ensaios, o ambiente apresentava céu nublado, baixa incidência solar e leve garoa, por volta das 10 horas da manhã. Tais condições impactaram significativamente a irradiância incidente sobre o módulo, resultando em valores de tensão, corrente e potência inferiores aos parâmetros nominais do datasheet.

De acordo com o datasheet do fabricante da placa SW245-POLY, os valores indicados na Tabela 1 representam os dados de operação da placa em testes com condições ideais.

Para com as coletas realizadas em campo, a Tabela 2, ilustra os dados aferidos e suas médias. Um ponto importante a ser ressaltado com relação a tabela de dados é que diferentemente dos resultados coletados, a tabela teve a aplicação de multiplicadores, trazendo os valores para próximo aos valores reais, neste caso foi empregado o multiplicador de duas vezes para a tensão e um multiplicador de três vezes para a corrente.

**Tabela 1:** Dados da placa SW245-POLY em condições ideais.

| Voc (V) | Isc (A) | Vmp (V) | Imp (A) | Pmax (W) |
|---------|---------|---------|---------|----------|
| 37,5    | 8,49    | 30,8    | 7,96    | 245      |

Fonte: Próprio autor.

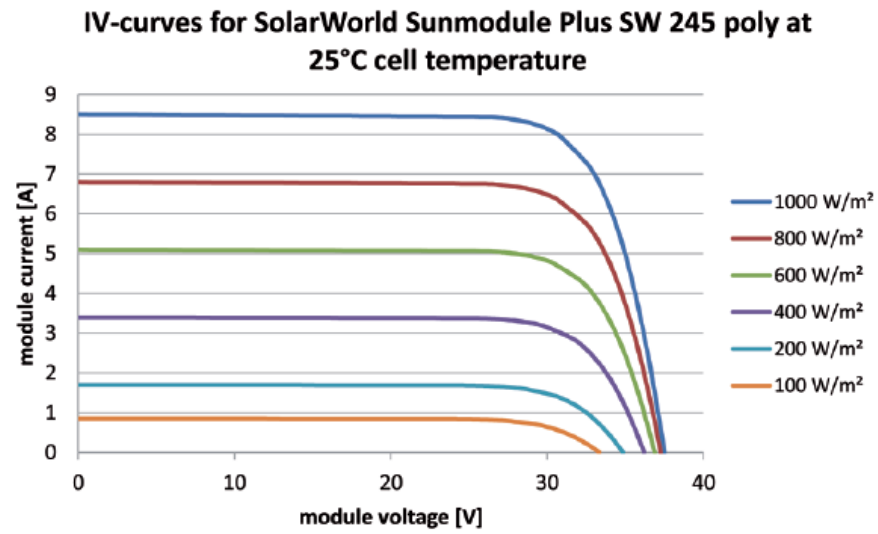
**Tabela 2:** Dados coletados experimentalmente.

| Coleta    | Voc (V) | Isc (A) | Vmp (V) | Imp (A) | Pmax (W) |
|-----------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Coleta 1  | 32,88   | 3,15    | 27,616  | 2,928   | 80,85    |
| Coleta 2  | 30,48   | 3,39    | 27,552  | 3,116   | 85,86    |
| Coleta 3  | 30,7    | 3,43    | 27,744  | 3,118   | 86,53    |
| Coleta 4  | 31,37   | 3,58    | 27,936  | 3,188   | 89,13    |
| Coleta 5  | 31,98   | 3,68    | 27,968  | 3,296   | 92,12    |
| Coleta 6  | 32,18   | 3,96    | 27,296  | 3,524   | 96,21    |
| Coleta 7  | 33,37   | 3,9     | 27,6    | 3,484   | 96,14    |
| Coleta 8  | 32,68   | 4,09    | 27,272  | 3,515   | 95,86    |
| Coleta 9  | 32,58   | 3,9     | 27,2    | 3,542   | 96,35    |
| Coleta 10 | 33,71   | 4,53    | 28,096  | 4,062   | 114,13   |
| Média     | 32,19   | 3,76    | 27,628  | 3,377   | 93,32    |

Fonte: Próprio autor.

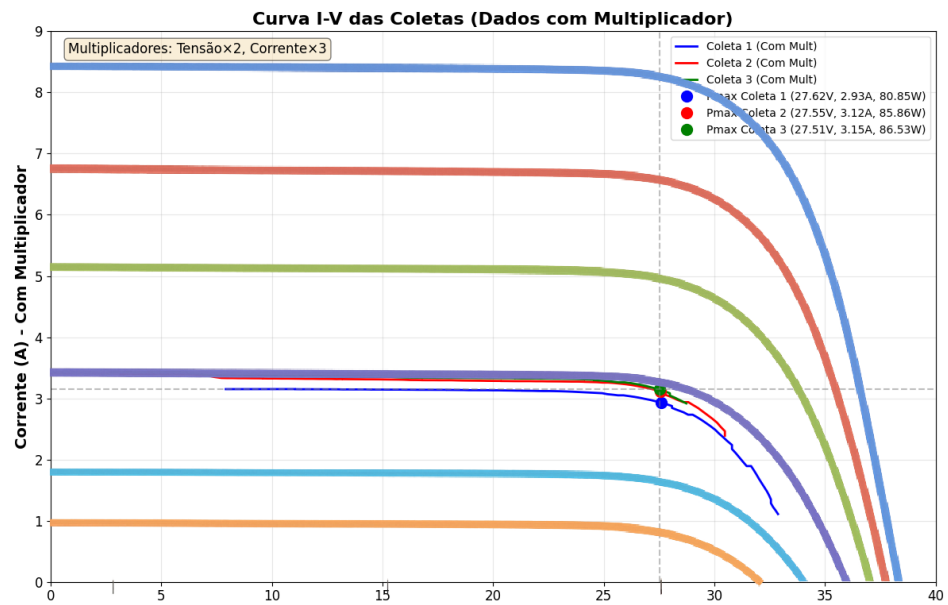
A partir dos resultados, foi feita a comparação entre os dados do fabricante com os dados coletados nos testes, assim como é ilustrado pelas Figura 37 e Figura 38, sendo está, uma sobreposição dos dados coletados com os dados de datasheet.

Figura 367: Curva I-V do datasheet da placa.



Fonte: SolarWorld.

Figura 378: Sobreposição dos dados coletados com o datasheet.



Fonte: Próprio autor.

## 6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste projeto permitiu integrar fundamentos teóricos, simulações computacionais, programação embarcada e montagem experimental de um traçador de curva fotovoltaica baseado no método da carga capacitiva.

A reestruturação completa do protótipo mostrou-se essencial para superar limitações observadas na fase inicial, especialmente relacionadas ao acionamento inadequado do MOSFET pelo ESP-32 e às restrições de faixa do sensor INA-219. Ao implementar um conjunto formado por optoacoplador, transistor e relé de 12 V, o sistema ganhou confiabilidade, isolamento e maior segurança para operar com módulos fotovoltaicos reais.

O software desenvolvido em Python complementou o protótipo, permitindo o dimensionamento de capacitores segundo critérios definidos pelo usuário, e visualização de curvas I-V e P-V com base em parâmetros dos módulos. Essa integração entre software e hardware ampliou substancialmente a utilidade do projeto, permitindo análises comparativas entre o comportamento idealizado e o experimental.

Com relação a integração dos códigos de operação da placa ESP-32, pode ser concluído que esta etapa se demonstrou bem-sucedida, permitindo a integração e versatilidade das propostas a princípio concebidas, sendo através desta possível a modelagem da interface de operação do projeto.

Embora o INA-219 tenha limitado algumas medições, as soluções implementadas como divisores de tensão e reorganização do banco de capacitores permitiram manter a coerência dos resultados dentro das faixas possíveis, em ambiente de testes. As adaptações realizadas demonstram que, o sensor de aquisição das medidas INA-219 se torna uma problemática e limitado para a aplicações, para torná-lo adequado, deve ser modificado sua estrutura ou adicionar elementos ao circuito, o que acaba por consequência trazendo com sigo um maior número elementos para o projeto.

Para a etapa de testes, pode ser concluído que o circuito desenvolvido é capaz de gerar curvas I-V e P-V coerentes e repetíveis, mesmo sob condições ambientais adversas. A discrepância com os parâmetros nominais do SW245-Poly se explica principalmente pela baixa irradiância no momento dos ensaios e as condições climáticas. O datasheet informa uma tolerância de medição aproximadamente 3 % que deve ser considerada quando se compara medições em campo com valores de fábrica. A irradiação no momento não foi aferida, mas pode ser aproximada na sobreposição de dados. Pode ser visto que os valores coletados se aproximam

da curva referente a  $400 \text{ W/m}^2$ , que se trata de uma irradiação solar média que se enquadra com as condições climáticas descritas.

Para trabalhos futuros, pode ser estudado um novo sensor para aquisição das leituras, permitindo uma maior flexibilidade e precisão, bem como o incremento do projeto com a criação de uma placa de circuito e a implementação de uma bateria, assim tornando-o um dispositivo móvel e com maior versatilidade.

## Referências

Araújo, Ana, L. P.; Lopes, Arthur, V.; Moreira, Adson, B. Topologias em Traçador de Curva I-V Para Módulos Fotovoltaicos. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Fortaleza, 01 de junho de 2020.

Braga, R. P. Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações. Rio de Janeiro: Dissertação de Obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista, 2008.

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

Campos, E. R. Desenvolvimento e Construção de Um Protótipo de Traçador Eletrônico de Curva I-V Para a Análise de Módulos e Strings Fotovoltaicos. Campinas: Dissertação de Mestrado, 2009.

INTELNRAS. Modulo Fotovoltaico Intelbrasemst 380w Monocristalino. 2025. Disponível em: < <https://www.intelbras.com/pt-br/modulo-fotovoltaico-monocristalino-de-380-w-emst-380m> >. Acesso em: 27 de setembro de. 2025.

Gasparin, F.P. Desenvolvimento de Um Traçador de Curva Característica de Módulos Fotovoltaicos. Porto Alegre: Dissertação de Mestrado, 2009.

Ibrahim A. “Analysis of Electrical Characteristics of Photovoltaic Single Crystal Silicon Solar Cells at Outdoor Measurements,” Smart Grid and Renewable Energy. Tanta, 2011.

Oliveira, F. S. Desenvolvimento de Traçador de Curva I-V Portátil Para Arranjos Fotovoltaicos Porto Alegre: Dissertação de Mestrado, 2009.

SALDANHA, Emmanuel L. C.; MACHADO, Mateus C.; CARRARO, Cintia F. F.; FERNANDES, Camila B. Simulação e análise de potência de placas fotovoltaicas para variações de temperatura e irradiação. Brazilian Journal of Development, Rio de Janeiro, 14 de outubro de 2019, 10 p. Disponível em: < (PDF) Simulação e análise de potência de placas fotovoltaicas para variações de temperatura e irradiação >. Acesso em: 07 de fevereiro de 2025.

SolarWorld, Disponível em: [https://s3.amazonaws.com/ecodirect\\_docs/SOLARWORLD/SW245\\_Poly.pdf](https://s3.amazonaws.com/ecodirect_docs/SOLARWORLD/SW245_Poly.pdf). Acesso em: 09 de dezembro de 2025

Solometric Corporation, Guide To Interpreting I-V Curve Measurements of PV Arrays Application Note PVA-600-1, 01 de Março de 2011, 23 p. Disponível em: < [https://www.academia.edu/32770314/Guide\\_To\\_Interpreting\\_I\\_V\\_Curve\\_Measurements\\_of\\_PV\\_Arrays](https://www.academia.edu/32770314/Guide_To_Interpreting_I_V_Curve_Measurements_of_PV_Arrays) >. Acesso em: 09 de fevereiro de 2025.

Spertino, F. Capacitor charging method for I–V curve tracer and MPPT in photovoltaic systems. Turim, 24 de Julho 2015, Disponível em: <  
[https://www.researchgate.net/publication/280566361\\_Capacitor\\_charging\\_method\\_for\\_I-V\\_curve\\_tracer\\_and\\_MPPT\\_in\\_photovoltaic\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/280566361_Capacitor_charging_method_for_I-V_curve_tracer_and_MPPT_in_photovoltaic_systems)>. Acesso em 11 de agosto de 2025.

TEXAS INSTRUMENTS. INA219 – Zero-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor With I<sup>2</sup>C Interface. [S. l.], 2009. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/249609/TI/INA219.html>. Acesso em: 11 de outubro. 2025.

Villalva, Marcelo Gradella. Energia Solar Fotovoltaica Conceitos e Aplicações Sistemas Isolados e Conectados à Rede. São Paulo: Érica, 2012. 224 p.