



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE SOBRAL
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FRANCISCO MATHEUS DOS ANJOS PESSOA

**IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE TRAÇADOR DE
CURVA IV PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

SOBRAL

2024

FRANCISCO MATHEUS DOS ANJOS PESSOA

**IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE TRAÇADOR DE
CURVA IV PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Monografia apresentada ao curso de engenharia elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Vanessa Siqueira de Castro Teixeira
Coorientador: Prof. Dr. Adson Bezerra Moreira

SOBRAL

2024

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

P567i Pessoa, Francisco Matheus dos Anjos Pessoa.
IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE TRAÇADOR DE CURVA IV PARA
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS / Francisco Matheus dos Anjos Pessoa Pessoa. – 2024.
80 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral,
Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2024.

Orientação: Profa. Dra. Vanessa Siqueira de Castro Teixeira .
Coorientação: Prof. Dr. Adson Bezerra Moreira.

1. Curva IV. 2. Módulo Fotovoltaico. 3. Traçador IV de baixo custo. I. Título.

CDD 621.3

FRANCISCO MATHEUS DOS ANJOS PESSOA

**IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE TRAÇADOR DE
CURVA IV PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Monografia apresentada ao curso de engenharia elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em: 26/09/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Vanessa Siqueira de Castro Teixeira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcus Rogério de Castro
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Leonardo Pires de Sousa Silva
EEEP Gerardo Cristino De Menezes

A Deus.

Aos meus pais, Viviane e Fernando.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder fé para nunca desistir.

A toda minha família que sempre me encorajou e não me deixou desanimar. Me deram todo suporte necessário para que chegasse até aqui.

A minha namorada, Bia, sou grato pela companhia nas noites viradas e nos sonhos de profissão que compartilhamos.

Aos meus amigos e colegas, pelas palavras de apoio e por estarem sempre dispostos a me ajudar.

Ao IFCE, pela disponibilidade do equipamento utilizado neste trabalho.

Sou muito grato também por todo apoio, conselho e encorajamento da minha orientadora Prof^ª. Dr^ª. Vanessa e do meu orientador Prof. Dr. Adson.

Aos professores participantes da banca examinadora pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

“Nenhuma grande descoberta foi feita jamais
sem um palpite ousado.”

(Isaac Newton)

RESUMO

Devido ao aumento contínuo da demanda por fontes renováveis de geração de energia em todo o mundo, o uso de geradores fotovoltaicos se torna cada vez mais comum, sendo assim, é essencial avaliar e diagnosticar o desempenho e a vida útil dos módulos fotovoltaicos. No que diz respeito aos painéis solares um dos principais modos de análise de funcionalidade desse equipamento é a curva IV, que é uma relação entre a corrente do módulo e sua tensão em condições de temperatura e irradiância constantes. Os fabricantes de módulos dispõem em seus catálogos e datasheets tal curva em condições de teste padrão (STC). Entretanto, a obtenção da curva IV em situações reais de operação ainda é um desafio, devido ao custo elevado dos equipamentos de medição e ao grande número de variáveis envolvidas no processo de construção dessa curva. Logo, neste trabalho demonstra-se a implementação de um traçador de curva IV de baixo custo. O protótipo projetado utiliza uma carga capacitiva para obtenção dos pontos que compõe a curva, em que esses pontos são registrados pelo ARDUINO e salvos em um arquivo de texto que posteriormente é processado pelo MATLAB, que foi o software adotado como interface gráfica. A validação do protótipo é realizada comparando os resultados com um traçador comercial. Nesta análise, entre as curvas demonstra-se um bom desempenho do protótipo comparado ao traçador comercial, nas em condições de sol pleno, com erro máximo de 6,9% na temperatura e apenas 6,6% na irradiância. As tensões e correntes máximas do Módulo fotovoltaico apresentaram erros inferiores a 3% em todos os ensaios. Já em condições de sombreamento, o protótipo demonstra oscilações maiores de corrente e não consegue realizar a captura completa da curva devido a interação da carga com parâmetros internos do módulo. No entanto, mesmo incompleta, a curva IV medida nessa situação revelou-se útil para análise gráfica.

Palavras-chave: Curva IV; Módulos Fotovoltaicos; Traçador de baixo custo.

ABSTRACT

Due to the increasing demand for renewable energy sources worldwide, the use of photovoltaic generators is becoming more common. Therefore, it is essential to assess and diagnose the performance and lifespan of photovoltaic modules. Concerning solar panels, one of the primary methods for analyzing the functionality of this equipment is the IV curve, which represents the relationship between module current and voltage under constant temperature and irradiance conditions. Module manufacturers provide this curve in their catalogs and datasheets under standard test conditions (STC). However, obtaining the IV curve under real operating conditions remains challenging due to the high cost of measurement equipment and the numerous variables involved in constructing this curve. This work demonstrates the implementation of a low-cost IV curve tracer. The designed prototype uses a capacitive load to obtain the points that form the curve, with these points being recorded by ARDUINO and saved in a text file processed later by MATLAB, chosen as the graphical interface software. The prototype's validation involves comparing results with a commercial tracer. In this analysis, the prototype shows good performance compared to the commercial tracer under full sunlight conditions, with a maximum error of 6.9% in temperature and only 6.6% in irradiance. The maximum voltages and currents of the photovoltaic module exhibited errors of less than 3% in all tests. However, under shading conditions, the prototype exhibits greater current fluctuations and fails to capture the complete curve due to interactions between the load and the module's internal parameters. Nevertheless, even incomplete, the IV curve measured in this situation proved useful for graphical analysis.

Keywords: IV Curve; Photovoltaic Modules; Low-cost Tracer,

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeito fotovoltaico em uma célula solar típica	16
Figura 2 – Módulo fotovoltaico e seus componentes	17
Figura 3 – Curvas características IV e PV de um MFV	18
Figura 4 – Circuito simplificado que representa uma célula ou módulo FV	18
Figura 5 – Influência da variação da irradiância à uma temperatura constante de 25°C	20
Figura 6 – Influência da variação da temperatura à uma irradiância constante de 1000W/m ²	21
Figura 7 – Influência da variação de Rs e Rp na curva IV	22
Figura 8 – Diagramas SFI e SFCR	23
Figura 9 – Alterações na curva IV	25
Figura 10 – Traçador de curva IV comercial Solar I-Ve, SOLAR-02	26
Figura 11 - Esquemático de um traçador de curva IV	26
Figura 12 - Esquemático do método capacitivo para um traçador de curva IV	27
Figura 13 – Circuito para captura IV de um módulo FV, simulado no ambiente SIMULINK	28
Figura 14 – Tempo de estabilização dos parâmetros I e V no tempo com a capacitância de 6600µF	28
Figura 15 – Arduino UNO e seus componentes	29
Figura 16 – Circuito divisor de tensão	30
Figura 17 – Sensor de Corrente	31
Figura 18 – Sensor de irradiância utilizado.	32
Figura 19 - Dispersão para obtenção da equação de calibração	33
Figura 20 – Sensor de temperatura utilizado	34
Figura 21 – Diagrama de ligação do protótipo	35
Figura 22 - Protótipo montado	36
Figura 23 - Protótipo completo	37
Figura 24 – Fluxograma representativo do código implementado	38
Figura 25 – Arquivo .txt obtido após medição da curva	39
Figura 26 - Curvas medidas e plotadas pelo script implementado no MATLAB.....	40
Figura 27 – Elementos que compõem o traçador comercial utilizado	41
Figura 28 – Representação do madeiramento e do módulo fixado por meio do kit de fixação comercial	42
Figura 29 - Demonstração dos sensores de irradiância fixados no trilho	43
Figura 30 - Demonstração dos sensores temperatura fixados no módulo	43
Figura 31 – Demonstração das conexões	44

Figura 32 – Fluxograma que representa a captura sequencial dos ensaios	45
Figura 33 – Situação de sombreamento 1	46
Figura 34 - Situação de sombreamento 2	46
Figura 35 - Situação de sombreamento 3	47
Figura 36 – Teste de validação 1	49
Figura 37 – Teste de validação 2	50
Figura 38 – Teste de validação 3	51
Figura 39 – Teste de validação 4	52
Figura 40 – Corrente próxima de I_{sc}	53
Figura 41 – Tensão próxima de V_{oc}	54
Figura 42 – Erros obtidos nas situações de sol pleno	55
Figura 43 – Condição de sombreamento 1	56
Figura 44 – Condição de sombreamento 2	57
Figura 45 – Condição de sombreamento 3	58
Figura 46 – Erros obtidos nas situações de sombreamento	59
Figura 47 – Comparação de curvas	60
Figura 48 – Resultado obtido antes da calibração do sensor de corrente	67
Figura 49 – Calibração de corrente.....	69
Figura 50 - Resultado obtido depois da calibração do sensor de corrente	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de irradiância	33
Tabela 2 – Especificações técnicas do módulo utilizado	41
Tabela 3 – Principais variáveis do teste de validação 1	48
Tabela 4 – Principais variáveis do teste de validação 2	50
Tabela 5 - Principais variáveis do teste de validação 3	51
Tabela 6 – Principais variáveis do teste de validação 4	52
Tabela 7 – Principais variáveis do teste de sombreamento 1	56
Tabela 8 - Principais variáveis do teste de sombreamento 2	57
Tabela 9 – Obtenção dos valores AD medidos a partir da corrente	68
Tabela 10 – Erros após a calibração de corrente das principais variáveis medidas pelo protótipo	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
IV	Corrente <i>versus</i> tensão
PV	Potência <i>versus</i> tensão
SFV	Sistema Fotovoltáico
SFI	Sistema Fotovoltáico Isolado
SFCR	Sistema Fotovoltáico Conectado à Rede
MFV	Módulo Fotovoltáico
STC	<i>Standart Test Conditions</i>
EVA	<i>Ethylene-Vinyl Acetate</i>
ISE	<i>Solar Energy Systems</i>
CA	Corrente Alternada
DC	Corrente Contínua
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
MC4	<i>Multi-Contact 4 mm</i>
AD	Analógico/Digital
SNTEP	Secretaria Nacional de Transição Energética e Planejamento
IRENA	Agência Internacional de Energia Renovável
GD	Geração distribuída
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

LISTA DE SÍMBOLOS

I	Corrente de saída
I_{ph}	Corrente fotogerada
V	Tensão de saída
R_s	Resistência série
R_p	Resistência paralela
V_t	Tensão térmica da junção pn
m	Fator de idealidade do diodo
G	Irradiância em que a célula está submetida
G_{STC}	Irradiância STC
α_1	Coefficiente de temperatura para I_{sc}
T_c	Temperatura da célula
T_{stc}	Temperatura STC
k	Constante de Boltzmann
q	Carga elementar do elétron
T_{cel}	Temperatura da célula
V_{in}	Tensão de entrada
I_{sc}	Corrente de curto circuito
V_{oc}	Tensão de circuito aberto
I_{mp}	Corrente de máxima potência
V_{mp}	Tensão de máxima potência
P_{mp}	Ponto de máxima potência
R	Resistor
C	Capacitor
T	Constante de tempo de um circuito RC

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Modulo fotovoltaico	15
2.1.1	Caracterização de módulos FV	17
2.2	Modelo Matemático	18
2.3	Influências externas na Curva Característica	20
2.4	Influências internas na Curva Característica	21
2.5	Comissionamento de sistemas fotovoltaicos	22
2.5.1	Ensaio de curva IV conforme a NBR16274:2014	24
2.6	Traçadores de Curva IV	25
3	PROJETO DO TRAÇADOR	27
3.1	Carga variável utilizada	27
3.2	Microcontrolador utilizado e sensores para captura dos pontos IV e parâmetros externos	29
3.2.1	Sensores utilizados	30
3.2.1.1	Sensor de Tensão	30
3.2.1.2	Sensor de Corrente	31
3.2.1.3	Sensor de Irradiância	32
3.2.1.4	Sensor de Temperatura	34
3.3	Implementação do protótipo	34
3.3.1	Aquisição e processamento dos dados	37
3.4	Procedimento de validação do protótipo	40
3.4.1	Sombreamento parcial	45
3.4.1.1	Sombreamento parcial 1	45
3.4.1.2	Sombreamento parcial 2	46
3.4.1.3	Sombreamento parcial 3	47
4	RESULTADOS	47
4.1	Ensaio de validação 1	48
4.2	Ensaio de validação 2	49
4.3	Ensaio de validação 3	50
4.4	Ensaio de validação 4	51
4.5	Resumo dos resultados a sol pleno	52
4.6	Ensaio em situação de sombreamento 1	55
4.7	Ensaio em situação de sombreamento 2	56
4.8	Ensaio em situação de sombreamento 3	58

4.9 Resumo dos ensaios de sombreamento	58
5 CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica se consolidou como uma grande possibilidade de atender à crescente necessidade de consumo de energia elétrica de forma renovável e sustentável. Segundo o Boletim Mensal de Energia do mês de maio de 2024, publicado pela Secretaria Nacional de Transição Energética e Planejamento (SNTEP), o crescimento da capacidade instalada da geração distribuída (GD) solar no Brasil cresceu 39,1% em relação a maio de 2023. E a capacidade instalada de solar centralizada (não GD) avançou, 48,2% em relação ao mesmo mês do ano anterior. Grande parte do crescimento da (GD), no Brasil, foi impulsionado por políticas públicas, como a Lei nº 14.300/2022, que garantiu isenção da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) até 2045 para sistemas instalados até janeiro de 2023. (MME, 2024)

Em cenário global as Estatísticas de Capacidade Renovável de 2023, publicada pela Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), mostram a capacidade de geração renovável, no final do ano de 2022, aumentou 295GW em relação ao ano anterior, e que a energia solar lidera a expansão com um aumento total de 192GW sendo que a energia solar fotovoltaica representou quase esse aumento todo, sendo responsável por 191 GW. (IRENA, 2023)

Portanto, a partir do crescimento do setor fotovoltaico, também cresce a necessidade de avaliação e diagnóstico contínuo dos módulos fotovoltaicos (MFV), tanto no âmbito profissional, quanto no âmbito educacional. Nesse cenário, nota-se que os traçadores de curva IV para módulos fotovoltaicos são ferramentas essenciais, pois permitem determinar parâmetros como corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, potência máxima de módulos fotovoltaicos. Além disso, permitem o diagnóstico gráfico de possíveis defeitos nos equipamentos. (OLIVEIRA et al., 2018)

Existem diversos modelos de traçadores de curva IV disponíveis comercialmente, baseados em diferentes métodos conhecidos na literatura. Entre os métodos mais utilizados estão o resistor variável, carga eletrônica, carga capacitiva, conversores DC-DC e fontes de potência de quatro quadrantes. O método de carga capacitiva é o comum comercialmente, onde os dados são obtidos durante o carregamento de um banco de capacitores, capturando os pontos desde o curto-circuito até o circuito aberto.

Assim, diante do contexto abordado, este trabalho propõe a implementação de um protótipo de traçador de curvas IV, pelo método capacitivo, utilizando equipamentos de baixo

custo, com intuito de dinamizar e simplificar o seu desenvolvimento, bem como demonstrar a possibilidade de construção desse equipamento para uso educacional, visando fornecer uma solução acessível para caracterização de módulos fotovoltaicos, o que permite facilitar o aprendizado e a prática em instituições de ensino.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é medir a curva IV de um módulo fotovoltaico por meio de um protótipo implementado pelo método capacitivo, além de validar a eficácia desse equipamento, comparando-o com um traçador comercial. Para isso, é necessário implementar um circuito de medição da curva IV a partir do microcontrolador Arduino, desenvolver um script para controlar o protótipo na aquisição dos dados, executar testes em condições semelhantes em ambos os equipamentos e comparar graficamente as curvas medidas pelo protótipo com as obtidas por um traçador comercial. Além disso, é essencial calcular o erro percentual entre as principais variáveis medidas por ambos, tanto em condições de sol pleno quanto em condições de sombreamento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Modulo fotovoltaico

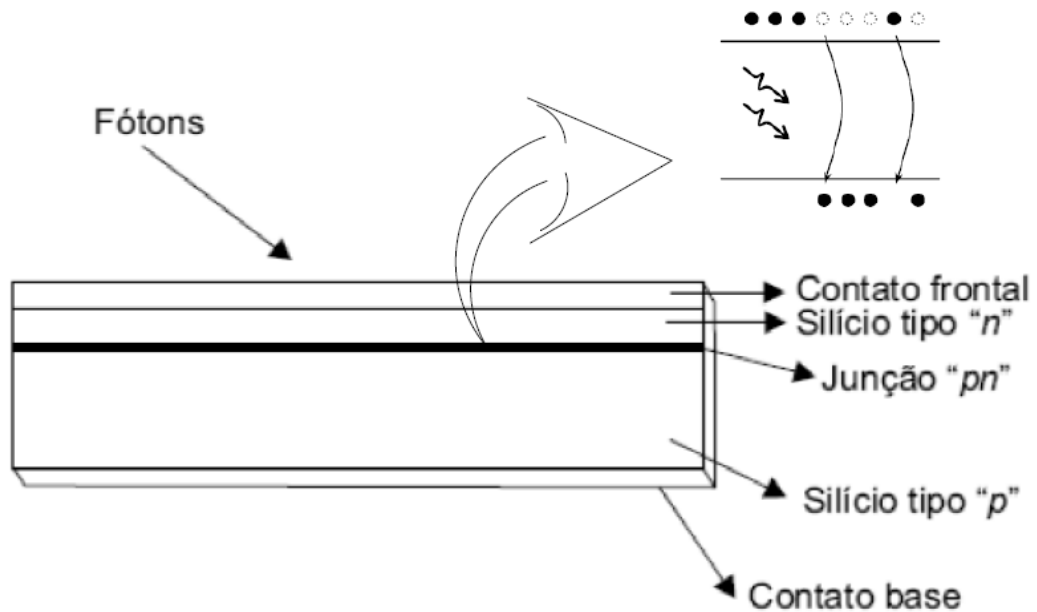
Para conversão de energia proveniente da radiação solar em energia elétrica é necessário um fenômeno denominado efeito fotovoltaico e a célula fotovoltaica é responsável por realizar tal conversão. A célula fotovoltaica é em geral, um dispositivo construído com silício dopado, em duas camadas, formando uma junção PN, bem como um diodo semiconductor.

O silício, em sua forma pura, é um semiconductor intrínseco, caracterizado pela sua estrutura cristalina. No entanto, ao introduzir impurezas específicas, conhecidas como dopantes, o silício passa a ser classificado como um semiconductor extrínseco. O tipo de semiconductor resultante "n" ou "p" é determinado pelo número de elétrons na camada de valência dos átomos dopantes.

Dopantes que doam elétrons extras, como o fósforo, criam um semiconductor do tipo "n", enquanto dopantes que criam lacunas, como o boro, resultam em um semiconductor do tipo "p". Para que ocorra o efeito fotovoltaico no silício, a energia do fóton proveniente da

radiação solar deve ser suficiente para excitar um elétron da banda de valência. Na Figura 1, abaixo é possível visualizar o efeito fotovoltaico em uma célula. (ARAUJO, 1992)

Figura 1 – Efeito fotovoltaico em uma célula solar típica

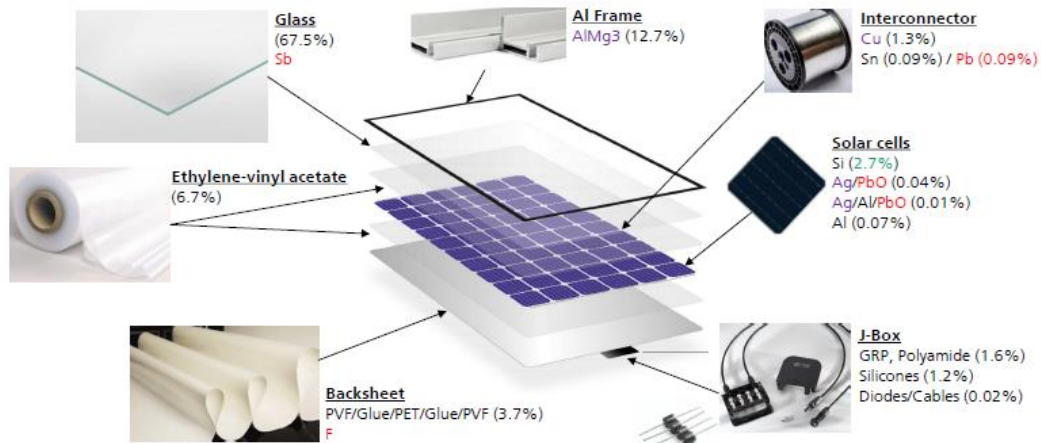


Fonte: Scussel (2020, com adaptações).

Sendo a célula fotovoltaica o menor dispositivo fotovoltaico que existe, produzem pouca energia, assim os módulos fotovoltaicos que são estruturas formadas pela conexão de células FV em série e/ou paralelo, aumentando as tensões e correntes geradas. (GAZOLI, 2012).

De acordo com Gasparin (2009), a estrutura de um módulo é composta por diversas camadas: cobertura, encapsulante, cobertura traseira, moldura e caixa de conexões. O vidro temperado é o material mais utilizado na camada de cobertura, devido à sua alta transparência e facilidade de limpeza. Já o acetato de etileno-vinila, conhecido como EVA (Ethylene-Vinyl Acetate), é o encapsulante preferido por sua excelente aderência às células fotovoltaicas. A Figura 2 abaixo, demonstra bem as camadas especificadas, ainda é possível observar, na Figura a porcentagem de cada elemento que compõe um MFV típico.

Figura 2 – Módulo fotovoltaico e seus componentes



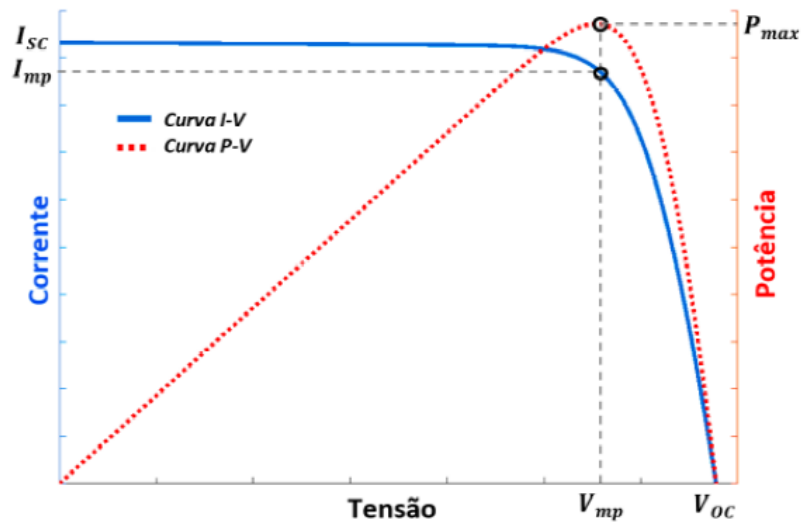
Fonte: Fraunhofer ISE (2024 com adaptações).

2.1.1. Caracterização de módulos FV

Uma das principais formas de caracterização dos módulos fotovoltaicos é a curva IV, que em geral é disponibilizada pelos fabricantes de módulos, em seus manuais e datasheets em condições específicas denominadas condições de teste padrão ou STC (do inglês, *Standard Test Conditions*). Essas condições são atendidas quando a irradiância solar no plano incidente do módulo é igual a 1000 W/m^2 , temperatura da célula é igual a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e massa de ar (AM) igual a 1,5. (REIS, 2018).

A partir da curva IV de um módulo, obtém-se a curva PV que nada mais é que a multiplicação de cada par ordenado IV *versus* a tensão do módulo. Além disso, nessas curvas, destaca-se alguns pontos, como demonstrado na Figura 3, abaixo, tais pontos incluem a corrente de curto-circuito (I_{sc}), onde a tensão é zero e a corrente é máxima, indicando a corrente máxima que o módulo pode gerar; a tensão de circuito aberto (V_{oc}), onde a corrente é zero e a tensão é máxima, mostrando a maior tensão que o módulo pode alcançar sem carga. O Ponto de Máxima Potência ($P_{m\acute{a}x}$) ocorre onde a multiplicação da corrente e tensão é maior, refletindo a potência máxima que o módulo pode fornecer. A corrente (I_{mp}) e a tensão no ponto de máxima potência (V_{mp}) são as respectivas corrente e tensão onde o módulo opera com máxima eficiência.

Figura 3 – Curvas características IV e PV de um MFV



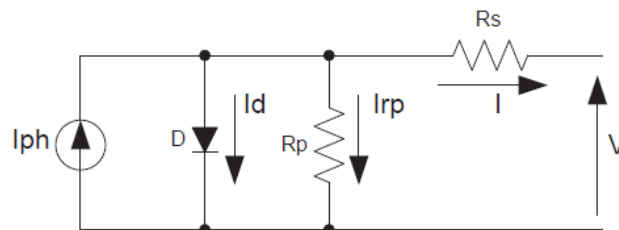
Fonte: Araújo et al. (2020).

2.2. Modelo Matemático

Na literatura é possível encontrar alguns modelos matemáticos que representam as células e conseqüentemente os módulos fotovoltaicos, para este trabalho, é apresentado o modelo cujo circuito equivalente é demonstrado na Figura 4.

Esse modelo considera a corrente fotogerada (I_{ph}), o diodo (D), representando os fenômenos de condução intrínsecos da célula fotovoltaica, considera ainda a resistência série (R_s) que representa as perdas nos contatos metálicos do módulo e também a resistência em paralelo (R_p) que representa as perdas devido às correntes parasitas que circulam o módulo. (COSTA,2010)

Figura 4 – Circuito simplificado que representa uma célula ou módulo FV



Fonte: COSTA (2010).

A partir da análise do circuito da Figura 5, obtém-se a equação 1, a qual é demonstrada com mais detalhes por Costa (2010).

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{V+I.R_s}{m.V_t}} - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad [01]$$

Onde:

- I (A): Corrente de saída;
- I_{ph} (A): Corrente fotogerada;
- I_0 (A): Corrente de saturação reversa do diodo;
- V (V): Tensão de saída;
- R_s (Ω): Resistência série;
- R_p (Ω): Resistência paralela;
- V_t (V): Tensão térmica da junção pn;
- m: Fator de idealidade do diodo.

Além disso, a corrente fotogerada de uma célula solar depende das propriedades do material utilizado, da área da célula, do nível de irradiação solar e da sua temperatura (SANTOS, 2017). Essa corrente pode ser calculada pela equação 2, abaixo.

$$I_{ph} = I_{ph,STC} - \frac{G}{G_{STC}} \cdot [1 + \alpha_1(T_c - T_{STC})] \quad [02]$$

Onde:

- $I_{ph,STC}$ (A): Corrente fotogerada em condições de teste padrão;
- G (W/m^2): Irradiância em que a célula está submetida;
- G_{STC} (W/m^2): Irradiância STC – $1000W/m^2$;
- α_1 (A/K): Coeficiente de temperatura para I_{sc} ;
- T_c (K): Temperatura da célula;
- T_{stc} (K): Temperatura STC – 278K.

Outra variável que deve ser descrita é a tensão térmica, que pode ser calculada pela Equação 3.

$$V_t = \frac{k \cdot T_c}{q} \quad [03]$$

Onde:

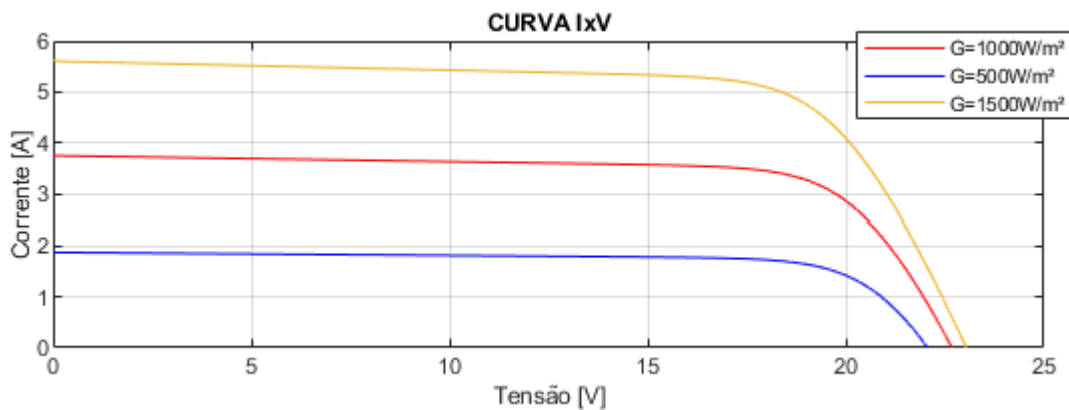
- k: Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K);
- q: Carga elementar do elétron ($1,609 \times 10^{-19}$ C)
- T_{cel} (K): Temperatura da célula;

A partir das equações 01, 02 e 03 e com informações de datasheet é possível estimar parâmetros elétricos através de métodos matemáticos. Além disso, com manipulações algébricas das equações e algumas considerações é possível relacionar diretamente a corrente I_{sc} de um módulo com a irradiância a que ele é submetido, tendo assim uma possibilidade de adaptar células solares para medir irradiância. (SANTOS, 2017)

2.3. Influências externas na Curva Característica

Como é possível observar pelas equações, a irradiância e a temperatura são fatores de extrema influência nas curvas IV. Em uma temperatura constante, ao aumentar a irradiância, a corrente de curto-circuito aumenta proporcionalmente. A Figura 5 ilustra o efeito desse aumento da irradiância na curva IV a uma temperatura constante de 25°C e uma irradiância variando entre 500 à 1500 W/m^2 .

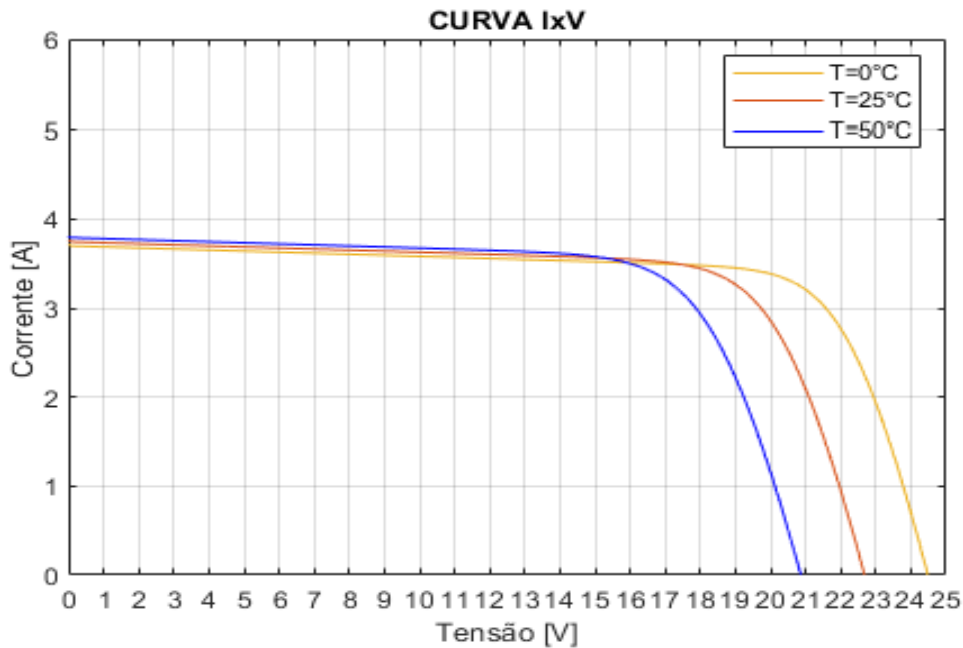
Figura 5 – Influência da variação da irradiância à uma temperatura constante de 25°C



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em condições de irradiância constante, o aumento da temperatura resulta em um pequeno aumento na corrente de curto-circuito e uma redução na tensão de circuito aberto. Diferentemente da irradiância, cujo aumento desloca o ponto de potência máxima para cima, o aumento da temperatura desloca o ponto de potência máxima em direção ao centro do gráfico, como pode ser observado na curva IV mostrada na Figura 6, abaixo.

Figura 6 – Influência da variação da temperatura à uma irradiância constante de 1000W/m^2



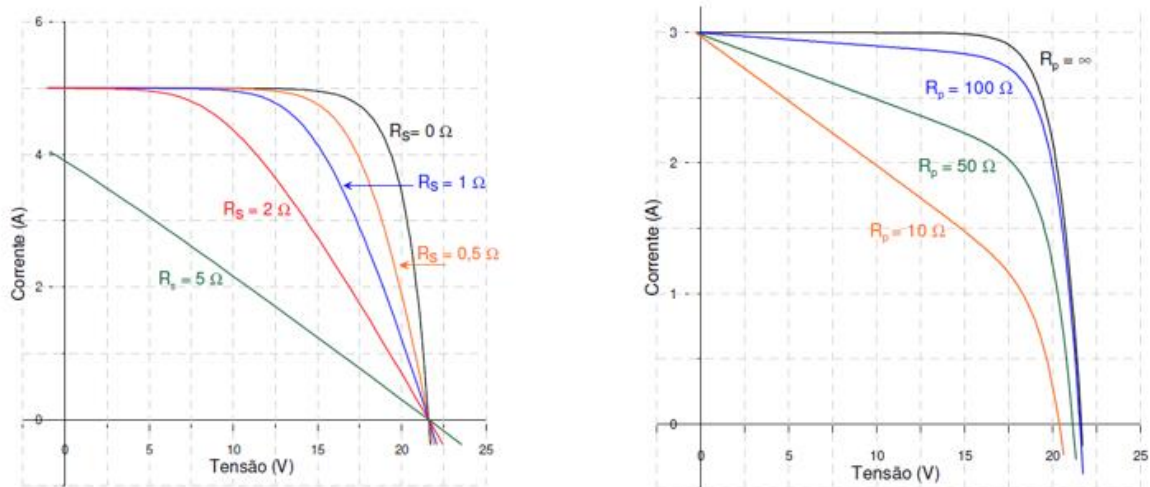
Fonte: Elaborada pelo autor.

2.4. Influências internas na Curva Característica

Segundo o modelo matemático abordado, é possível inferir que as resistências intrínsecas aos módulos geram alterações específicas na curva IV, como é demonstrado a seguir na Figura 7, onde é possível observar o efeito da variação de R_s e nota-se os efeitos da variação de R_p .

A variação da resistência série R_s afeta a inclinação da curva nas proximidades da tensão de circuito aberto, sendo assim, quanto maior for a queda de tensão em R_s , menor é a inclinação da curva, reduzindo assim os pontos de máxima potência. Já a variação da resistência paralela R_p tem o efeito de alterar a inclinação da curva em pontos próximos da corrente de curto-circuito, quanto menor for a resistência, maior corrente circulará em R_p , prejudicando assim a corrente de saída do módulo. (SANTOS, 2017)

Figura 7 – Influência da variação de R_s e R_p na curva IV



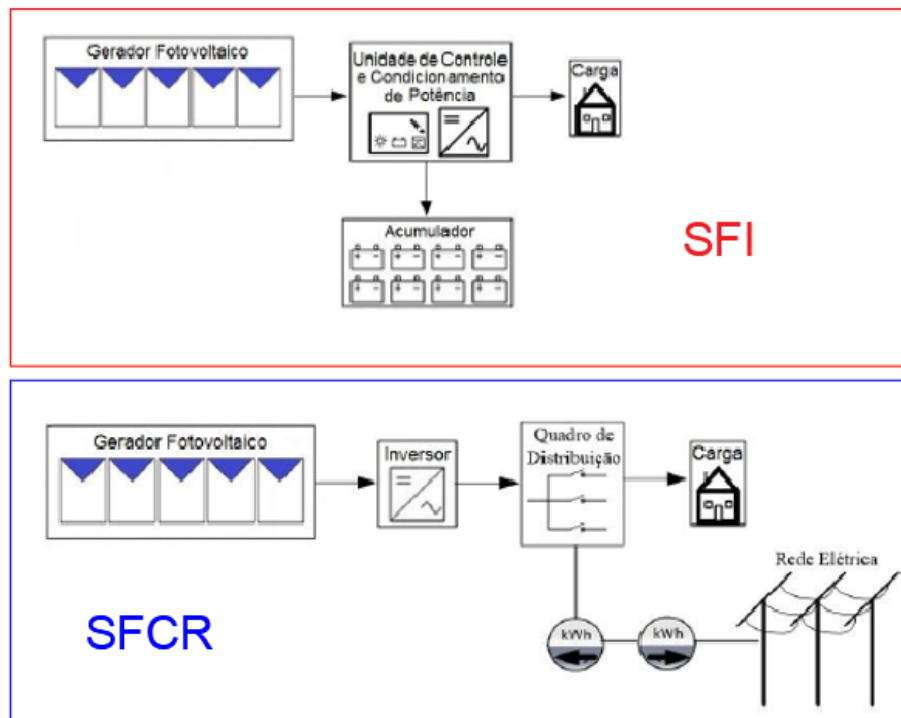
Fonte: Gasparin (2018, com adaptações).

2.5. Comissionamento de sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos (SFV) são classificados em duas categorias principais sendo essas: sistemas isolados (SFI) e sistemas conectados à rede (SFCR). Os sistemas isolados contemplam um grupo de sistemas em que a energia proveniente dos módulos é consumida apenas no local de geração, podendo ter o armazenamento de energia, ou não, são exemplos de SFI, sistema de bombeamento solar, sistemas isolados de telecomunicações e/ou cerca elétrica.

Já os sistemas conectados à rede, são sistemas cuja energia gerada é em algum ponto conectada à rede elétrica local, permitindo que seja utilizada por unidades consumidoras conectadas ao sistema de distribuição, tal sistema tem sido cada vez mais utilizado em muitos países, inclusive no Brasil (PINHO,2014). Na Figura 8 mostra-se um diagrama típico de um SFI e de um SFCR.

Figura 8 – Diagramas SFI e SFCR



Fonte: Pinho (2014, com adaptações).

A NBR 16274:2014 é a norma que descreve requisitos mínimos para documentação, verificação e avaliação de desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Essa norma define os ensaios de comissionamento como sendo medições em uma instalação elétrica, por meio das quais o seu correto funcionamento é comprovado.

Essa norma especifica regimes de ensaios em duas categorias, sendo a primeira, a sequência mínima de ensaios que deve ser aplicada a todos os sistemas, independentemente do tamanho, complexidade ou localização do mesmo. Essa primeira categoria é composta pela lista de ensaios a seguir.

- Ensaio de circuitos C.A. segundo a IEC60364-6;
- Continuidade da ligação à terra;
- Ensaio de polaridade;
- Ensaio de caixa de junção
- Ensaio de corrente das séries fotovoltaicas (curto-circuito ou operacional)
- Ensaio de tensão de circuito aberto das séries fotovoltaicas
- Ensaios funcionais
- Ensaios de resistência de isolamento dos circuitos

Já a segunda categoria de ensaios é destinada a sistemas maiores ou mais complexos, sendo esses necessários mesmo após o sistema ter sido aprovado. Essa segunda categoria contempla basicamente dois ensaios, sendo esses ensaios listados abaixo.

- Ensaio de curva IV da série fotovoltaica
- Inspeção com câmera infravermelha

Além disso, cada ensaio é demonstrado com detalhes na norma citada neste tópico. Para este trabalho, o estudo se limita ao ensaio de curva IV cujo as recomendações da norma são descritas no subtópico a seguir.

2.5.1 Ensaios de curva IV conforme a NBR16274:2014

Inicialmente a série ou arranjo fotovoltaico que se deseja testar deve ser isolado(a) e conectado(a) ao dispositivo de medição utilizado, sendo que se o teste IV, for apenas para medição de V_{oc} e I_{sc} , não é necessário que o dispositivo utilizado meça irradiância ou temperatura de costa de célula.

Para medições de potência e análise de curvas recomenda-se que os ensaios sejam realizados a uma irradiância de pelo menos 700W/m^2 , medida no plano dos módulos, em um momento do dia em que o sol esteja iluminando diretamente o arranjo, com ângulo de incidência não superior a $22,5^\circ$.

Após a conclusão do ensaio, o valor de máxima potência deve ser corrigido para as condições STC e comparado com o valor de placa do arranjo em ensaio. O valor medido deve estar dentro da tolerância de potência indicada para módulos juntamente com uma tolerância para a precisão do dispositivo e de ensaio.

Além da potência e outros parâmetros elétricos a curva IV fornece informações importantes sobre possíveis defeitos e ou irregularidades de funcionamento, como é possível observar na Figura 9 abaixo, onde é demonstrado algumas alterações observadas na curva IV, sendo os possíveis motivos descritos conforme a indicação descrita abaixo.

1 – Variação de corrente, arranjo sujo ou obstruído, módulo degradado, problemas de calibração ou de medição no sensor de irradiância, sensor de irradiância não montado no plano do arranjo, irradiância variou durante a medição da curva;

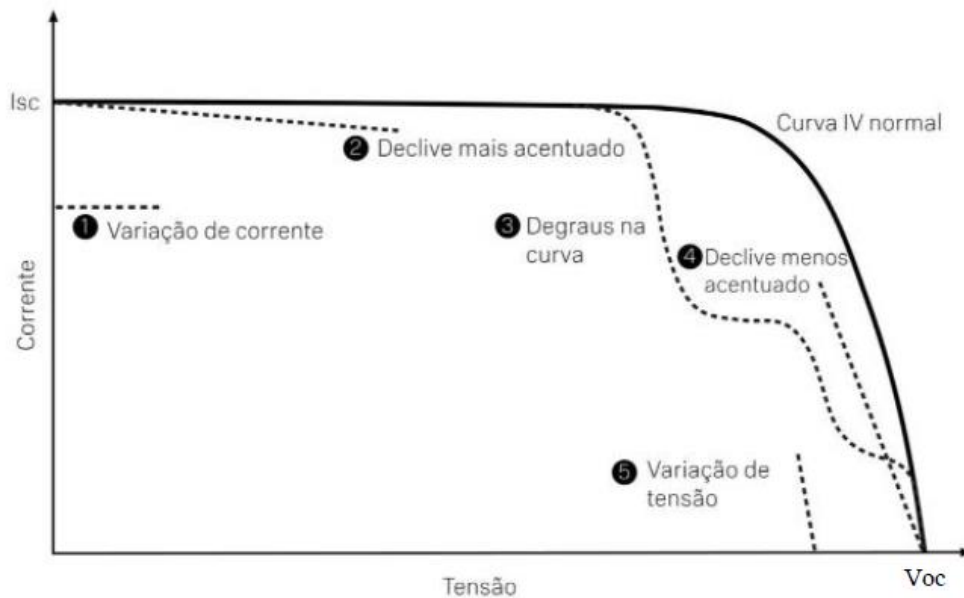
2 - Caminhos shunt nas células (hotspots), descasamento de I_{sc} entre células ou módulos, em certas situações de sombreamento;

3- Arranjo parcialmente sombreado, célula/módulo danificado ou sombreado;

4- Falha nas interconexões entre módulos ou entre células, aumento da resistência série (resistência extra de cabos e conexões);

5- Sombreamento significativo e uniforme no arranjo, diodo em condução.

Figura 9 – Alterações na curva IV



Fonte: NBR16274 (2014, com adaptações).

2.6. Traçadores de Curva IV

Conforme Pinho (2014), o traçador de curva IV portátil é a melhor ferramenta disponível no mercado para verificar e caracterizar módulos ou arranjos fotovoltaicos em campo, esses equipamentos microprocessados, dotados de sensores de irradiância e temperatura que permitem fazer medições precisas e confiáveis. A utilização desse tipo de equipamento permite a determinação dos principais parâmetros elétricos, permitindo a identificação de anomalias e problemas em módulos ou arranjos instalados em campo, sendo muito mais eficientemente do que métodos manuais de medição. Traçadores operam realizando uma varredura ao longo de toda a faixa de tensão de operação do módulo, obtendo os pontos da curva IV, além da curva PV. Na Figura 10, abaixo é possível visualizar o conjunto de um traçador de curva IV comercial, juntamente com seu sensor de temperatura e sua célula de referência para medição de irradiância.

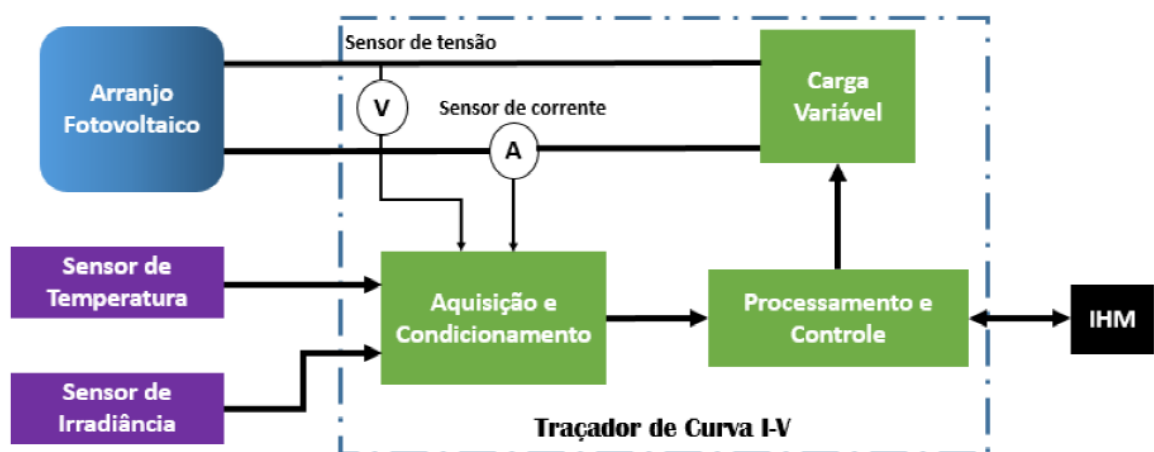
Figura 10 – Traçador de curva IV comercial Solar I-Ve, SOLAR-02



Fonte: HT instruments (2024).

Araújo et al. (2020) relata que a varredura da curva IV por um traçador é realizada a partir de uma carga variável que pode ser de caráter resistivo, capacitivo ou eletrônico, tais cargas caracterizam o método de medição da curva e a topologia do traçador. Além disso o traçador é um equipamento constituído por diversos estágios, bem como é apresentado no esquemático da Figura 11.

Figura 11 - Esquemático de um traçador de curva IV



Fonte: Araújo et al. (2020).

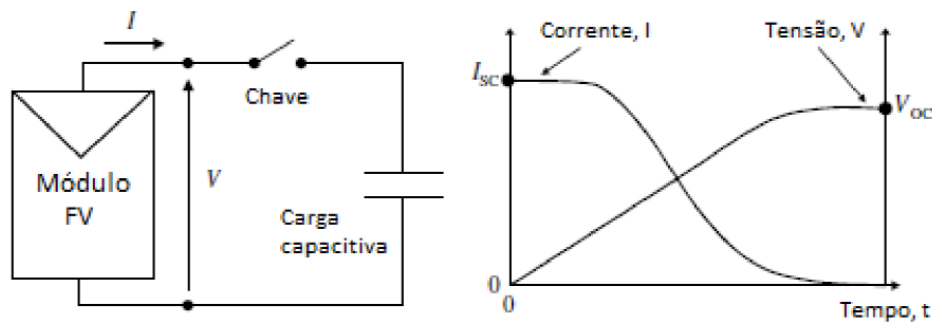
3 PROJETO DO TRAÇADOR

3.1. Carga variável utilizada

Luna (2016) afirma que um dos métodos mais utilizados no mercado em traçadores de curva IV é o método capacitivo que utiliza como carga um banco de capacitores a fim de realizar a varredura da curva durante o transitório de carga do banco. Isso é possível devido ao comportamento intrínseco aos capacitores que inicialmente, estando descarregados, possuem característica de um curto circuito e após serem carregados operam como um circuito aberto, fazendo com que as grandezas medidas variem de zero até seu valor máximo.

Segundo Muñoz (2016) o tempo de aquisição de dados por esse método pode durar dezenas de milissegundos, sendo essa característica uma das principais vantagens desse método. A Figura 12, mostra o esquema típico da utilização da carga capacitiva para traçadores, bem como o comportamento da corrente e da tensão em um capacitor típico.

Figura 12 - Esquemático do método capacitivo para um traçador de curva IV



Fonte: Araújo et al. (2020).

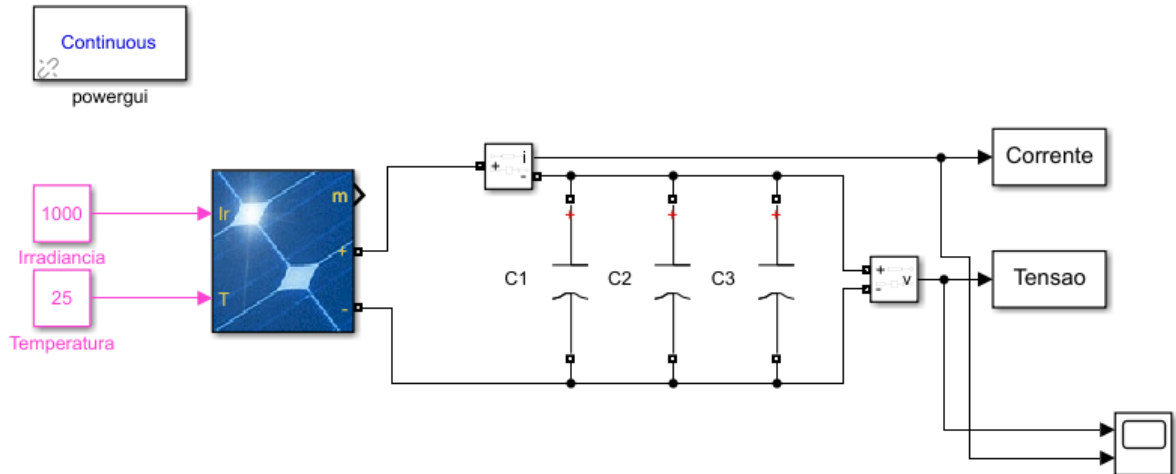
A partir disso, nota-se que o tempo de captura é proporcional ao tempo de carga/descarga, do capacitor utilizado, sendo que esse tempo pode ser estimado pela análise do circuito RC, que contempla o modelo equivalente do capacitor escolhido bem como o modelo equivalente do módulo FV.

Entretanto, Santos et al. (2017) relata que para considerar a mínima variação da temperatura e da irradiância no teste de curva IV e evitar perdas de informação durante a medição, uma faixa de varredura entre 100 e 500ms é adotada.

Assim, a capacitância do capacitor utilizado neste trabalho é definida computacionalmente por meio de simulações no ambiente SIMULINK, segundo o circuito mostrado na Figura 13, abaixo. Percebe-se, pela figura que no circuito simulado considera-se uma associação de três capacitores, sendo esses capacitores de $2200\mu\text{F}$, a divisão é feita de modo a utilizar capacitores disponíveis comercialmente. É importante ressaltar que o módulo

utilizado na simulação é configurado conforme o datasheet do módulo utilizado nos ensaios práticos.

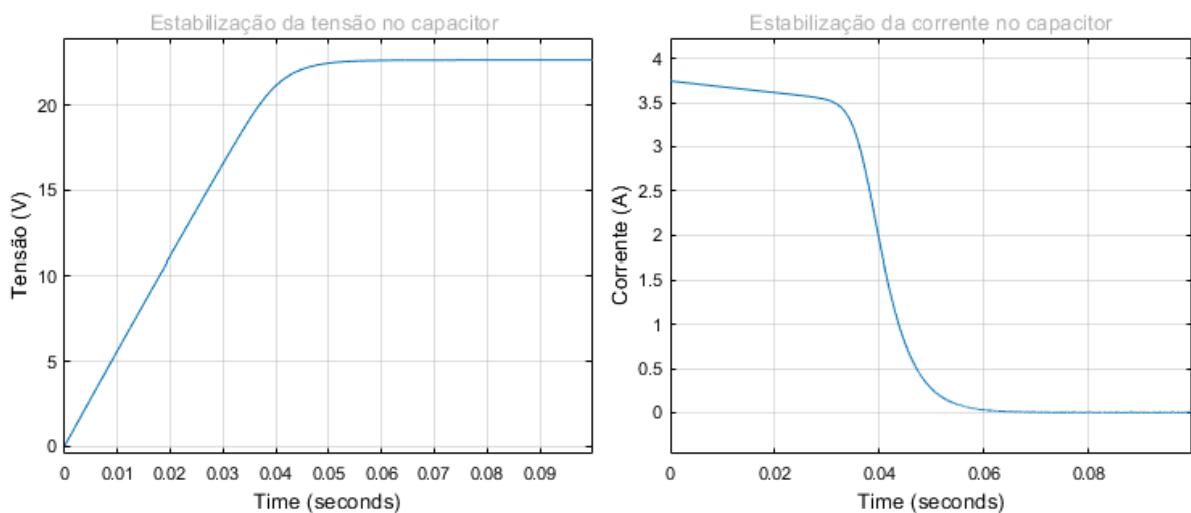
Figura 13 – Circuito para captura IV de um módulo FV, simulado no ambiente SIMULINK



Fonte: Elaborada pelo autor.

Sendo assim, o banco utilizado possui uma capacitância teórica de $6600\mu\text{F}$, a fim de obter um tempo de aproximadamente 100ms, como pode ser observado pelo comportamento de estabilização temporal da tensão e da corrente na Figura 14. Nota-se que o tempo de varredura simulado é aproximadamente 0.09s, ou seja, 90ms para o carregamento do banco de capacitores escolhido.

Figura 14 – Tempo de estabilização dos parâmetros I e V no tempo com a capacitância de $6600\mu\text{F}$



Fonte: Elaborada pelo autor.

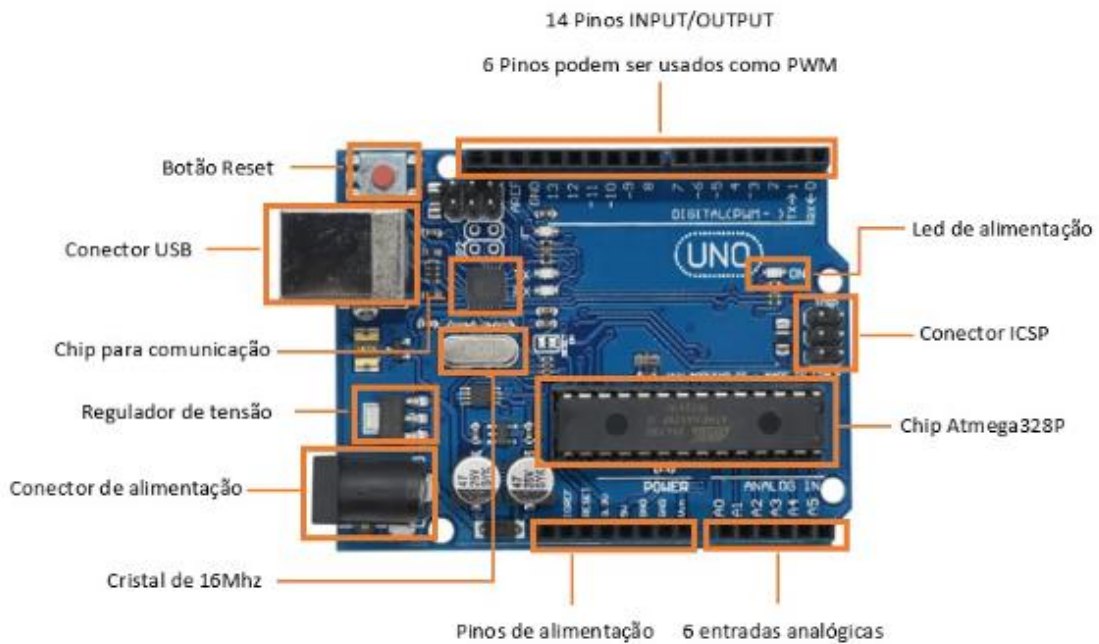
Sendo definido o tempo esperado para varredura é utilizado três capacitores Epcos B41231B0228M000, com capacitância de 2200uF e tensão de operação de até 80V DC, para compor a carga variável do protótipo. O nível de tensão adotado é definido com margem a fim de possibilitar medições de módulos comerciais que tipicamente possuem tensões máximas próximas de 50V.

3.2. Microcontrolador utilizado e sensores para captura dos pontos IV e parâmetros externos

Para ler e armazenar os dados de corrente e tensão no transitório da carga, é necessário um ótimo microcontrolador capaz de receber/converter dados rapidamente de forma serial, sem prejuízos de informação, além disso é necessário que bons sensores sejam utilizados para captura das grandezas a serem medidas.

Portanto, para este trabalho é utilizado o microcontrolador Arduino UNO. A tensão de operação desse microcontrolador é 5V e pode operar com uma taxa de transmissão serial de 2Mbps. A Figura 15 demonstra uma típica placa de um Arduino UNO, com as descrições de seus componentes e pinos.

Figura 15 – Arduino UNO e seus componentes



Fonte: Sta eletrônica (2024).

O conversor A/D desse Arduino possui 10 bits de resolução o que possibilita obter na saída um valor decimal que vai de 0 a 1023, como a referência de tensão é de 5V, para conseguir o valor de tensão real que se encontra no pino A/D é preciso converter o valor decimal lido, multiplicando pela fração $5/1023$. O software Arduino IDE (Integrated Development Environment), permite a programação e compilação de códigos, onde o upload do algoritmo é feito para a placa por meio do conector USB.

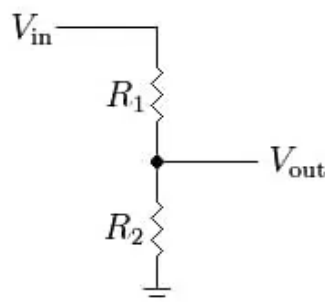
3.2.1. Sensores utilizados

Os sensores utilizados neste trabalho são apresentados nos subtópicos abaixo, bem como os métodos de calibração adotados, a fim de garantir o bom funcionamento e confiabilidade dos mesmos.

3.2.1.1. Sensor de Tensão

O divisor de tensão é um circuito bastante simples que pode ser utilizado como sensor de tensão para diversas aplicações. Na Figura 16 é possível observar um modelo típico de divisor de tensão. Neste trabalho, esse circuito é adotado para possibilitar a medição de tensão, de um módulo fotovoltaico, pelo Arduino que possui tensão de operação 5V. A relação que valida tal medição, é demonstrada na Equação 4. Os valores dos resistores R_1 e R_2 são escolhidos para possibilitar uma tensão na entrada máxima de aproximadamente 55V, sendo $R_1=10K\Omega$ e $R_2=1K\Omega$. Devido à variação da resistência de resistores comerciais, são medidos R_1 e R_2 a fim de garantir uma relação entre V_{in} e V_{out} , com mínimo erro possível. Sendo que os valores das resistências reais obtidos por meio de multímetro FLUKE foram de $R_1=9598,8\Omega$ e $R_2=933\Omega$, obtendo assim uma relação de calibração de 11,288.

Figura 16 – Circuito divisor de tensão



Fonte: Elaborada pelo autor.

$$V_{in} = \frac{V_{out} \cdot (R_1 + R_2)}{R_2} \quad [04]$$

Onde:

- $V_{in}(V)$: Tensão disponibilizada pelo MFV;
- $V_{out}(V)$: Tensão a ser lida pelo o A/D do Arduino;
- $R_1(\Omega)$: Resistor 10K;
- $R_2(\Omega)$: Resistor 1K;

Sendo definidas as resistências aplicáveis o sensor é validado por meio de medições de tensão em uma carga resistiva alimentada por uma fonte de bancada, onde a tensão é variada de 0 até 20V em intervalos de 1.5V e as medições obtidas pelo sensor, são comparadas com medidas obtidas em um multímetro FLUKE, obtendo assim um erro percentual menor que 5% em todas as medidas, validando a qualidade e precisão do sensor adotado, como pode ser observado pelos resultados apresentados mais adiante.

3.2.1.2. Sensor de Corrente

Para aquisição dos dados de corrente opta-se por um sensor de efeito hall típico em aplicações com o Arduino, demonstrado pela Figura 17. É utilizado o módulo sensor de corrente ACS712 com capacidade de medição de até 5A. Apesar do fabricante disponibilizar uma taxa fixa de 185mV/A para conversão, no datasheet desse equipamento que é disponibilizado no Anexo A, é possível encontrar informações que consta um offset no pino de saída de aproximadamente $V_{cc}/2$, sendo V_{cc} a tensão de alimentação do dispositivo, assim, como a tensão de alimentação desse sensor é 5V, a tensão disponibilizada no pino OUT quando não há corrente circulando entre IP+ e IP- é de aproximadamente 2.5V.

Figura 17 – Sensor de Corrente



Fonte: Circuits diy (2024).

O sensor é validado antes de ser acoplado ao protótipo, no qual respondeu muito bem. As medições de corrente obtidas pelo sensor por meio de uma média de 100 amostras, são comparadas com medições feitas com um alicate amperímetro FLUKE e obtém-se erros percentuais menores que 5%.

Entretanto, ao realizar os primeiros ensaios de curva IV com o protótipo montado, é identificada uma distância anormal entre as correntes capturadas pelo traçador comercial e as correntes capturadas pelo protótipo, sendo necessária uma nova calibração do sensor ACS712, tal calibração é apresentada no Anexo B.

3.2.1.3. Sensor de Irradiância

O sensor de irradiância utilizado, ZTS-300AL-RA-V05, é demonstrado na Figura 18, abaixo e, de acordo com o fabricante, é um sensor cuja alimentação é de 7V a 30V, com tensão de saída de 0 a 5V e é capaz de medir irradiâncias de 0 a 2000W/m². Esse sensor é calibrado de acordo com o dispositivo Solar Survey 200R, cujo datasheet é mostrado no Anexo C.

Figura 18 – Sensor de irradiância utilizado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Solar Survey 200R é uma ferramenta que possibilita medir irradiâncias por meio de uma célula solar de referência, sendo assim, para fazer a calibração do sensor de irradiância conecta-se a saída do sinal analógico do sensor em uma das portas AD do Arduino e utiliza-se um script para coletar as medições, paralelamente ao Solar Survey 200R, sendo que os dois sensores são colocados em uma mesma inclinação e a cada medição são registrados

manualmente os valores disponibilizados pelos dois sensores, obtém-se 15 amostras em condições diferentes de irradiação, as amostras são demonstradas na Tabela 1.

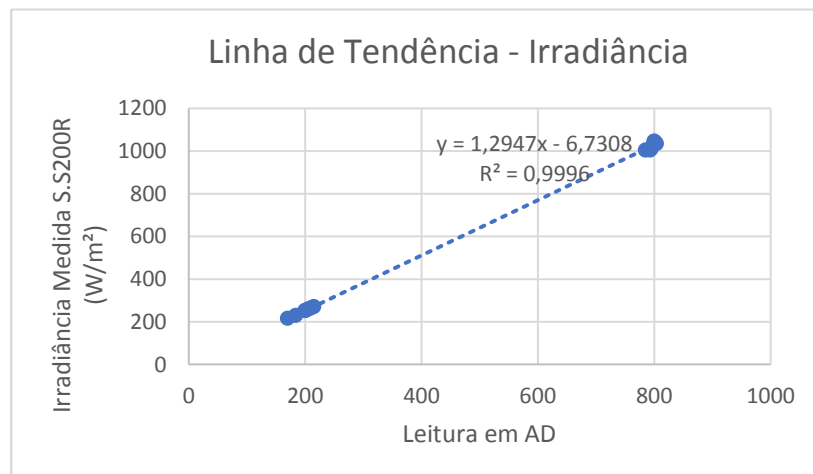
Tabela 1 – Dados de irradiação

Leitura AD	Irradiância medida S.S 200R (W/m ²)
170	216
184	230
804	1035
802	1042
800	1047
798	1028
795	1011
793	1005
785	1005
203	256
201	254
200	252
207	261
210	265
215	271

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir das medições obtidas, utiliza-se o software excel para encontrar a equação de calibração, por meio do gráfico de dispersão e da linha de tendência que determina a correlação entre as duas variáveis. Na Figura 19 abaixo é possível observar o gráfico mencionado bem como a equação adotada, é mostrado também o valor de R^2 que é o coeficiente de determinação que sendo próximo de 1 indica basicamente que a equação descreve bem a correlação entre as variáveis.

Figura 19 - Dispersão para obtenção da equação de calibração



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.1.4. Sensor de Temperatura

O sensor de temperatura, mostrado na Figura 20, escolhido para aplicação no protótipo foi o sensor DS18B20, que segundo o datasheet, disponibilizado no Anexo D, é alimentado com uma tensão de 2,7V a 5,5V e possui comunicação digital e mede temperaturas de -10°C a $+70^{\circ}\text{C}$ com uma precisão de $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$. Assim, para esse sensor, não se aplica uma calibração específica, mas utiliza-se da biblioteca `<DallasTemperature.h>` disponibilizada pelo Arduino que possibilita a leitura da temperatura em $^{\circ}\text{C}$.

Figura 20 – Sensor de temperatura utilizado



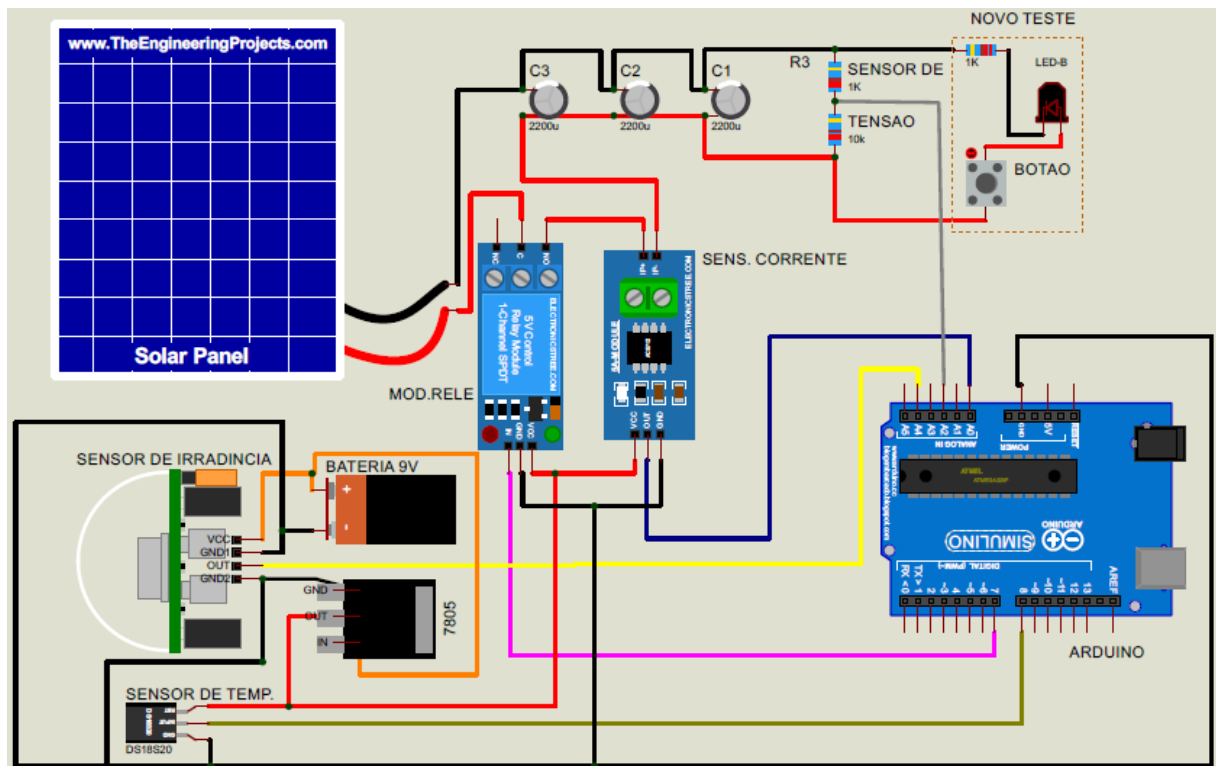
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3. Implementação do protótipo

Após serem definidos a carga e os sensores, inicia-se a implementação do protótipo. Para servir como chave, adota-se um módulo relé 5V para controlar o início e fim do teste, é adotada também uma fonte de alimentação externa de 9V para os sensores, pois o sensor de irradiância tem alimentação de no mínimo 7V e os outros não devem ser alimentados pelo Arduino, para que esse não sofra alterações em sua tensão de alimentação.

Assim, é utilizado o regulador de tensão 7805 para garantir o nível de tensão adequado para os sensores e módulo relé que são alimentados com 5V. No diagrama da Figura 22 é possível verificar como foram feitas as ligações pino a pino de todos os componentes utilizados, além de contemplar o esquemático do MFV, demonstrado exatamente onde esse deve ser conectado.

Figura 21 – Diagrama de ligação do protótipo



Fonte: Elaborada pelo autor.

O circuito (novo teste) demarcado com linhas tracejadas na Figura 21 tem a função de atenuar a energia residual nos capacitores proveniente da execução de um ensaio de curva IV e deve ser acionado pelo botão demonstrado apenas quando se passar pelo menos três minutos do final do teste anterior.

O tempo descrito é necessário, pois o protótipo não possui elementos específicos para dissipar a energia armazenada nos capacitores após cada teste, além disso, a partir da análise transitória do circuito RC formado pela carga capacitiva e o divisor resistivo, é possível obter a Equação 05 que descreve o comportamento da tensão na descarga do capacitor, sendo essa equação facilmente encontrada na literatura.

$$V_{c(t)} = E \cdot e^{-t/(R.C)} \quad [05]$$

Onde:

- $V_c(V)$: Tensão no capacitor durante a descarga no tempo t ;
- $E(V)$: Tensão no capacitor no instante em que a chave é aberta - Voc do MFV utilizado;
- $R(\Omega)$: Resistência equivalente do circuito RC - 11K Ω ;
- $C(F)$: Capacitância equivalente do circuito RC – 6600uF;
- $t(s)$: Tempo referente a descarga do capacitor.

Sendo assim, a Equação 5 pode ser reescrita e utilizada para calcular o tempo em função da tensão de descarga do capacitor, bem como é demonstrado pela Equação 06.

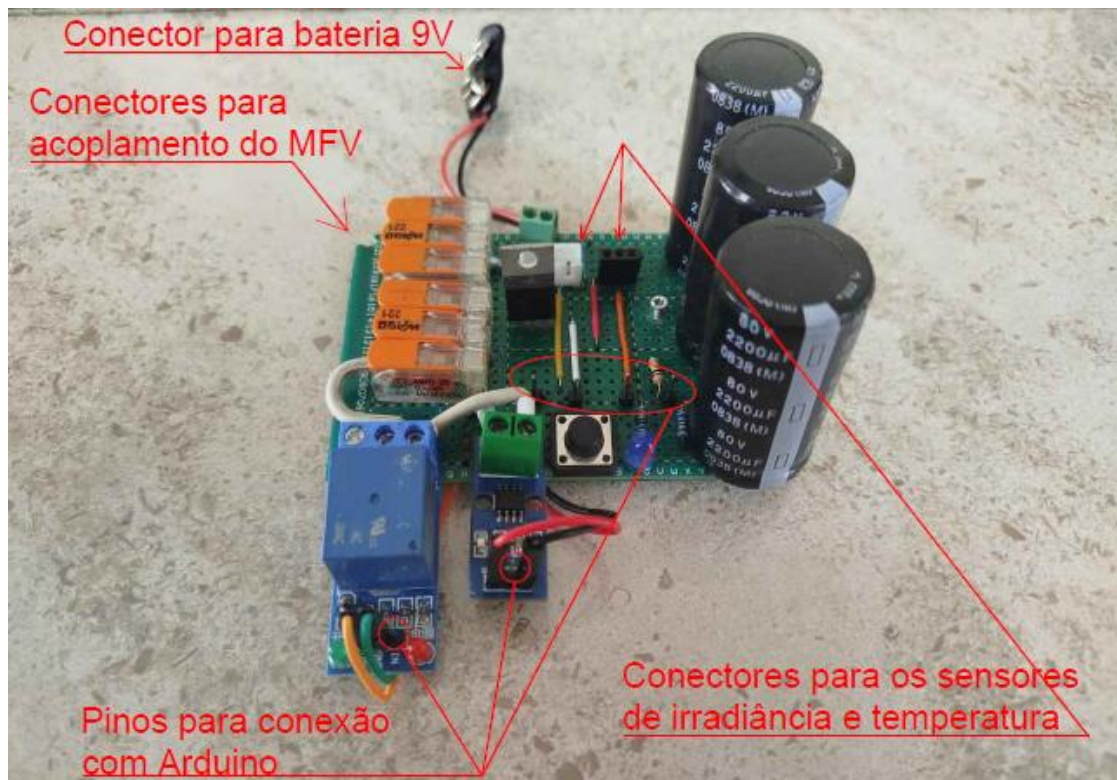
$$t = R \cdot C \cdot \ln \left(\frac{E}{V_c} \right) \quad [06]$$

Utilizando a Equação 6 adotando uma tensão segura para o acionamento do botão de $V_c = 5V$, e uma tensão máxima de carregamento de $E = 55V$, pôde-se obter o tempo de 174,08s. Sendo assim, conclui-se que um tempo de 3min é suficiente para que ocorra a descarga do capacitor a um nível aceitável para o acionamento do botão fazendo com que o nível de tensão no capacitor seja atenuado e chegue próximo a zero, para que seja iniciado um novo teste.

Com isso, resume-se os limites de atuação do protótipo, sendo a tensão máxima de até 55V, determinada pelo sensor de tensão, corrente máxima de 5A, determinada pelo sensor de corrente e tempo de espera entre testes de pelo menos 3min.

Após a definição de todos os materiais e determinando-se o diagrama de ligação do protótipo, o mesmo é montado fisicamente em uma placa perfurada 5x7cm, sendo que para as conexões diretas com o Arduino, são soldados pinos a fim de serem conectados posteriormente por meio de jumpers, como é demonstrado na Figura 22, abaixo.

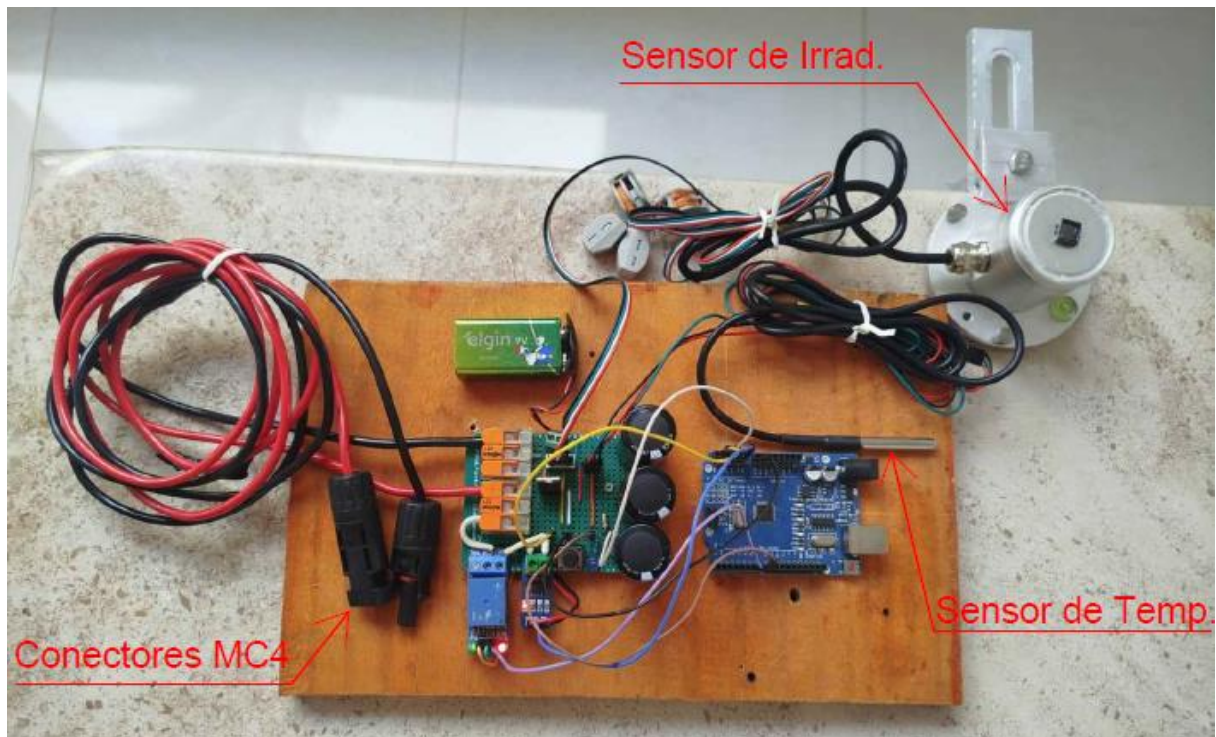
Figura 22 - Protótipo montado



Fonte: Elaborada pelo autor.

A placa perfurada com os elementos de circuitos é parafusada a uma base de madeira a fim de manusear o protótipo com mais segurança, bem como a placa Arduino utilizada, como é demonstrado na Figura 23 que contempla todos os elementos do protótipo. Nota-se que para os sensores/conectores que são colocados próximo ao MFV durante o teste, é utilizado um cabeamento de pelo menos 1,5m.

Figura 23 - Protótipo completo

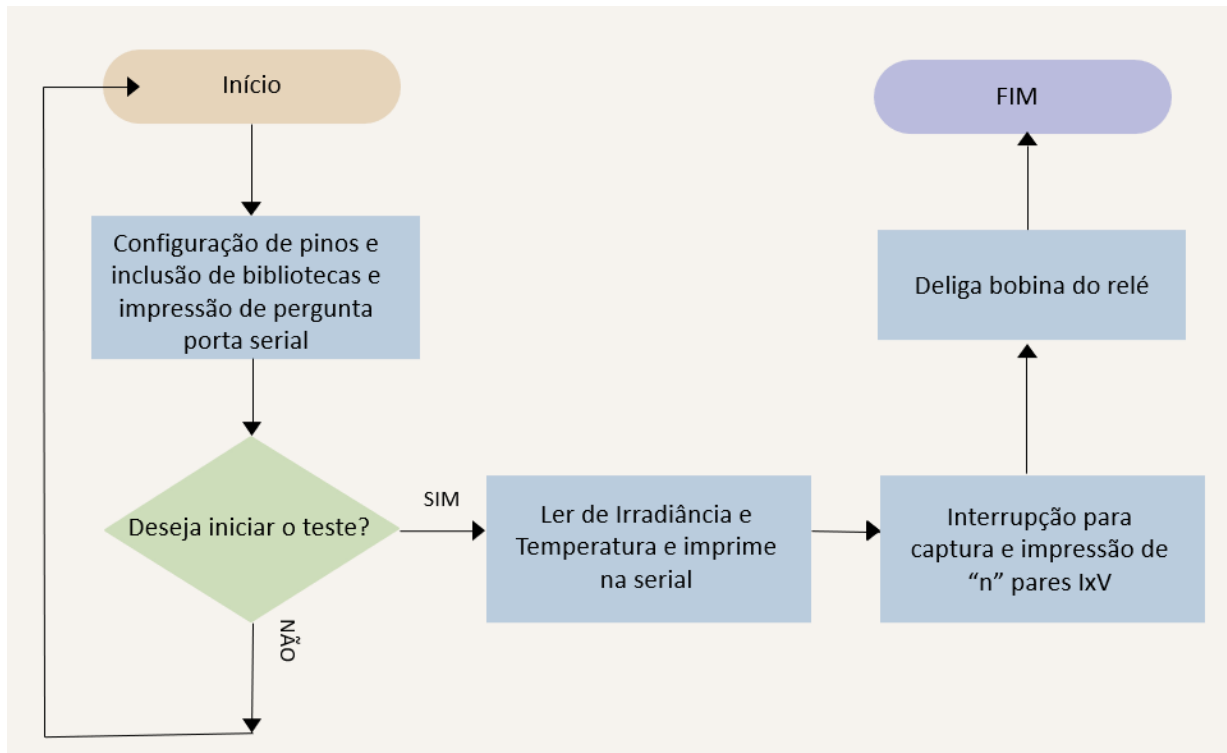


Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.1. Aquisição e processamento dos dados

Para a captura dos dados de interesse, é desenvolvido um script na IDE do Arduino que possibilita a leitura dos dados pela serial, bem como o controle do início e fim do teste de curva IV. O script implementado é apresentado integralmente no Anexo E e pode ser resumido pelo fluxograma da Figura 24. No fluxograma é apresentada a variável “n” que determina quantos pares IV o Arduino irá capturar ao longo de um ensaio. Ao realizar alguns testes no Arduino foi possível constatar que o tempo de captura completa de um par IV é de aproximadamente 1ms, sendo assim, adotou-se $n=100$, que determina um tempo de leitura total da curva de 100ms, ligeiramente maior que o tempo de carregamento do capacitor, permitindo assim a captura adequada da curva.

Figura 24 – Fluxograma representativo do código implementado



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a implementação do código, buscando uma maneira prática de salvar os dados capturados sem a necessidade de copiá-los manualmente da porta serial disponível na IDE do Arduino e sem a necessidade de implementar códigos mais complexos que permitam ao Arduino atuar como teclado, utiliza-se o software CoolTerm 2.2.0. Este é um aplicativo para Windows que emula uma porta serial e oferece opções para salvar os dados recebidos em um arquivo de texto no formato .txt.

Sendo assim, ao realizar os testes, a porta serial do Arduino é acessada por meio do software CoolTerm, o que possibilita realizar vários testes e armazenar em arquivos de texto, para que possam ser plotados e analisados posteriormente. A Figura 25 demonstra um arquivo de texto que foi salvo e demonstra como os dados são armazenados.

Figura 25 – Arquivo .txt obtido após medição da curva

86.txt - Bloco de Notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

Deseja iniciar o teste de curva IxV? Se sim, digite 's'.

Irradiância(W/m²): 978.53

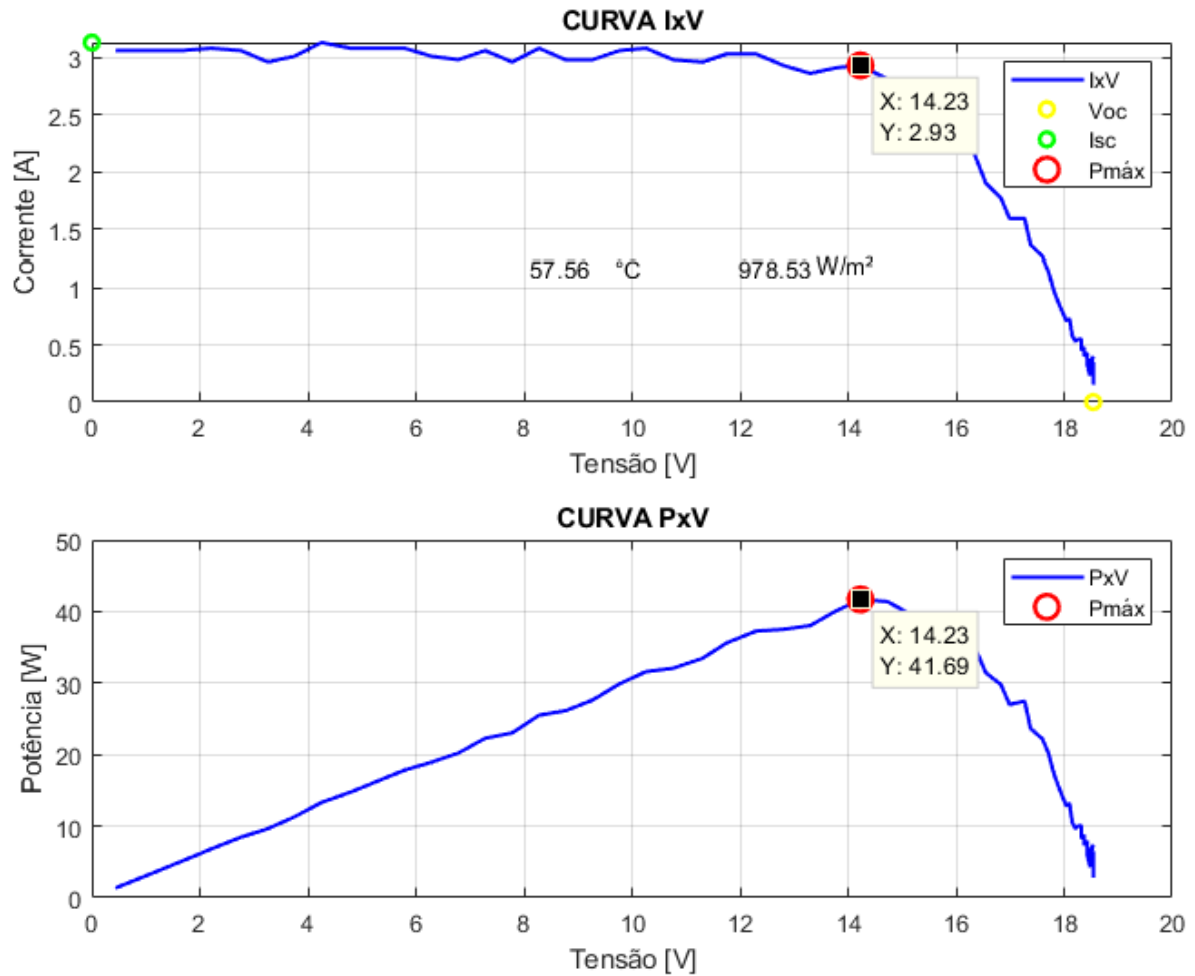
Temperatura(°C): 57.56

Tensão(V): 0.44	Corrente(A): 3.06
Tensão(V): 1.10	Corrente(A): 3.06
Tensão(V): 1.66	Corrente(A): 3.06
Tensão(V): 2.21	Corrente(A): 3.08
Tensão(V): 2.76	Corrente(A): 3.06
Tensão(V): 3.26	Corrente(A): 2.96
Tensão(V): 3.75	Corrente(A): 3.01
Tensão(V): 4.25	Corrente(A): 3.13
Tensão(V): 4.80	Corrente(A): 3.08
Tensão(V): 5.30	Corrente(A): 3.08
Tensão(V): 5.79	Corrente(A): 3.08
Tensão(V): 6.29	Corrente(A): 3.01
Tensão(V): 6.79	Corrente(A): 2.98
Tensão(V): 7.28	Corrente(A): 3.06
Tensão(V): 7.78	Corrente(A): 2.96
Tensão(V): 8.28	Corrente(A): 3.08
Tensão(V): 8.77	Corrente(A): 2.98
Tensão(V): 9.27	Corrente(A): 2.98
Tensão(V): 9.77	Corrente(A): 3.06
Tensão(V): 10.26	Corrente(A): 3.08
Tensão(V): 10.76	Corrente(A): 2.98
Tensão(V): 11.31	Corrente(A): 2.96
Tensão(V): 11.75	Corrente(A): 3.03
Tensão(V): 12.30	Corrente(A): 3.03
Tensão(V): 12.80	Corrente(A): 2.93
Tensão(V): 13.30	Corrente(A): 2.86
Tensão(V): 13.79	Corrente(A): 2.91
Tensão(V): 14.23	Corrente(A): 2.93
Tensão(V): 14.73	Corrente(A): 2.81
Tensão(V): 15.12	Corrente(A): 2.63
Tensão(V): 15.50	Corrente(A): 2.45

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a consolidação do método de aquisição dos dados é elaborado um script no software MATLAB que possibilita a leitura do arquivo de texto e extração dos dados de interesse para a construção das curvas IV e PV medidas, bem como a demarcação dos pontos principais da curva. Sendo que não é realizado nenhum tratamento matemático nos dados lidos, apenas a identificação dos pontos por meio do script elaborado, que é apresentado integralmente no Anexo F. A Figura 26, abaixo demonstra a plotagem realizada a partir do arquivo de texto adquirido em uma medição.

Figura 26 - Curvas medidas e plotadas pelo script implementado no MATLAB



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4. Procedimento de validação do protótipo

Após a implementação do traçador proposto, são realizados testes a fim de examinar a confiabilidade dos dados adquiridos por este, para isso, é necessária a comparação das curvas obtidas pelo protótipo com curvas obtidas por um traçador IV comercial nas condições mais próximas possíveis de irradiância e de temperatura.

O traçador comercial utilizado nesse trabalho é o Seaward PV210 disponibilizado pelo Instituto Federal do Ceará (IFCE), *Campus Sobral* e no anexo G é possível observar seu datasheet. Esse traçador é composto por três equipamentos principais, o próprio PV210, um alicate amperímetro e o Solar Survey 200R, sendo o último responsável por medir irradiância e temperatura de costa de célula e enviar via *wireless* para o PV210, possibilitando o recebimento desses dados sem conexão física entre os dois equipamentos. Já o amperímetro é conectado diretamente ao PV210, bem como o MFV a ser analisado.

Assim como o protótipo proposto, o traçador comercial não mostra a curva logo após o teste em sua tela, sendo necessário a utilização do software SolarCert que recebe uma tabela com todas as variáveis dos testes e processa os dados para visualização da curva, mas apesar disso o PV210 imprime na tela os valores dos principais pontos da curva medida, após cada ensaio. A Figura 27, demonstra os três equipamentos descritos.

Figura 27 – Elementos que compõem o traçador comercial utilizado



Fonte: Seaward (2024).

O módulo fotovoltaico utilizado para os ensaios de curva IV, possui potência nominal de 60Wp, o qual as principais especificações são detalhadas na Tabela 2, abaixo.

Tabela 2 – Especificações técnicas do módulo utilizado

Especificações STC	
Fabricante	Resun
Modelo	RSM060-P
Tecnologia	Silício Policristalino
Potência do Painel	60 Wp
Tensão de circuito aberto - Voc	22,68 V
Tensão de máxima potência - Vmp	18,54 V
Corrente de curto circuito - Isc	3,75 A
Corrente de máxima potência - Imp	3,36 A
Dimensões do painel	640 x 670 x 25 mm
Peso	4,8 Kg

Fonte: Datasheet Resun-RMS060P (2024, com adaptações).

Para realização dos ensaios de curva IV o módulo analisado é fixado por meio de um kit de fixação comercial à uma estrutura de madeira construída a fim de garantir uma inclinação fixa para todos os testes realizados de aproximadamente 15°, bem como possibilitar

uma análise mais próxima da realidade de módulos instalados em telhados. O kit de fixação utilizado é composto por parafusos prisioneiros para madeira, grampos finais e perfil de alumínio e a Figura 28 demonstra a fixação.

Figura 28 – Representação do madeiramento e do módulo fixado por meio do kit de fixação comercial



Fonte: Elaborada pelo autor.

Todos os ensaios de curva IV são feitos seguindo o procedimento de ensaio da norma NBR16274:2004 que já foram descritos na fundamentação teórica deste trabalho, são realizados testes a sol pleno sempre em horários entre 10 e 13 horas, em dias claros e sempre com irradiâncias acima de $700\text{W}/\text{m}^2$. Além disso, os ensaios de comparação são realizados no pátio do Instituto Federal do Ceará (IFCE) campus Sobral, com os sensores de irradiância alinhados em uma mesma inclinação, de acordo com o trilho de montagem, e sensores de temperatura fixados atrás do MFV, bem próximos um do outro, como é possível observar nas Figuras 29 e 30, abaixo.

Figura 29 - Demonstração dos sensores de irradiância fixados no trilho



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 30 - Demonstração dos sensores temperatura fixados no módulo



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para efeito de comparação dos resultados é necessário que os ensaios de curva IV sejam realizados paralelamente, mas para evitar possíveis problemas de leitura e/ou interferências indesejadas provenientes da interação das cargas dos dois equipamentos opta-se por executar testes sequenciais com o menor tempo possível entre eles, conservando assim ao máximo as condições de irradiância e temperatura para os dois testes. Na Figura 31 abaixo é

possível observar como é realizada a ligação para viabilizar o sequenciamento quase instantâneo entre os testes.

Figura 31 – Demonstração das conexões

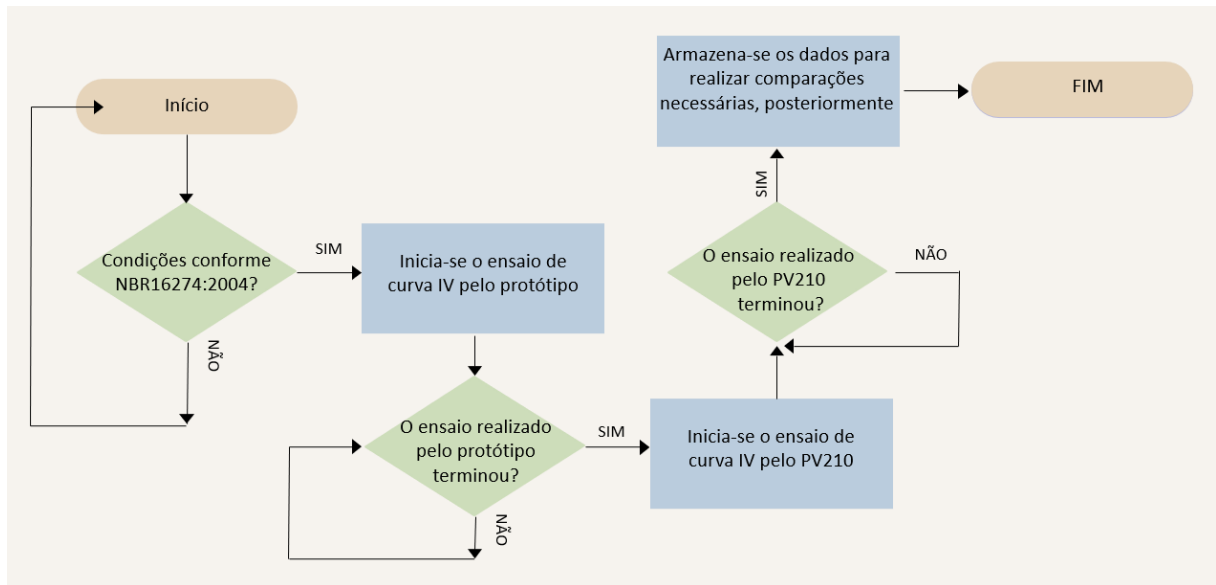


Fonte: Elaborada pelo autor.

O MFV utilizado tem seus conectores MC4 conectados aos do protótipo, já o PV210 se conecta com o módulo por meio dos conectores a mola, paralelamente à entrada do protótipo, por meio de garras jacaré disponíveis para conexão no traçador comercial.

Para obter testes comparáveis, primeiro inicia-se o teste com o protótipo pelo comando enviado ao Arduino pelo teclado do computador, no instante que os dados param de ser recebidos pela serial caracterizando a conclusão do teste do protótipo, aperta-se o botão referente ao início do teste do traçador comercial, e assim, os testes são salvos de acordo com o número do teste disponibilizado pelo traçador comercial. Vale ressaltar que, conforme descrito anteriormente, o tempo de duração do teste do protótipo é de aproximadamente 100ms, ou seja, a diferença entre os dois testes é mínima. Assim, são realizados alguns testes para comparação das curvas e das principais variáveis medidas a sol pleno de acordo com o procedimento que pode ser resumido pelo fluxograma apresentado na Figura 32.

Figura 32 – Fluxograma que representa a captura sequencial dos ensaios



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.1. Sombreamento parcial

Além dos ensaios já demonstrados, são realizados três ensaios de curva IV em condições de sombreamento parcial, a fim de avaliar a atuação do protótipo em condições adversas em comparação com o traçador comercial. São emuladas algumas situações de sombreamento. É importante ressaltar que o MFV utilizando possui apenas um diodo de by-pass segundo o datasheet.

3.4.1.1. Sombreamento parcial 1

Na primeira situação de sombreamento ensaiada, é realizada a fixação de esponjoso de poliéster sobre o módulo, a situação descrita é demonstrada pela Figura 33, onde é possível observar que o material translúcido cobre aproximadamente 25% da área total do MFV.

Optou-se pelo uso do esponjoso nesse ensaio a fim de analisar uma condição simples de sombreamento similar ao sombreamento causado por nuvens, a diferença é que geralmente a nuvem encobre completamente o módulo, mas nesse caso, analisou-se uma condição parcial de sombreamento por material translúcido.

Figura 33 – Situação de sombreamento 1



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.1.2. Sombreamento parcial 2

No segundo ensaio que contempla situações de sombreamento, é realizado o sombreamento total de apenas uma célula do MFV, é utilizado um material opaco, sendo esse uma chapa de PVC com aproximadamente 5,5mm de espessura, como demonstrado na Figura 34. Esse teste emula uma condição de sombreamento parcial que pode ser causado por objetos localizados em volta do MFV.

Figura 34 - Situação de sombreamento 2



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.1.3. Sombreamento parcial 3

No terceiro ensaio é utilizado uma folha de papelão cartonado com espessura de aproximadamente 8mm cobrindo aproximadamente 25% do MFV, como pode ser observado na Figura 35. Para esse teste não são comparados os pontos principais da curva, mas são demonstrados nos resultados, as curvas obtidas.

Figura 35 - Situação de sombreamento 3



Fonte: Elaborada pelo autor.

4 RESULTADOS

Após a realização dos ensaios de curva IV feitos para validar o protótipo implementado, é apresentado quatro resultados de ensaios aleatórios dentre os realizados, para demonstrar a atuação do protótipo em condições de sol pleno. É também demonstrado as três situações de sombreamento adotadas. Para uma melhor representação dos dados obtidos, a análise dos resultados limitou-se ao estudo das principais variáveis medidas pelos traçadores utilizados, sendo que cada ensaio é apresentado segundo uma tabela que demonstra essas variáveis, mostrando o erro percentual entre elas, além de demonstrar as curvas IV e PV obtidas,

para garantir um aparato gráfico dos resultados. Vale ressaltar que nas tabelas apresentadas Voc e Isc medidos pelo protótipo são respectivamente a última medição de tensão e a primeira medição de corrente realizadas pelo protótipo.

4.1 Ensaio de validação 1

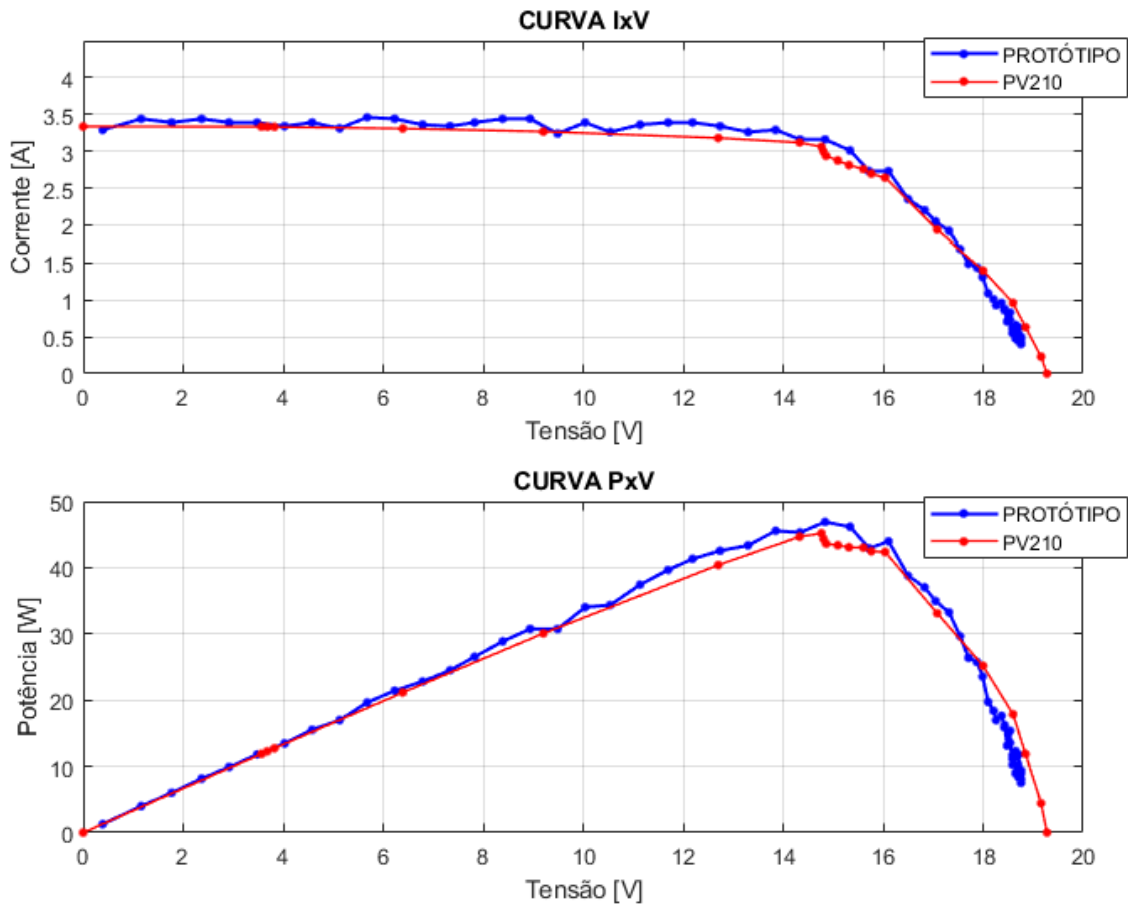
O primeiro resultado da validação é o ensaio que foi realizado dia 29 de agosto de 2024 às 10:53:35 da manhã. A Tabela 3 apresenta as principais variáveis medidas e os erros percentuais entre elas. Um aspecto a ser destacado neste ensaio é o erro percentual nas medições de temperatura. Sendo que a leitura obtida pelo sensor do protótipo foi 3,39°C superior àquela registrada pelo traçador comercial. Essa discrepância é preocupante, especialmente se a curva gerada tem como objetivo estimar parâmetros térmicos do MFV. Contudo, o ensaio mostra resultados satisfatórios para as demais variáveis analisadas. Na Figura 36, é possível observar uma boa correlação entre as curvas medidas, em que a curva azul representa as medições do protótipo, enquanto a curva vermelha corresponde àquelas obtidas pelo PV210.

Tabela 3 – Principais variáveis do teste de validação 1

Variáveis	PV210	PROTÓTIPO	ERRO (%)
Irradiância (W/m ²)	874,2	896,88	2,6
Temperatura(°C)	48,99	52,38	6,9
Voc (V)	19,279	18,76	2,7
Isc(A)	3,336	3,29	1,4
Vmp(V)	14,77	14,84	0,5
Imp(V)	3,1	3,16	1,9

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 36 – Teste de validação 1



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Ensaio de validação 2

O segundo resultado da validação foi realizado dia 29 de agosto de 2024 às 11:06:38. A tabela 4 demonstra as principais variáveis medidas e o erro percentual entre elas. Neste resultado observa-se que a irradiância medida a pelo sensor utilizado no protótipo foi menor em $56,1\text{W/m}^2$ do que a obtida pelo traçador comercial. Além disso a curva medida pelo protótipo apresentou um afundamento no ponto de máxima potência em relação a curva medida pelo PV210, apesar de apresentar o menor erro em ISC e Voc dentre as curvas demonstradas nesse trabalho, como é possível observar na Figura 37, abaixo.

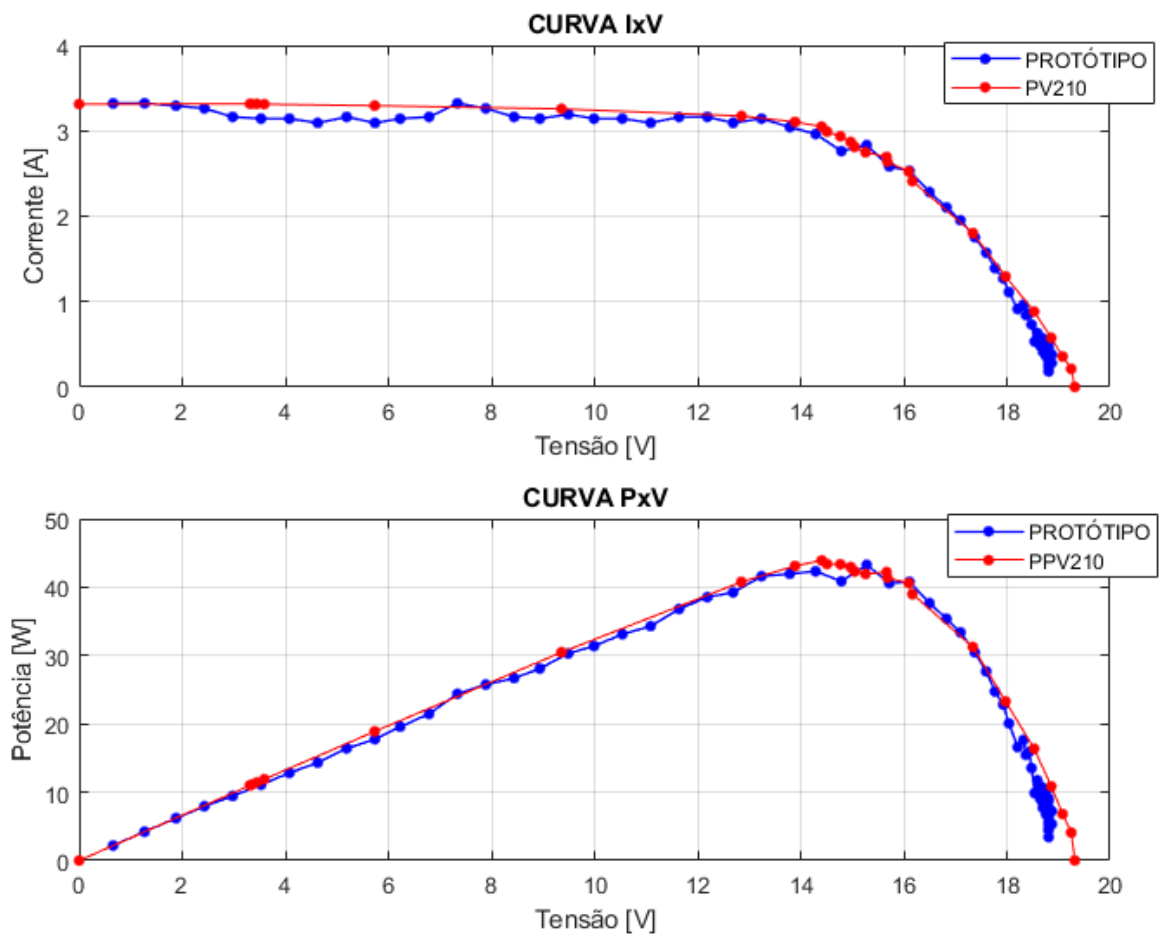
Nota-se que o afundamento do ponto de máxima potência é caracterizado principalmente por uma oscilação da corrente recebida do sensor, pela falta de mais pontos medidos pelo protótipo na região do joelho da curva, não é possível correlacionar de fato essa relação, sendo um comportamento pontual que deve ser estudado em trabalhos futuros.

Tabela 4 – Principais variáveis do teste de validação 2

Variáveis	PV210	PROTÓTIPO	ERRO (%)
Irradiância (W/m ²)	992,4	936,3	5,7
Temperatura(°C)	43,48	45,13	3,8
Voc (V)	19,32	18,87	2,3
Isc(A)	3,312	3,321	0,3
Vmp(V)	14,41	15,26	5,9
Imp(V)	3,048	2,748	9,8

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 37 – Teste de validação 2



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 Ensaio de validação 3

Já terceiro ensaio foi realizado dia 30 de agosto de 2024 às 12:11:43. A Tabela 5 demonstra as principais variáveis medidas nesse ensaio e o erro percentual entre elas. Neste resultado observa-se um erro percentual na irradiância, muito próximo ao erro teste anterior,

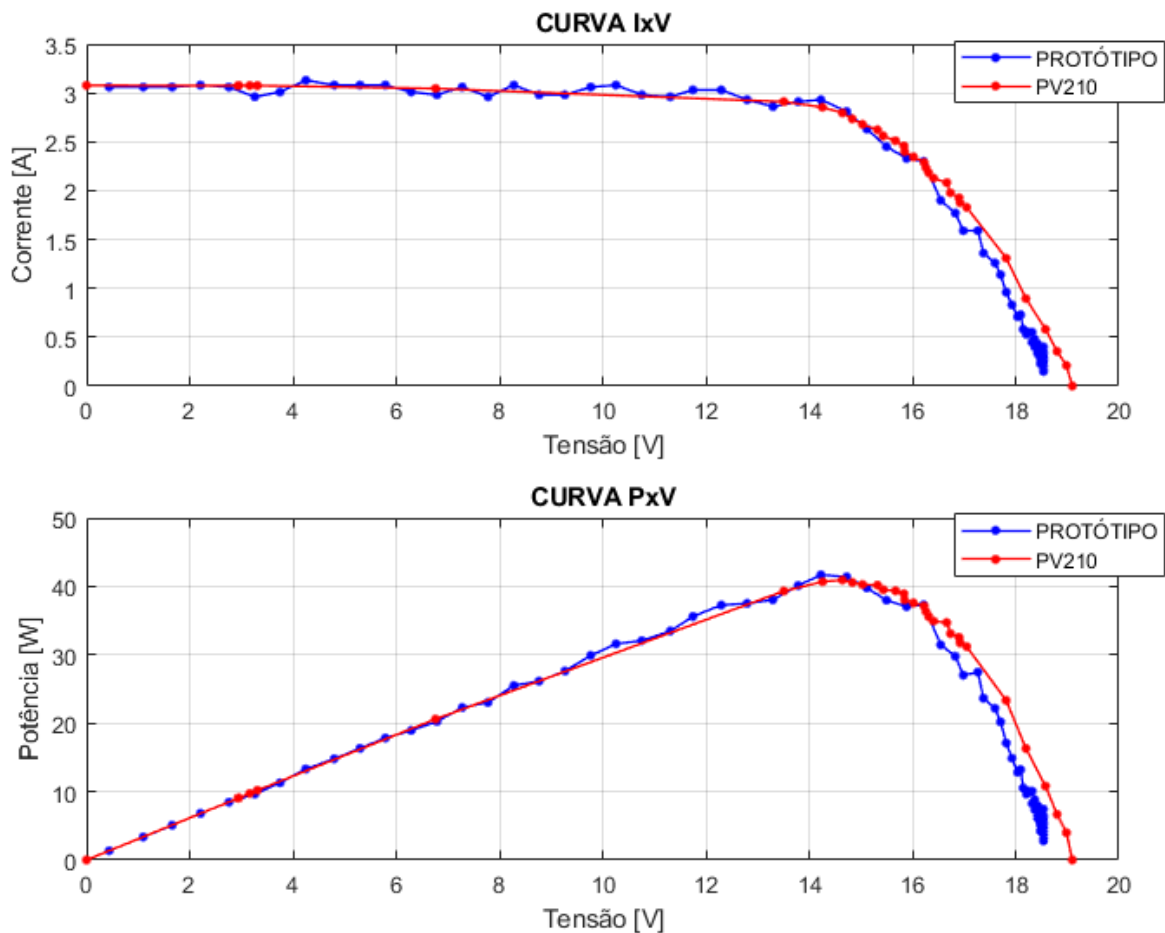
mas obtêm-se erros aceitáveis para as outras variáveis. A Figura 38 mostra as curvas obtidas nesse ensaio.

Tabela 5 - Principais variáveis do teste de validação 3

Variáveis	PV210	PROTÓTIPO	ERRO (%)
Irradiância (W/m^2)	923	978,53	6,0
Temperatura($^{\circ}C$)	58,9	57,56	2,3
Voc (V)	19,1	18,54	2,9
Isc(A)	3,077	3,06	0,6
Vmp(V)	14,65	14,23	2,9
Imp(V)	2,795	2,93	4,8

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 38 – Teste de validação 3



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4 Ensaio de validação 4

O quarto ensaio foi realizado dia 30 de agosto de 2024 às 10:56:57. A Tabela 6 demonstra as principais variáveis medidas nesse ensaio e o erro percentual entre elas,

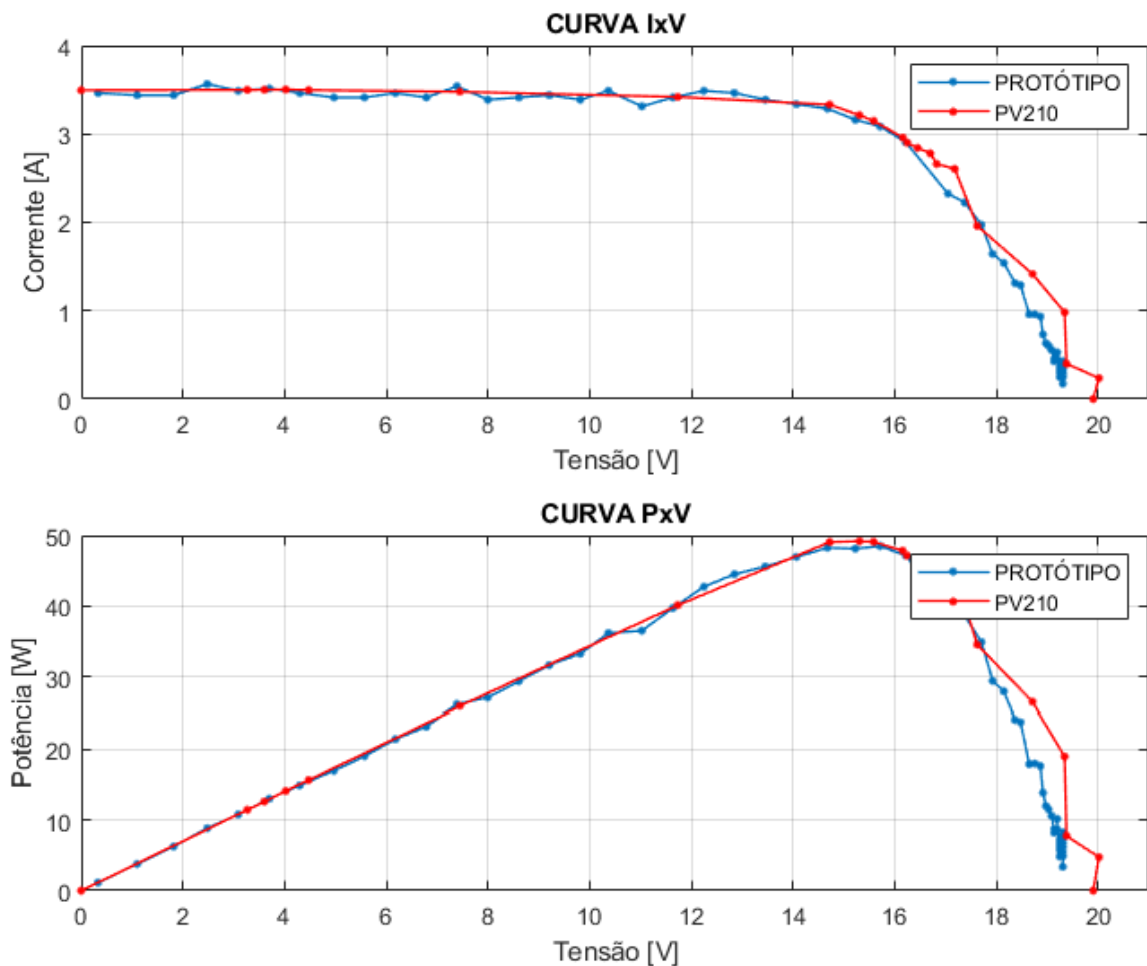
apresentando um comportamento muito próximo ao descrito no ensaio anterior. A Figura 39 mostra as curvas obtidas nesse ensaio.

Tabela 6 – Principais variáveis do teste de validação 4

Variáveis	PV210	PROTÓTIPO	ERRO (%)
Irradiância (W/m ²)	1055	985	6,6
Temperatura(°C)	50,66	48,13	5,0
Voc (V)	19,9	19,31	3,0
Isc(A)	3,496	3,4638	0,9
Vmp(V)	15,31	15,75	2,9
Imp(V)	3,2	3,16	1,3

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 39 – Teste de validação 4



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.5 Resumo dos resultados a sol pleno

A partir dos ensaios demonstrados percebe-se que o protótipo implementado é uma alternativa eficaz para obter parâmetros elétricos de módulos fotovoltaicos, é possível inferir

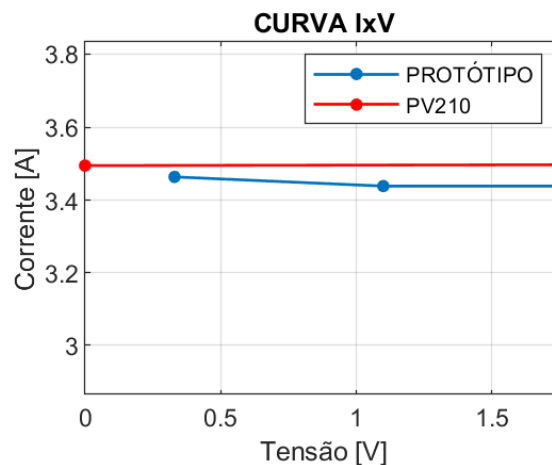
que as curvas obtidas por ele representam bem o comportamento do módulo, por mais que neste trabalho não tenha sido adotado um método matemático que permita comparar a curva ponto a ponto, pela observação gráfica adotada e pelo cálculo do erro percentual entre as principais variáveis medidas, valida-se a eficiência do protótipo.

Entretanto como foi observado pela captura das curvas a uma irradiância acima de 900W/m^2 , um erro percentual praticamente fixo de $6,0\%$ é observado entre as medições de irradiância, concluindo-se que a conversão adotada para essa variável não foi plenamente eficaz. Além disso, o sensor de temperatura utilizado respondeu muito bem, tendo um erro mínimo em quase todos os testes demonstrados, exceto no ensaio de validação 1 com $6,9\%$.

Outro comportamento que deve ser mencionado é a não captura efetiva dos pares $(V_{oc},0)$ e $(0,I_{sc})$, apesar de serem capturados pontos bem próximos, que são usados para representar V_{oc} e I_{sc} , obtidos pelo protótipo, a captura efetiva não acontece, em relação a corrente isso ocorre principalmente por conta da característica intrínseca da carga variável utilizada. Silva (2018) descreve que mesmo com a descarga do capacitor ainda restará alguma energia nesses elementos que faz com que a primeira tensão medida durante o ensaio seja maior que zero. Muñoz (2006) propõe a aplicação de uma pré carga no capacitor por uma fonte de tensão negativa permitindo assim a captura mais efetiva de I_{sc} .

Entretanto, neste trabalho, foi possível observar que I_{sc} pôde ser aproximada sem grandes prejuízos pela primeira corrente medida pelo protótipo, sendo a tensão do par IV sempre menor $0,5\text{V}$, como é possível observar pelos resultados já descritos. Na Figura 40 é apresentado um zoom na curva do ensaio de validação 4, na região próxima de I_{sc} , para visualização da aproximação descrita.

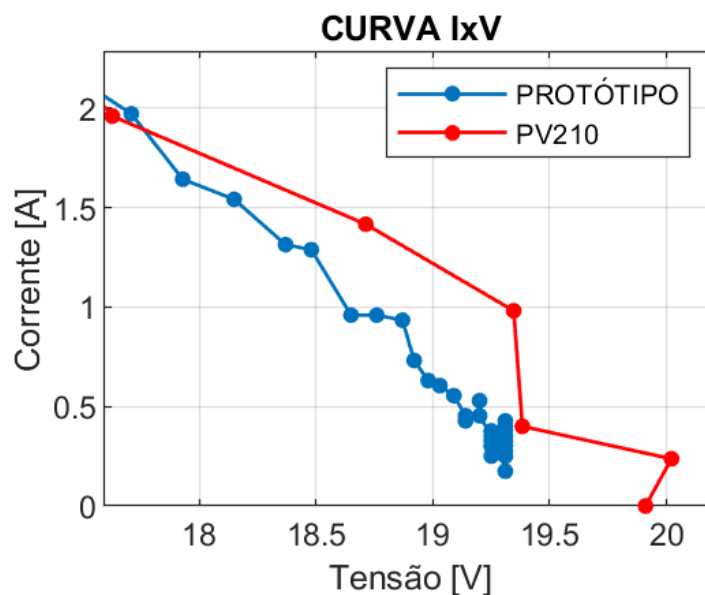
Figura 40 – Corrente próxima de I_{sc}



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em relação à tensão, o ponto V_{oc} puro também não é medido pelo protótipo. Essa é uma característica que se relaciona com a carga capacitiva, pois a tensão de carga do capacitor é descrita por uma exponencial que caracteriza a pequena variação no valor de tensão em pontos próximos da tensão máxima de carregamento. Assim, seria necessário um maior tempo de captura para alcançar V_{oc} . Além da característica intrínseca à carga utilizada, o sensor de corrente utilizado não detecta bem pequenas variações de corrente, principalmente quando são correntes inferiores a 0,5A. Esses são os motivos do comportamento demonstrado pela Figura 41, que é um zoom da curva obtida no ensaio 4 de validação, nos pontos próximos de V_{oc} .

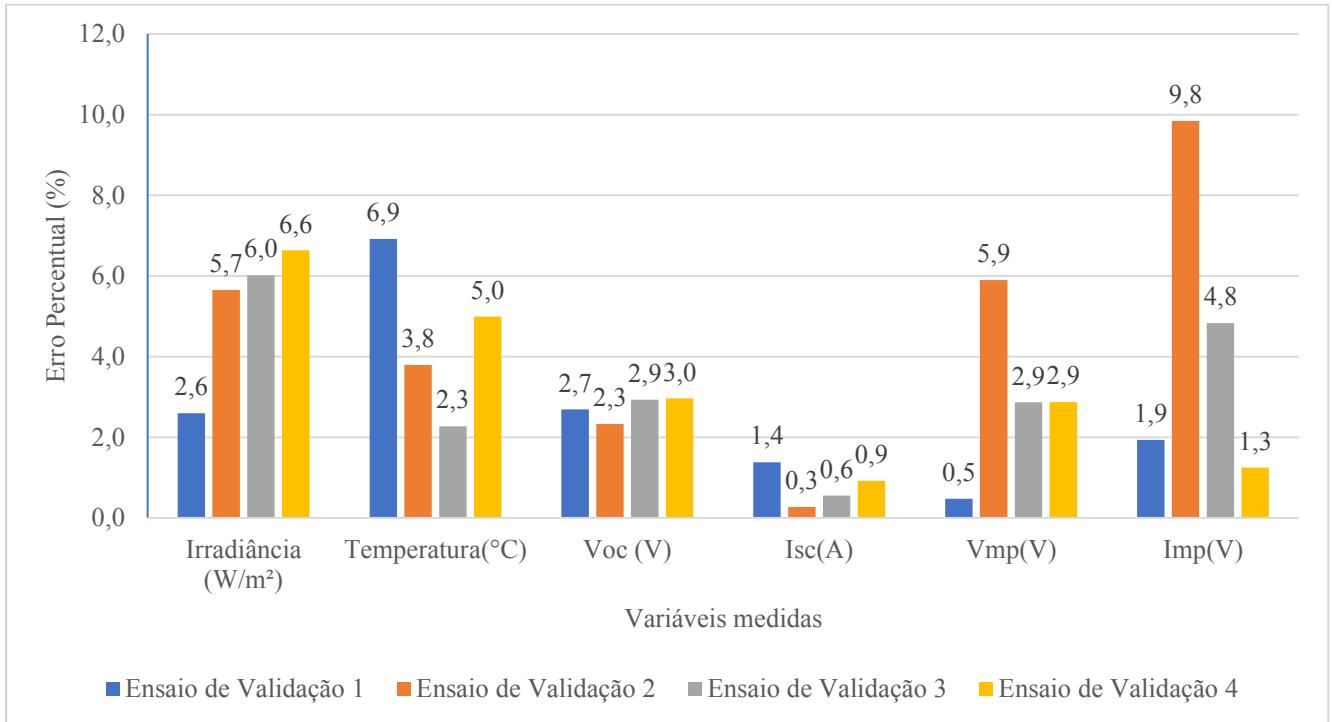
Figura 41 – Tensão próxima de V_{oc}



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em resumo, na Figura 42 é apresentado um gráfico que demonstra os erros obtidos entre as principais variáveis medidas pelos equipamentos utilizados, de acordo com os quatro ensaios de validação já demonstrados neste capítulo. Assim, é demonstrado que para irradiância o maior erro entre os testes é de 6,6%. Um fato que deve ser levado em consideração é que esses erros próximos de 6% são valores encontrados quando mede-se irradiâncias acima de 900W/m². Além disso o sensor de temperatura respondeu muito bem, onde foi possível observar apenas um erro, dentre os ensaios, acima de 5%. Os melhores resultados das medições do protótipo, foram as tensões e as correntes máximas do MFV, apresentando erros menores que 3% em todos os ensaios. Já as tensões e correntes de máxima potência, apresentaram um erro muito elevado no segundo ensaio, sendo algo pontual quando comparado aos outros três apresentados.

Figura 42 – Erros obtidos nas situações de sol pleno



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.6 Ensaio em situação de sombreamento 1

Os resultados obtidos por meio dos ensaios em condições de sombreamento são apresentados abaixo, da mesma forma que foram apresentados os resultados de validação à sol pleno, por meio de uma tabela que apresenta as principais variáveis medidas, bem como os erros percentuais obtidos.

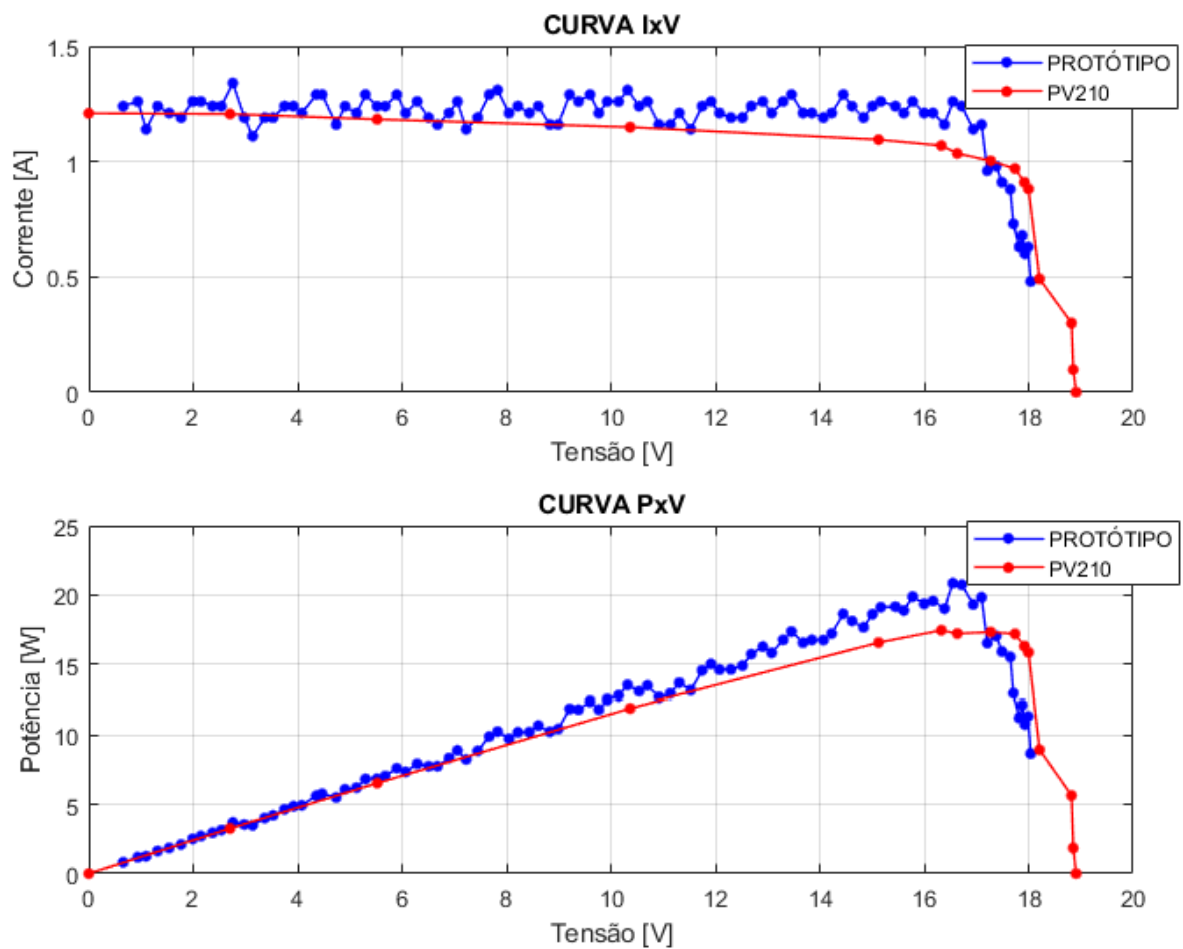
No primeiro ensaio de sombreamento, no qual foi utilizado o material esponjoso para sombrear aproximadamente 25% do MFV, é possível observar que a curva obtida pelo protótipo acompanha graficamente a curva medida pelo traçador comercial. Contudo, a corrente apresentou uma variação significativa em relação aos testes a sol pleno, o que pode ser evidenciado pelo erro de Imp expresso na Tabela 7 e pela Figura 43, que apresenta as duas curvas. Essa figura também demonstra um comportamento típico da diminuição de irradiância incidida sobre o módulo, caracterizado pela diminuição brusca de Isc quando comparada a uma curva capturada a sol pleno. A curva obtida pelo protótipo não demonstrou bem os degraus típicos de situações de sombreamento. Apesar disso, de forma geral considera-se um bom resultado já que, com o material translúcido, realmente há apenas uma diminuição da irradiância recebida pelo MFV não chegando a gerar uma condição de sombra significativa.

Tabela 7 – Principais variáveis do teste de sombreamento 1

Variáveis	PV210	PROTÓTIPO	ERRO (%)
Irradiância (W/m ²)	890,2	933,21	4,8
Temperatura(°C)	56,69	53,55	5,5
Voc (V)	18,91	18,04	4,6
Isc(A)	1,209	1,24	2,6
Vmp(V)	16,33	16,55	1,3
Imp(V)	1,069	1,26	17,9

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 43 – Condição de sombreamento 1



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.7 Ensaio em situação de sombreamento 2

No segundo ensaio de sombreamento, em que foi sombreada uma célula, observa-se que a curva obtida pelo protótipo apresenta uma boa representação, exceto pelo truncamento da tensão lida. Esse truncamento demonstra que a quantidade de pontos medidos pelo protótipo

não é suficiente para capturar adequadamente o carregamento do capacitor. Isso se deve ao aumento das resistências intrínsecas do módulo, o que torna o carregamento do capacitor mais lento. Assim, o tempo de leitura do Arduino, determinado pela quantidade de pares IV capturados, já não coincide com o tempo necessário para o carregamento do capacitor, resultando no truncamento das medições.

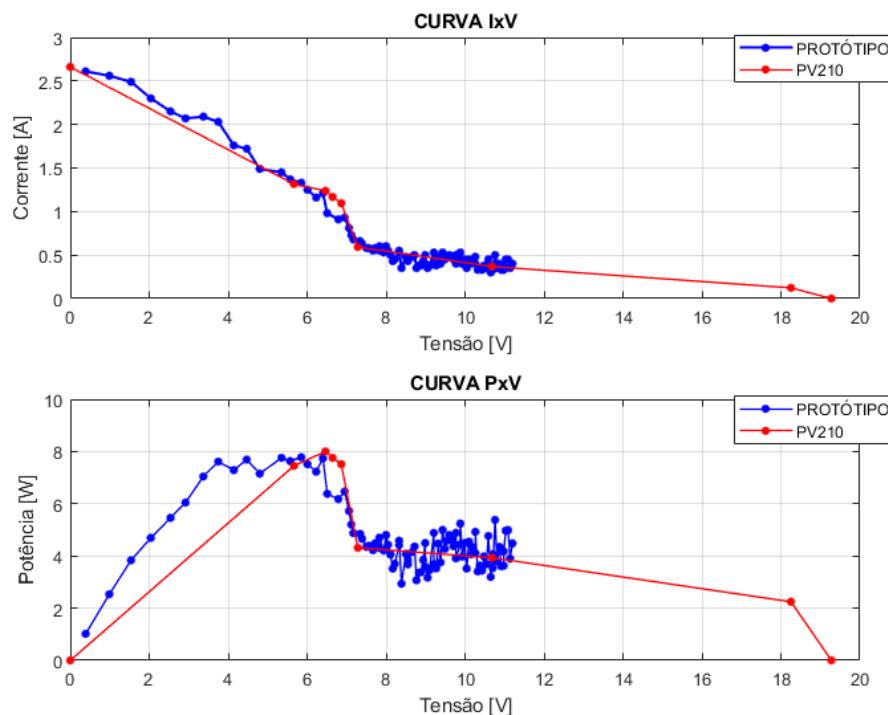
A corrente também varia bastante em relação a ensaios a sol pleno, mas ainda é mantida uma boa aproximação dos pontos lidos. Além disso a forma da curva apresenta nitidamente a condição de sombreamento parcial típica, apresentando os degraus próximos ao joelho da curva e o afundamento do ponto de máxima potência a partir do descasamento de I_{sc} disponibilizada pelas células. A tabela 8 e a Figura 44, representam o ensaio.

Tabela 8 - Principais variáveis do teste de sombreamento 2

Variáveis	PV210	PROTÓTIPO	ERRO (%)
Irradiância (W/m^2)	885,5	929,33	4,9
Temperatura($^{\circ}C$)	56,02	54,97	1,9
Voc (V)	19,279	11,2	41,9
Isc(A)	2,661	2,61	1,9
Vmp(V)	6,464	5,85	9,5
Imp(V)	1,238	1,33	7,4

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 44 – Condição de sombreamento 2

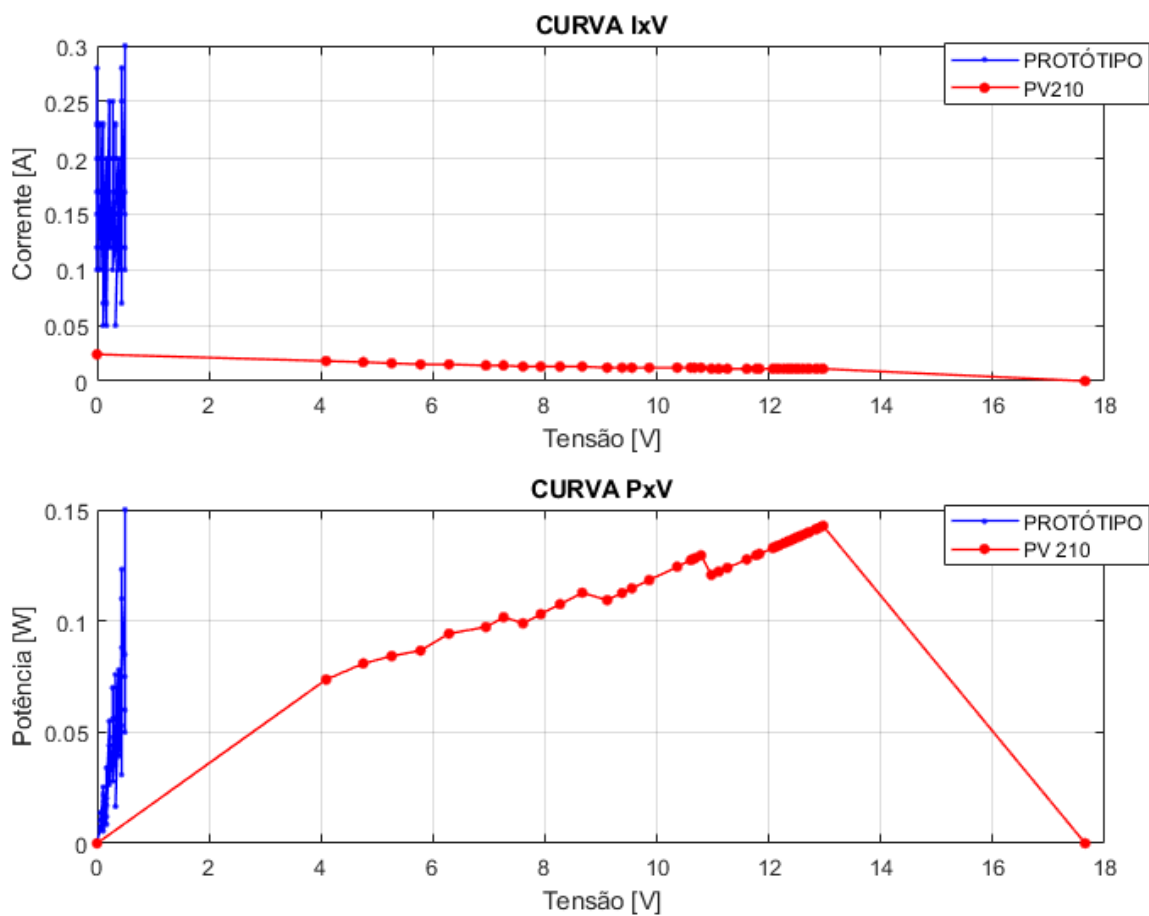


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.8 Ensaio em situação de sombreamento 3

Por fim, apresenta-se o resultado da terceira condição de sombreamento, onde não foi possível constatar significado físico na curva obtida pelo protótipo, devido a correntes medidas serem muito baixas como demonstrado pela curva obtida pelo PV210, por isso não foi possível comparar as principais variáveis da curva. Como o módulo utilizado possui apenas um diodo de by-pass com tal sombreamento não há como o MFV disponibilizar potência, pois o diodo está em condução, como é possível observar na Figura 45.

Figura 45 – Condição de sombreamento 3



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.9 Resumo dos ensaios de sombreamento

Assim, são comparados os erros das principais variáveis medidas nas duas primeiras condições de sombreamento realizadas, como é demonstrado na Figura 46. É notável,

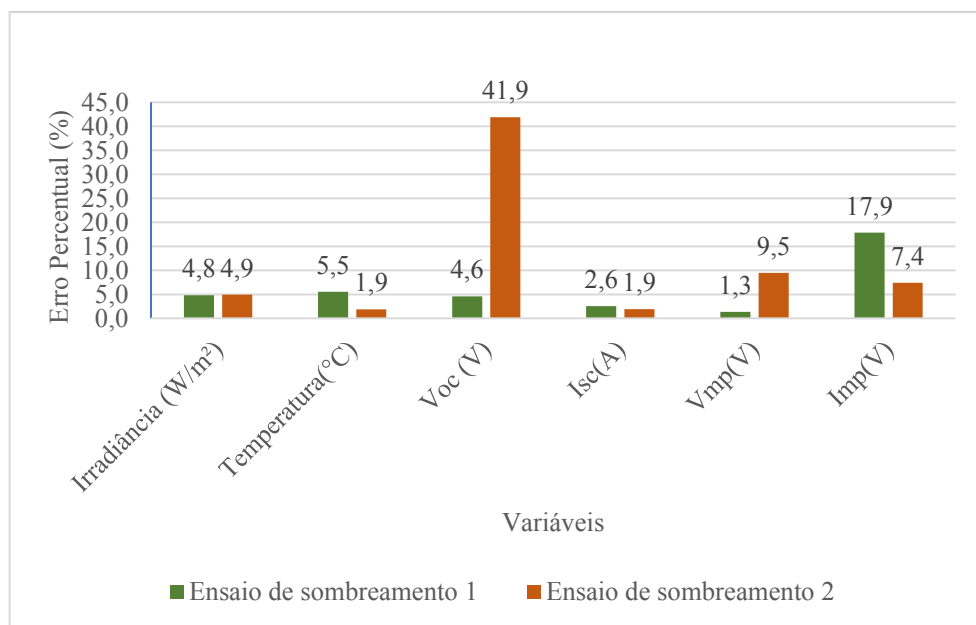
que a temperatura e a irradiância apresentam um bom resultado, apresentando erros menores que 5,5%. Mas as variáveis que caracterizam o módulo são drasticamente afetadas.

O erro de V_{oc} , na condição de sombreamento 1 é baixo, porém na situação de sombreamento 2 é possível observar um erro de 41,9% entre V_{oc} medido pelo PV210 e a última medida de tensão capturada pelo protótipo, comprovando que o protótipo pelo curto tempo de captura não consegue acompanhar o carregamento do capacitor, pois o tempo de carregamento é alterado conforme o aumento da resistência interna do MFV, causada pelo sombreamento parcial.

Já I_{sc} apresenta ótimos resultados, com erros entre as variáveis medidas menores que 3% em ambos os ensaios. Entretanto, as medições dos pontos de máxima potência em todas as situações de sombreamento não apresentam bons resultados.

Conclui-se que, a carga capacitiva impede o bom funcionamento para medição das principais variáveis da curva IV, nas situações de sombreamento, mas oferece um bom resultado gráfico apesar das curvas serem capturadas de forma incompleta, devido a interação do circuito RC, formado pela resistência série do módulo e o banco de capacitores adotado.

Figura 46 – Erros obtidos nas situações de sombreamento



Fonte: Elaborada pelo autor.

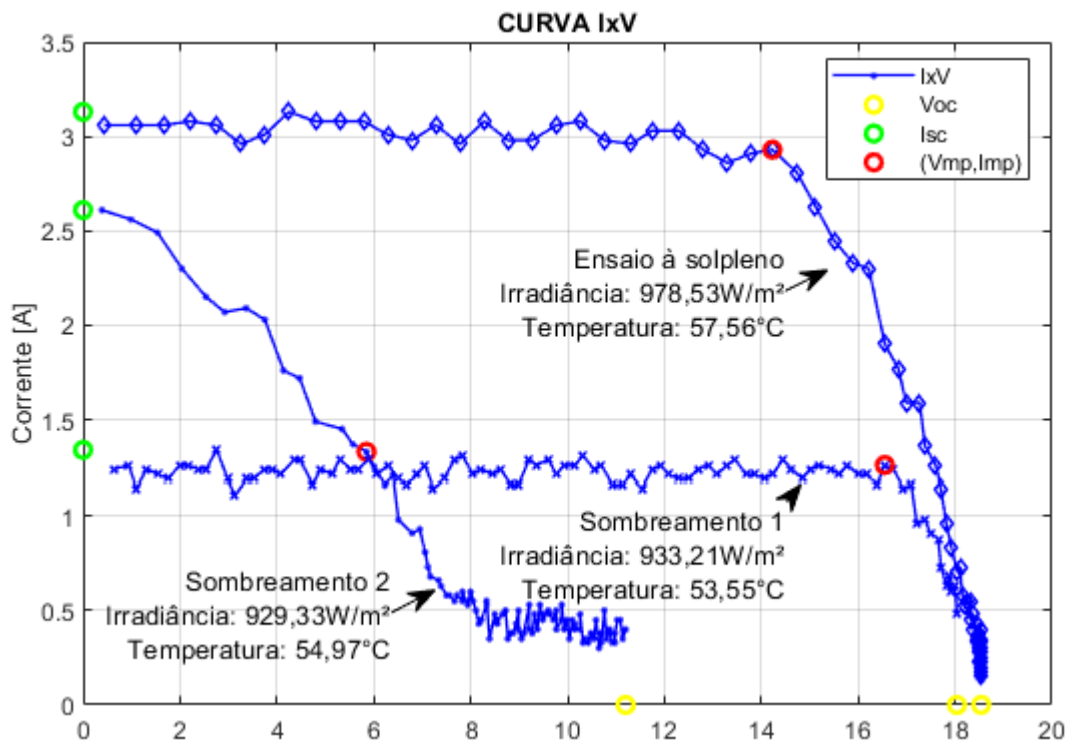
Na Figura 47, são apresentadas três curvas obtidas pelo protótipo, uma em condição de sol pleno e duas condições de sombreamento já demonstradas neste capítulo, a fim de

verificar o bom aparato gráfico disponibilizado pelo protótipo a partir da análise das curvas segundo as interpretações indicadas pela NBR16274:2004.

No que diz respeito ao sombreamento 1, é possível observar que em comparação a curva obtida a sol pleno, houve uma diminuição na corrente disponibilizada, sem grandes prejuízos à forma da curva, caracterizando assim a diminuição da irradiância incidida sobre o modulo.

Além disso, a curva obtida no ensaio de sombreamento 2, demonstra justamente a condição de sombreamento parcial típica, pelo aparecimento de degraus e também pelo declive mais acentuado nos pontos próximos a V_{oc} , representado pela diminuição de R_p do módulo, caracterizando a condição de condução do diodo. Já o declive menos acentuado percebido na região próxima de V_{oc} , apesar do truncamento das medições, demonstra o aumento de R_s , devido às perdas ôhmicas na célula sombreada que se comporta como uma carga.

Figura 47 – Comparação de curvas



Fonte: Elaborada pelo autor.

5 CONCLUSÃO

O protótipo implementado possibilitou a captura da curva IV do módulo fotovoltaico, bem como a medição das principais variáveis dessa curva. Os limites de operação determinados para esse protótipo são uma tensão de no máximo 55V, uma corrente de até 5A além de que o tempo entre ensaios deve ser de aproximadamente 3min, como demonstrado no capítulo 3 deste trabalho.

Além disso, por meio das comparações realizadas entre curvas medidas pelo traçador comercial e pelo protótipo, foi possível constatar um bom desempenho para medição de variáveis externas e internas em condições de sol pleno. O erro máximo na irradiância atinge 6,6%, já o sensor de temperatura apresentou desempenho ainda mais satisfatório, com apenas um erro superior a 5%, dentre os ensaios realizados. As medições de tensão e corrente máximas do MFV mostraram erros inferiores a 3% em todos os ensaios. Em contrapartida, as medições de tensão e corrente de máxima potência apresentaram um erro elevado no segundo ensaio de validação a sol pleno, embora esse resultado seja um caso isolado em relação aos demais ensaios.

Em condições de sombreamento o protótipo não desempenha uma ótima operação no que se trata de medição de variáveis, isso ocorre devido ao aumento das resistências intrínsecas do módulo, que desacelera o carregamento do capacitor. Como resultado, o tempo de leitura do Arduino, determinado pela quantidade de pares IV capturados, não coincide com o tempo necessário para o carregamento do capacitor, levando ao truncamento das medições. Essa problemática pode ser resolvida aumentando o tempo de captura no código fonte, mas isso poderia causar a captura de pontos em diferentes condições de irradiância e temperatura. Apesar disso as comparações em situação de sombreamento comprovam que a curva IV medida pelo protótipo, por mais que incompleta, apresentam um bom meio gráfico de análise, sendo capaz de demonstrar que o módulo não está em condições normais de operação de acordo com as instruções da norma NBR16274:2014 sobre a análise gráfica da curva IV que é demonstrada na introdução teórica deste trabalho.

Portanto, através do uso de equipamentos de baixo custo e uma metodologia focada na simplicidade e eficiência o protótipo implementado tem potencial para entregar bons resultados de medição de parâmetros elétricos e meios gráficos de estudo da curva IV. Ainda há margem para melhoria do protótipo, por meio de aplicação de outros sensores em sua construção, bem como a interpolação dos pontos medidos a fim de encontrar uma curva com menos oscilações, um ajuste melhor do tempo e do controle de captura da curva, determinado

pelo microcontrolador, também é algo que deve ser estudado, fomentando assim inovações e aprimoramentos que contribuam para o uso educacional deste equipamento.

Assim, indica-se para trabalhos futuros realizar estudos de métodos de extrapolação da curva IV medida a fim de comparar com a curva disponibilizada pelo fabricante, bem como estimar parâmetros através de métodos matemáticos a partir da medição da curva pelo protótipo. Além disso sugere-se que sejam feitas correlações entre defeitos específicos de um MFV, como por exemplo as microfissuras, com a potência de saída do módulo, por meio da medição da curva IV.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia: Relatório Final**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-nacional-de-energia/plano-nacional-de-energia-2050/relatorio-final/relatorio-final/relatorio-final-do-pne-2050.pdf/view>. Acesso em: 17/07/2024.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Record Growth in Renewables Achieved Despite Energy Crisis. Press Release, 2023**. Disponível em: <https://www.irena.org/News/pressreleases/2023/Mar/Record-Growth-in-Renewables-Achieved-Despite-Energy-Crisis-PT>. Acesso em: 17/07/2024.
- OLIVEIRA, F. S.; PRIEB, C. W. M.; KRENZINGER, A. **Projeto e construção do protótipo de um traçador de curvas I-V para módulos fotovoltaicos**. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Anais... Gramado: CBENS, 2018. p. 88-99.
- LUNA, M. L. M.; CARVALHO, P. C. M. **Desenvolvimento e validação de traçador de curva IxV para módulos fotovoltaicos usando o método de carga eletrônica**. Revista Brasileira de Energia Solar, v. 8, n. 2, p. 88-99, 2017.
- KRENZINGER, A. **Desenvolvimento de um sistema para traçar a curva característica I-V de módulos fotovoltaicos**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- ARAUJO, G. L. **La Célula Solar – Fundamentos de la Conversión Fotovoltaica**. Curso: Fundamentos, Dimensionado y Aplicaciones de la Energía Solar Fotovoltaica. Madrid: Ciemat, 1992. pp. 2.1-2.20.
- SCUSSEL, E. **Análise dos impactos oriundos de sombreamento e microfissura sobre a geração de energia elétrica em painéis solares**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) - Universidade de Caxias do Sul, Bento Gonçalves, 2020.

BÜHLER, A. J.; SANTOS, F. H. dos; GABE, I. J. **Uma revisão sobre as tecnologias fotovoltaicas atuais.** In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Anais...** Gramado: CBENS, 2018.

GAZOLI, J. R.; VILLALVA, M. G.; GUERRA, J. **Energias Renováveis Alternativas.** São Paulo: Editora Erica, 2012.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS (ISE). **Photovoltaics Report. Freiburg: Fraunhofer ISE, 2024.** Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>. Acesso em: 12/08/2024.

GASPARIN, F. P. **Desenvolvimento de um traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ARAÚJO, A. L. P. L. de; LOPES, A. V. dos S.; MOREIRA, A. B. **Topologias em traçador de curva I-V para módulos fotovoltaicos.** In: **VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Anais...** Fortaleza: CBENS, 2020.

REIS, L. R. de D. **Determinação de parâmetros de módulos fotovoltaicos utilizando o método de Newton Raphson e algoritmos genéticos.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

COSTA, W. T. da. Modelagem, **Estimação de Parâmetros e Método MPPT para Módulos Fotovoltaicos.** 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

SANTOS, R. L. dos et al. **Low Cost Educational Tool to Trace the Curves PV Modules.** IEEE Latin America Transactions, v. 15, n. 8, p. 1392-1399, ago. 2017.

PINHO, J.; GALDINO, M. A. (Org.). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Edição revisada e atualizada. Rio de Janeiro: CEPTEL – CRESESB, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16274:2014 – **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede — Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho**. Disponível em: <https://www.abnt.org.br/normalizacao/comissoes-tecnicas/eletricidade/instalacoes-eletricas-em-bt/energia-solar>. 25/08/2024.

HT INSTRUMENTS. **Solar I-V**. Disponível em: <https://www.ht-instruments.com/pt-br/produtos/fotovoltaico/verificacao-do-desempenho-1/solar-i-ve/>. 26/08/2024.

MUÑOZ, J.; LORENZO, E. **Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays**. Universidad Politécnica de Madrid, Instituto de Energía Solar, 2016.

SILVA, P. R. **Estudo do efeito da composição solar no desempenho de módulos FV caracterizados em condições reais de operação**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Orientadora: Patrícia Romeiro da Silva Jota; Coorientadora: Ana Paula Batista.

ANEXO A – DATASHEET SENSOR DE CORRENTE



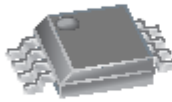
ACS712

*Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor
with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*

Features and Benefits

- Low-noise analog signal path
- Device bandwidth is set via the new FILTER pin
- 5 μ s output rise time in response to step input current
- 50 kHz bandwidth
- Total output error 1.5% at $T_A = 25^\circ\text{C}$, and 4% at -40°C to 85°C
- Small footprint, low-profile SOIC8 package
- 1.2 m Ω internal conductor resistance
- 2.1 kV_{RMS} minimum isolation voltage from pins 1-4 to pins 5-8
- 5.0 V, single supply operation
- 66 to 185 mV/A output sensitivity
- Output voltage proportional to AC or DC currents
- Factory-trimmed for accuracy
- Extremely stable output offset voltage
- Nearly zero magnetic hysteresis
- Ratiometric output from supply voltage

Package: 8 pin SOIC (suffix LC)



Approximate Scale 1:1 

Description

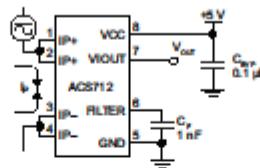
The Allegro® ACS712 provides economical and precise solutions for AC or DC current sensing in industrial, automotive, commercial, and communications systems. The device package allows for easy implementation by the customer. Typical applications include motor control, load detection and management, switched-mode power supplies, and overcurrent fault protection.

The device consists of a precise, low-offset, linear Hall sensor circuit with a copper conduction path located near the surface of the die. Applied current flowing through this copper conduction path generates a magnetic field which is sensed by the integrated Hall IC and converted into a proportional voltage. Device accuracy is optimized through the close proximity of the magnetic signal to the Hall transducer. A precise, proportional voltage is provided by the low-offset, chopper-stabilized BiCMOS Hall IC, which is programmed for accuracy after packaging.

The output of the device has a positive slope ($>V_{IOUT(Q)}$) when an increasing current flows through the primary copper conduction path (from pins 1 and 2, to pins 3 and 4), which is the path used for current sensing. The internal resistance of this conductive path is 1.2 m Ω typical, providing low power

Continued on the next page...

Typical Application

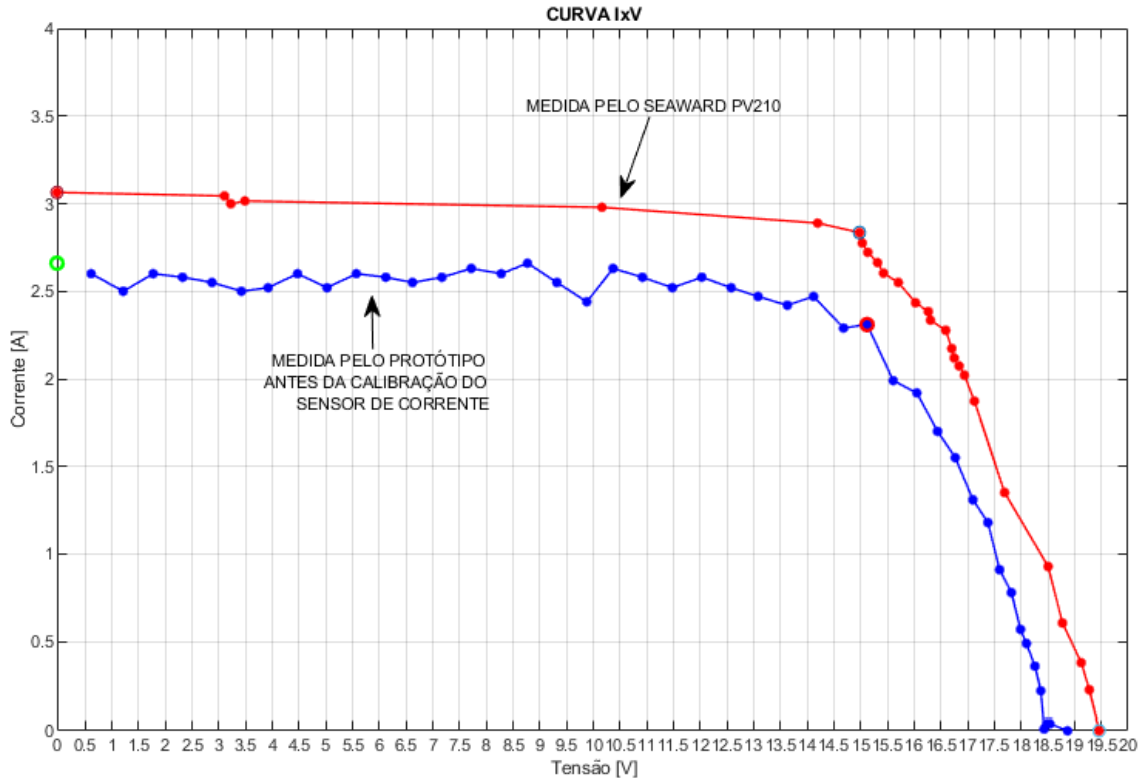


Application 1. The ACS712 outputs an analog signal, V_{OUT} , that varies linearly with the uni- or bi-directional AC or DC primary sensed current, I_p , within the range specified. C_f is recommended for noise management, with values that depend on the application.

ANEXO B – CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE CORRENTE

Ao realizar os primeiros ensaios de curva IV, verificou-se uma distância anormal na curva obtida pelo protótipo em comparação com a curva obtida pelo PV210, como é possível observar na Figura 48 abaixo.

Figura 48 – Resultado obtido antes da calibração do sensor de corrente



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que a diferença entre as curvas se deve principalmente ao fato de que a corrente medida pelo protótipo está abaixo da corrente registrada pelo traçador comercial, embora as tensões apresentem uma boa proximidade. A validação do sensor de corrente mencionada anteriormente foi realizada por meio de um script elaborado na IDE do Arduino, que calculava uma média de pelo menos 100 amostras a cada leitura de corrente. No entanto, para utilizar o sensor na medição da curva IV, foi necessário eliminar essa média do código, pois o tempo de captura não permite que se faça uma média das medições antes de imprimir a corrente lida. O tempo que o Arduino levaria para capturar as amostras poderia resultar em perda de informações durante a medição da curva IV, conforme já descrito. Assim, cada ponto de corrente medido pelo protótipo, representado pela curva na Figura X, é uma única leitura analógica digital (AD) enviada pelo sensor de corrente, que, para ser convertida em corrente, obedece à equação de conversão 5.

$$I_{medida} = ((I_{ad} \cdot (5/1023)) - 2,5) * 0,185 \quad [07]$$

Onde:

I_{medida}(A): Corrente medida pelo sensor de acordo com os dados disponibilizados pelo fabricante do sensor;

I_{ad}: Leitura decimal recebida no pino A/D do Arduino;

Ao perceber que a corrente medida pelo protótipo não estava representando adequadamente a corrente registrada pelo PV210, foi realizada uma calibração do sensor de corrente com o objetivo de encontrar uma nova equação linear que garantisse a conversão adequada dos dados recebidos pelo Arduino. Assim o vetor corrente obtido pelo protótipo foi convertido pela própria Equação 07 reescrita para se obter os valores de *I_{ad}* para algumas amostras determinadas pelo valor de tensão que é praticamente igual nas duas curvas, como demonstra a Tabela 9.

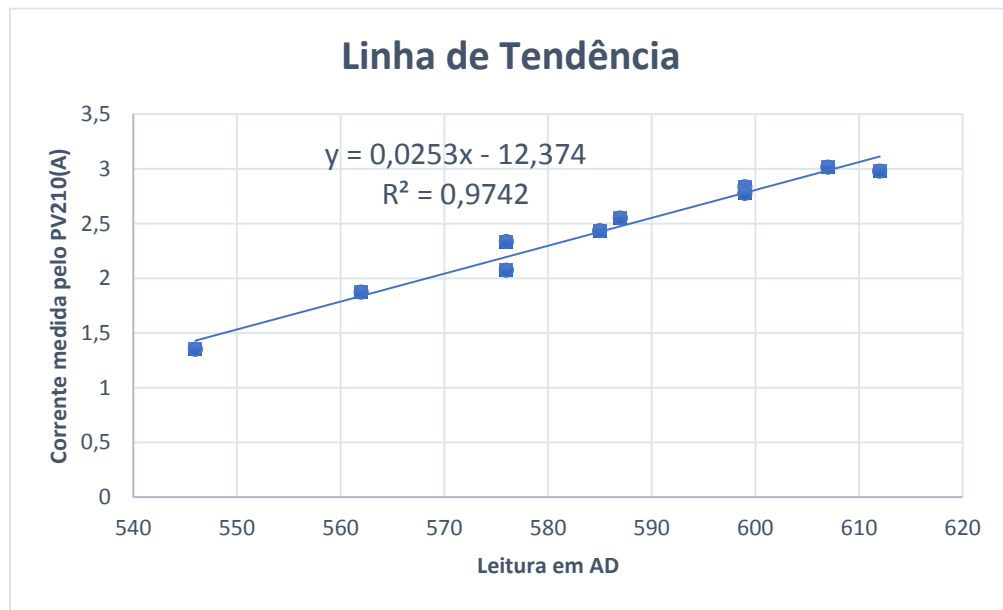
Tabela 9 – Obtenção dos valores AD medidos a partir da corrente

Tensão (V)	Corrente medida pelo protótipo (A)	I_{ad} Calculado	Corrente medida pelo PV210 (A)
3,223	2,9831	607	3,015
10,163	3,1096	612	2,979
14,198	2,7807	599	2,835
15,031	2,7807	599	2,775
15,705	2,4771	587	2,55
16,028	2,4265	585	2,434
16,307	2,1988	576	2,335
16,843	2,1988	576	2,073
17,127	1,8446	562	1,873
17,693	1,4398	546	1,351

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com isso, foi possível correlacionar *I_{ad}* com a corrente medida pelo PV210 e tendo esses dados, foi utilizado software Excel para obter o gráfico de dispersão e a equação que melhor representa a correlação das duas variáveis, por meio da regressão linear. Sendo apresentadas na Figura 49, bem como o R^2 que é o coeficiente de determinação que sendo próximo de 1 indica basicamente que a equação descreve bem a correlação.

Figura 49 – Calibração de corrente



Fonte: Elaborada pelo autor.

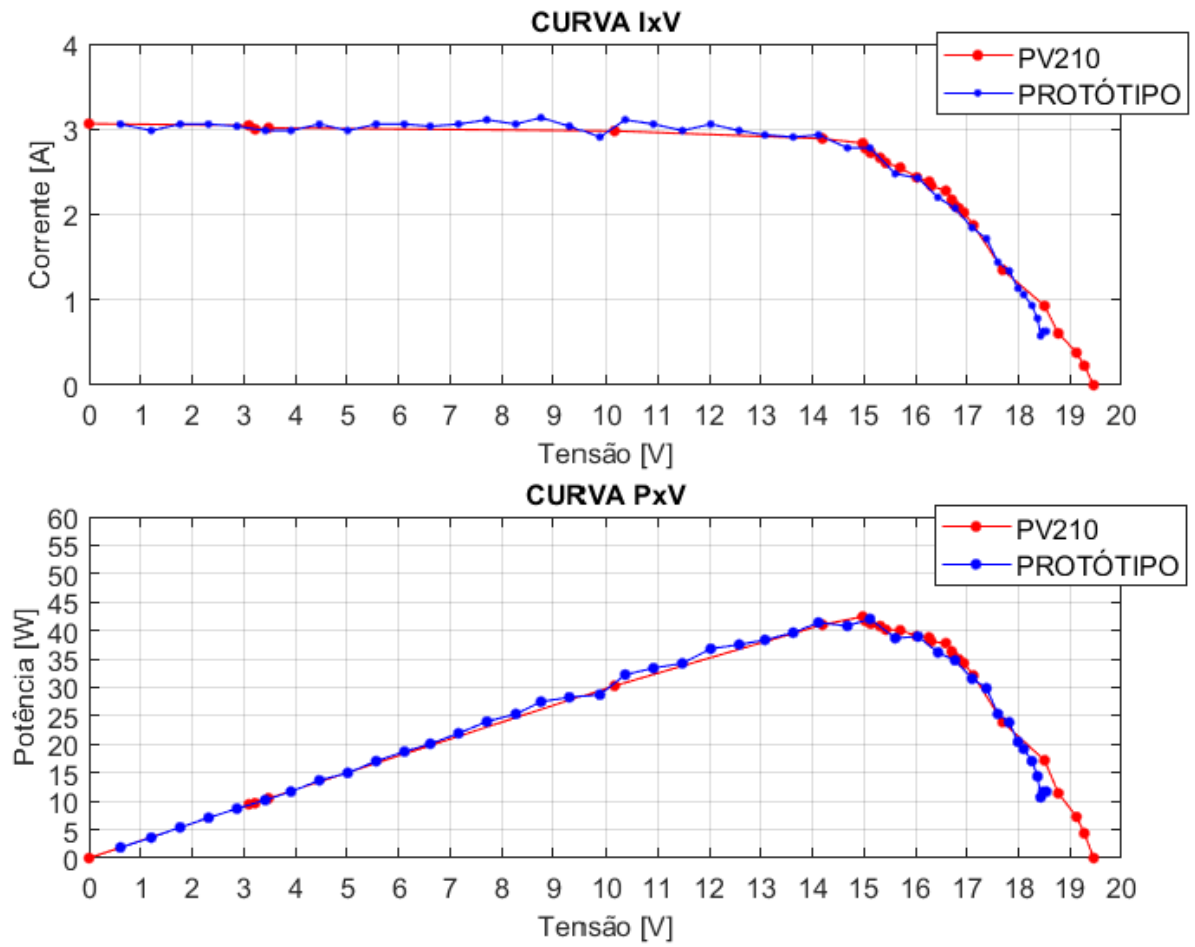
Aplicando a nova equação de calibração no vetor corrente, obteve-se o resultado demonstrado na Tabela 10.

Tabela 10 – Erros após a calibração de corrente das principais variáveis medidas pelo protótipo

Variáveis	PV210	PROTÓTIPO	ERRO (%)
Irradiância (W/m ²)	908,2	921,57	1,5
Temperatura(°C)	53,1	50,8	4,3
Voc (V)	19,5	18,87	3,2
Isc(A)	3,064	3,055	0,3
Vmp(V)	14,98	15,12	0,9
Imp(V)	2,8	2,78	0,7

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 50 - Resultado obtido depois da calibração do sensor de corrente

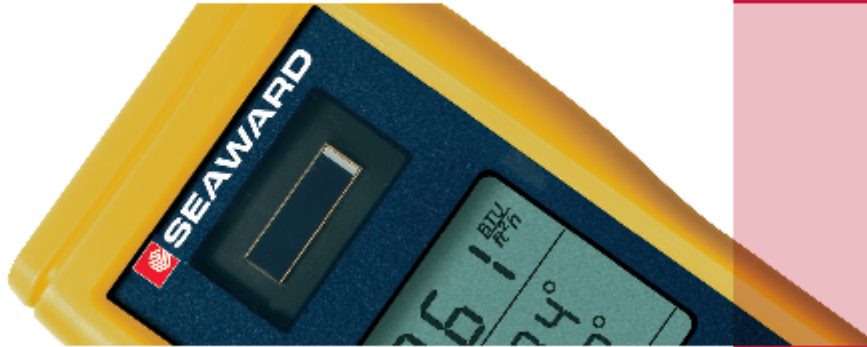


Fonte: Elaborada pelo autor.

ANEXO C – DATASHEET SOLAR SURVEY 200R

Solar Survey 100/200R Series

The ultimate solar site-survey tool.

**Comparison Chart:**

	SS100	SS200R
IEC 62446 compliant	•	•
Irradiance measurement (using solar reference cell)	•	•
Compass function	•	•
Roof pitch measurement	•	•
Ambient temperature	•	•
PV module temperature		•
Data logging function		•
Wireless connectivity		•

Technical Specification:**Irradiance**

Display Range	100 – 1500 W/m ² or 30 – 500 BTU/hr-ft ²
Measurement Range	100 – 1250 W/m ² or 30 – 400 BTU/hr-ft ²
Resolution	1 W/m ² or 1 BTU/hr-ft ²

Temperature

Display Range	-30°C to +125°C
Measurement Range	-30°C to +125°C
Resolution	1°

Compass Bearing

Display Range	0° to 360°
Measurement Range	0° to 360°
Resolution	1°

Inclinometer

Display Range	0° to 90°
Measurement Range	0° to 90°
Resolution	1°

To find out more about the **Solar Survey 100/200R Series** go to seaward-groupusa.com/solar-irradiance-meter

T: +1 813 886 2775 E: sales@seaward-groupusa.com

TESTED, TRUSTED... WORLDWIDE.



SEAWARD
SOLAR SURVEY 100/200R

ANEXO D – DATASHEET SENSOR DE TEMPERATURA

PRELIMINARY

DS18B20
Programmable Resolution
1-Wire[®] Digital Thermometer

DALLAS
SEMICONDUCTOR

www.dalsemi.com

FEATURES

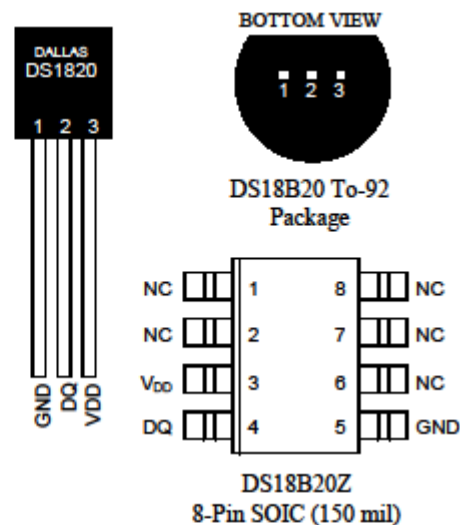
- Unique 1-Wire interface requires only one port pin for communication
- Multidrop capability simplifies distributed temperature sensing applications
- Requires no external components
- Can be powered from data line. Power supply range is 3.0V to 5.5V
- Zero standby power required
- Measures temperatures from -55°C to +125°C. Fahrenheit equivalent is -67°F to +257°F
- ±0.5°C accuracy from -10°C to +85°C
- Thermometer resolution is programmable from 9 to 12 bits
- Converts 12-bit temperature to digital word in 750 ms (max.)
- User-definable, nonvolatile temperature alarm settings
- Alarm search command identifies and addresses devices whose temperature is outside of programmed limits (temperature alarm condition)
- Applications include thermostatic controls, industrial systems, consumer products, thermometers, or any thermally sensitive system

DESCRIPTION

The DS18B20 Digital Thermometer provides 9 to 12-bit (configurable) temperature readings which indicate the temperature of the device.

Information is sent to/from the DS18B20 over a 1-Wire interface, so that only one wire (and ground) needs to be connected from a central microprocessor to a DS18B20. Power for reading, writing, and performing temperature conversions can be derived from the data line itself with no need for an external power source.

Because each DS18B20 contains a unique silicon serial number, multiple DS18B20s can exist on the same 1-Wire bus. This allows for placing temperature sensors in many different places. Applications where this feature is useful include HVAC environmental controls, sensing temperatures inside buildings, equipment or machinery, and process monitoring and control.

PIN ASSIGNMENT**PIN DESCRIPTION**

- GND - Ground
 DQ - Data In/Out
 V_{DD} - Power Supply Voltage
 NC - No Connect

ANEXO E – SCRIPT IMPLEMENTADO PARA CAPTURA IV NA IDE ARDUINO

```

//Inclusão de Bibliotecas e definições.
#include <OneWire.h> // Biblioteca comunicação digital
#include <DallasTemperature.h> // Biblioteca sensor de temperatura
#define ONE_WIRE_BUS 8 //Pino digital do sensor de temperatura
OneWire oneWire (ONE_WIRE_BUS); //Configuração da comunicação digital
DallasTemperature sensors (&oneWire); //Sensor de temperatura recebendo
a referência de comunicação

void setup() {
Serial.begin(2000000); //Iniciar comunicação serial em 2Mbps
sensors.begin(); //Iniciar comunicação digital com o sensor de
temperatura
pinMode(7, OUTPUT); // Configura pino do Relé como saída
digitalWrite(7, HIGH); // Pino do relé inicia com nível lógico alto
Serial.println("Deseja iniciar o teste de curva IxV? Se sim, digite
's'. "); //Imprime unica frase na serial
while(Serial.available()==0){} //Espera receber dado pela serial
}

void loop() {
char c; //declaração da variável c como char que será recebida na
serial
if (Serial.available ()>0){ //Se receber algum valor da serial
c = Serial.read(); // armazena valor recebido na serial
if (c == 's'){ //compara valor recebido com 's' se sim inicia o
primeiro estágio do teste
float leiturair = analogRead(A4); //Ler porta analógica 4 onde está
conectado o sensor de irrad
float irrad = (leiturair*1.2947)-6.7308; //Converte o valor lido para
w/m²
sensors.requestTemperatures(); // Chama função para ler temperatura
float tempC1 = sensors.getTempCByIndex(0); // Armazena o valor de temp
na variável
//if(irrad>=750){
Serial.print("Irradiância (W/m²): "); //Imprime irradiância e
temperatura lida;
Serial.println(irrad);
Serial.print("Temperatura (°C): ");
Serial.println(tempC1);
noInterrupts(); //A partir dessa linha o código não pode ser
interrompido
float p = 1; //variável para ligar o relé de carga dentro da

```

```

interrupção
if (p==1) { digitalWrite(7,LOW); // Liga bobina do RELÉ de Carga}
//Pegar dados da curva IxV
  for (int i=0; i <= 100; i ++){//captura 100 pares IV;
    float I1 = analogRead(A0); // Ler sensor de corrente em AD
    float V1 = analogRead(A2); // Ler sensor de tensão em AD
    float V2 = ((V1*5/1023))*11.288;//Converte a tensão lida em AD
para V
    float I2 = ((0.0253*I1)-12.374);//Converte a corrente lida em AD
para A
Serial.print ("Tensão(V): ");//Imprime na serial o par IV lido
separado por espaço
Serial.print (V2);
Serial.print (" ");
Serial.print ("Corrente(A): ");
Serial.println (I2);
  }
  interrupts();//Cancela a interrupção
  digitalWrite(7,HIGH); // desliga a bobina do RELÉ de Carga abrindo
o circuito
} }}}
//}

```

ANEXO F – SCRIPT ELABORADO NO MATLAB PARA LER ARQUIVO .TXT DO ENSAIO

17/09/24 23:35 C:\Users\mathe\On...\LERTXT IXV OFICIAL.m 1 of 2

```

file = 'C:\Users\mathe\OneDrive\Área de Trabalho\TCCEL\ARQUIVOS TXT COM
LEITURAS\testesensorcorrente\86.txt';%caminho do arquivo txt com as medições
datal = fopen(file, 'r');%abrir o txt para ler linha a linha
u=fgetl(datal);%variavel u armazena e pula a linha de chamada do arquivo
Ir = regexp(fgetl(datal), '\s','split');%armazena a frase da irradiância na variavel
Ir
Irr=str2double(Ir(2));%armazena o valor da irradiância capturada pelo sensor
t = regexp(fgetl(datal), '\s','split');%armazena a frase da irradiância na variavel t
temp=str2double(t(2));%armazena o valor da irradiância capturada pelo sensor
data= readtable(file,'HeaderLines',3); %abre o arquivo txt apenas na parte de
tabulação de dados de corrente e tensão, pulando 3 linhas de início
V1 = data.Var2;%tensão em V
I1 = data.Var4;%corrente em A
%organização das variáveis lidas pelo arduino (eliminar numeros negativos)
x1 = length(V1);%variável que armazena a quantidade dos pontos
%laço que reescreve os vetores eliminando numeros negativos garantindo uma
%boa leitura das variáveis capturadas
for a1 = 1:1:x1
    V(1,a1)= V1(a1);
    I(1,a1)= I1(a1);
end
p1 = V.*I; % vetor potência
Voc1 = max(V);%Tensão de circuito aberto medida
Isc1 = max(I);%Corrente de curto circuito medida
Pmp1 = max(p1);%Máxima Potência
%Variavel auxiliar para loop que encontra corrente e tensão de máxima pot.
x = length(V);
a=0;
for a = 1:x
    if(V(a)*I(a) == Pmp1)
        Vmp1 = V(a);
        Imp1 = I(a);
    end
end
%plot das curvas
subplot(2,1,1);
plot(V,I,'color', 'b', 'LineWidth', 1.5);
hold on
plot (Voc1,0,'o', 'color', 'y', 'LineWidth', 1.8);
hold on
plot (0, Isc1,'o', 'color', 'g', 'LineWidth', 1.8);
hold on
plot(Vmp1, Imp1, 'o', 'color', 'r', 'LineWidth', 1.8);
legend('IxV', 'Voc', 'Isc', ' (Vmp, Imp) ');
hold on;
title('CURVA IxV');
xlabel ('Tensão [V]');
ylabel ('Corrente [A]')
txt = ['W/m²'];
text(Vmp1-0.8, Imp1+1,txt);
txt = ['°C'];
text(Vmp1-2, Imp1+1,txt);
txt = ['°C'];
text(Vmp1-2.8, Imp1+1,txt);
txt = [t(2)];

```

17/09/24 23:35 C:\Users\mathe\On...\LERTXT IXV OFICIAL.m 2 of 2

```
text(Vmpl-4,Imp1+1,txt);
grid on;
grid on;

hold on;
subplot(2,1,2)
plot(V,pl,'color','b','LineWidth',1.5);
hold on
plot(Vmpl,Pmpl,'o','color','r','LineWidth',1.8);
hold on
legend('PxV','Pmáx');
hold on;
title('CURVA PxV')
xlabel('Tensão [V]');
ylabel('Potência [W]');
grid on;
```

ANEXO G – DATASHEET PV210

Technical Specifications

Earth continuity / resistance measurement

Display range	0.00 to 199 Ω
Measurement range	0.01 to 199 Ω
Accuracy	$\pm(2\% \text{ rdg} + 5\text{d})$
Resolution	0.01 Ω maximum
Open circuit test voltage	4VDC, nominal
Test leads zero	Zero up to 10 Ω , by Zero button
Number of measurements	5,000 x 1 second tests
Audible / visible warning	$\geq 30\text{VAC/DC}$ at inputs
User protection	Test inhibited if $\geq 30\text{VAC/DC}$ at inputs

Insulation resistance (auto short circuit test)

Display range	0.05 - 200M Ω
Measurement range	0.05 - 200M Ω
Accuracy	$\pm(5\% \text{ rdg} + 5\text{d})$ $\pm(10\% \text{ rdg} + 5\text{d})$ 101 - 200M Ω
Resolution	0.01M Ω maximum
Open circuit test voltage	250, 500, 1000V (as per IEC 61557-2)
Test current	1mA nominal as per IEC 61557-2
Short circuit test current	<2mA
Number of measurements	5,000 x 1 second tests
Audible / visible warning	$\geq 30\text{VAC/DC}$ at inputs
User protection	Test inhibited if $\geq 30\text{VAC/DC}$ at inputs

Insulation resistance (point to point)

Display range	0.05 to 300M Ω
Measurement range	0.05 to 300M Ω
Accuracy	$\pm(5\% \text{ rdg} + 5\text{d})$
Resolution	0.01M Ω maximum
Open circuit test voltage	250, 500, 1000V (as per IEC 61557-2)
Short circuit test current	<1mA
Number of measurements	5,000 x 1 second tests
Audible / visible warning	$\geq 30\text{VAC/DC}$ at inputs
Circuitry protection	Test inhibited if $\geq 30\text{VAC/DC}$ at inputs

Voltage measurement (via 4mm probes)

Display range	30V – 440VAC/DC
Measurement range	30V – 440VAC/DC
Resolution	1V
Accuracy	$\pm(5\% \text{ rdg} + 2\text{d})$

Vo/c voltage measurement (via PV test leads)

Display range	0.0V – 1000VDC
Measurement range	5.0V – 1000VDC
Resolution	0.1V
Accuracy	$\pm(0.5\% \text{ rdg} + 2\text{d})$
Enunciators	DC voltage polarity correct or reversed

Is/c current measurement (via PV test leads)

Display range	0.0A – 15.0ADC
Measurement range	0.5A – 15.0ADC
Resolution	0.1A
Accuracy	$\pm(1\% \text{ rdg} + 2\text{d})$

Operating current (via DC current clamp)

Display range	0.0A – 40.0A AC/DC
Measurement range	0.1A – 40.0A AC/DC
Resolution	0.1A
Accuracy	$\pm(5\% \text{ rdg} + 2\text{d})$

DC power

Display range	0.0W – 40.0kW
Measurement range	10W – 40.0kW
Resolution	10W max
Accuracy	$\pm(6\% \text{ rdg} + 2\text{d})$

I-V curve

Maximum power dissipation	10kW
Number of points	Dynamic up to 128
MPP calculation max error	$\pm(1.5\% \text{ rdg} + 40\text{w})$