

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CHRISTIAN GRIEHL BONFIM

**ARQUITETURA BASEADA EM WEB E IOT PARA AVALIAÇÃO DE
DESEMPENHO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

CAMPO MOURAO

2025

CHRISTIAN GRIEHL BONFIM

**ARQUITETURA BASEADA EM WEB E IOT PARA AVALIAÇÃO DE
DESEMPENHO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

**Web and iot-based architecture for performance assessment of photovoltaic
panels**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em Inovações
Tecnológicas, da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Gilson Junior Schiavon.

CAMPO MOURAO

2025



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Campo Mourão



CHRISTIAN GRIEHL BONFIM

**ARQUITETURA BASEADA EM WEB E IOT PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Inovações Tecnológicas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Inovações Tecnológicas.

Data de aprovação: 16 de Setembro de 2025

Dr. Gilson Junior Schiavon, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Eduardo Giometti Bertogna, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Luciano Ferreira, Doutorado - Universidade Estadual do Paraná (Unespar)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 16/09/2025.

Dedico este trabalho à minha esposa, minha maior incentivadora, e luz nos momentos difíceis.

RESUMO

O rendimento de painéis fotovoltaicos é tradicionalmente avaliado por meio da curva corrente-tensão (I-V), parâmetro essencial para identificar defeitos e determinar ações corretivas, como a limpeza dos painéis ou a substituição de módulos danificados. Diferente da simples medição da corrente de curto-circuito e da tensão de circuito aberto (que podem ser obtidas com multímetro e alicate amperímetro), a análise completa da curva I-V permite verificar se o painel está operando em seu máximo potencial produtivo. Apesar de sua relevância, o uso de traçadores de curva I-V ainda é pouco comum, principalmente em sistemas de menor potência, como os residenciais, devido ao alto custo dos equipamentos comerciais. Para contornar essa limitação, este trabalho propõe o desenvolvimento de um traçador de curva I-V automatizado, acessível e escalável, baseado em tecnologias *web* e IoT. A arquitetura proposta é composta por três módulos principais: uma interface *web* desenvolvida em React.js, uma API implementada em Express.js e um dispositivo de controle, representado por um microcontrolador ESP32. O funcionamento segue a seguinte sequência: ao acessar a interface *web*, o usuário pode iniciar a geração da curva com um único comando. Essa solicitação é enviada à API, que publica o comando de início das medições em um *broker* MQTT. O ESP32, ao receber o comando do *broker*, executa o controle de uma carga eletrônica virtual, variando o *duty cycle* de um sinal PWM de 100% até 0% e realizando as leituras de corrente e tensão necessárias para compor a curva. Como o foco do projeto está no desenvolvimento de *software*, não há implementação física do *hardware* para medições reais. Em vez disso, o sistema consulta valores predefinidos, os retornando como valores de corrente e tensão medidos em tempo real. Essa simulação representa a variação de resistência desde o curto-circuito até o circuito aberto, permitindo percorrer toda a curva característica do painel. Além disso, o ESP32 simula um controle de temperatura em malha fechada, buscando atingir a temperatura de 25 °C no painel (condição padrão para medições de eficiência). Durante a variação do PWM, os dados de corrente e tensão são enviados ao *broker* MQTT e, em seguida, repassados pela API à interface *web*, que processa e apresenta ao usuário o gráfico final da curva I-V. Os resultados obtidos indicam que a solução proposta é uma alternativa viável para estudos e desenvolvimento, com potencial de integração em sistemas de monitoramento remoto e contribuição relevante para o campo das energias renováveis, ao combinar tecnologias *web* modernas com controle embarcado de precisão.

Palavras-chave: curva I-V; traçador de curva I-V; inovação; monitoramento remoto; IoT; energia fotovoltaica.

ABSTRACT

The performance of photovoltaic panels is traditionally evaluated using the current-voltage (I-V) curve, an essential parameter for identifying defects and determining corrective actions, such as cleaning the panels or replacing damaged modules. Unlike simply measuring the short-circuit current and open-circuit voltage (which can be obtained with a multimeter and clamp meter), a complete I-V curve analysis verifies whether the panel is operating at its maximum productive potential. Despite its relevance, the use of I-V curve tracers is still uncommon, especially in smaller-scale systems like residential ones, due to the high cost of commercial equipment. To overcome this limitation, this work proposes the development of an automated, accessible, and scalable I-V curve tracer based on web and IoT technologies. The proposed architecture consists of three main modules: a web interface developed with React.js, an API implemented with Express.js, and a control device, represented by an ESP32 microcontroller. The operation follows this sequence: when accessing the web interface, the user can initiate the curve generation with a single command. This request is sent to the API, which publishes the command to start measurements to an MQTT broker. Upon receiving the command from the broker, the ESP32 controls a virtual electronic load, varying the duty cycle of a PWM signal from 100% down to 0% and performing the necessary current and voltage readings to compose the curve. As the project's focus is on software development, there is no physical hardware implementation for real measurements. Instead, the system consults predefined values, returning them as real-time current and voltage measurements. This simulation represents the resistance variation from short-circuit to open-circuit, allowing the entire characteristic curve of the panel to be traversed. Additionally, the ESP32 simulates a closed-loop temperature control, aiming to reach a panel temperature of 25 °C (the standard condition for efficiency measurements). During the PWM variation, the current and voltage data are sent to the MQTT broker and then forwarded by the API to the web interface, which processes and presents the final I-V curve graph to the user. The obtained results indicate that the proposed solution is a viable alternative for studies and development, with the potential for integration into remote monitoring systems and a relevant contribution to the field of renewable energy by combining modern web technologies with precision embedded control.

Keywords: I-V curve; I-V curve tracer; innovation; remote monitoring; IoT; photovoltaic energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Associação entre células fotovoltaicas.	13
Figura 2 - Módulo FV com 60 células e 3 diodos de <i>bypass</i>	14
Figura 3 - Representação das curvas I-V e P-V.	15
Figura 4 - Curvas I-V e P-V para níveis diferentes de (a) irradiação solar e (b) temperatura.....	17
Figura 5 - Curvas I-V e P-V sob efeito de sombreamento parcial.	17
Figura 6 - Comportamento da curva na associação de módulos.	18
Figura 7 - Efeito do sombreamento de painéis em um array.....	19
Figura 8 - Modelos de traçadores de curva I-V disponíveis no mercado.	20
Figura 9 - Efeito do sombreamento em um inversor <i>string</i>	22
Figura 10 - Efeito do sombreamento ao utilizar microinversores.....	22
Figura 11 - Estrutura do projeto.....	26
Figura 12 - Fluxograma de funcionamento da página <i>web</i>	27
Figura 13 - Configuração inicial da API.....	28
Figura 14 - Fluxograma de funcionamento da API.....	29
Figura 15 - Fluxograma das configurações iniciais do ESP32.....	31
Figura 16 - Fluxograma de funcionamento do ESP32.....	32
Figura 17 - Protótipo para leitura dos sinais PWM e controle de temperatura manual.....	33
Figura 18 - Visualização inicial da página <i>web</i>	34
Figura 19 - Visualização no HiveMQ do <i>status</i> do ESP32.....	34
Figura 20 - Mensagem de erro na comunicação.....	35
Figura 21 - Estrutura JSON de solicitação de medição.	35
Figura 22 - Recebimento da solicitação da medição no <i>broker</i> MQTT.....	36
Figura 23 – PWM no início da medição (a) e 10 segundos após o início (b).....	36
Figura 24 - Controle PWM da carga eletrônica.	37
Figura 25 - Dados retornados pelo ESP32 ao <i>broker</i> MQTT.....	38
Figura 26 - Mensagem de fim das medições.....	38
Figura 27 - Formato JSON de retorno à página <i>web</i>	39
Figura 28 - Resultado final da Curva I-V.....	39
Figura 29 - Visualização ponto a ponto das medições retornadas pelo ESP3240	

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	<i>Alternating Current</i>
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DOM	<i>Document Object Model</i>
FV	Fotovoltaico
GND	<i>Ground</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracker</i>
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
SPA	<i>Single Page Application</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
URL	<i>Uniform Resource Locator</i>
VPS	<i>Virtual Private Server</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivo Geral	11
2.2	Objetivos específicos	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1	Energia fotovoltaica	12
3.1.1	Célula fotovoltaica	12
3.1.2	Painel fotovoltaico	13
3.2	Análise de eficiência em um sistema FV	14
3.2.1	MOSFET operando como carga eletrônica	15
3.2.2	Curvas I-V e P-V.....	15
3.2.3	Influências de temperatura e irradiação	16
3.3	Traçadores de Curva I-V comerciais	19
3.4	MPPT - <i>Maximum Power Point Tracker</i>	20
3.5	Inversores de tensão	21
3.5.1	Inversores <i>string</i>	21
3.5.2	Microinversores	22
3.6	Demais tecnologias utilizadas no projeto	23
3.6.1	React.js	23
3.6.2	Express.js	23
3.6.3	MQTT	24
3.6.4	ESP32	24
4	METODOLOGIA	26
4.1	Página web	27
4.2	API	27
4.3	Broker MQTT	30
4.4	ESP32	30
5	RESULTADOS	33
5.1	<i>Hardware</i>	33
5.2	<i>Software</i>	34
6	CONCLUSAO	41
7	TRABALHOS FUTUROS	42
8	REFERENCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia elétrica, somada à necessidade urgente de reduzir as emissões de dióxido de carbono, tem motivado o mundo a investir em fontes renováveis, com destaque para a energia solar, que apresenta o crescimento mais acelerado entre elas (Reischauer; Rix, 2019).

O desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica (FV) e a sua capacidade de conversão de energia solar em energia elétrica na forma de corrente contínua (DC), foi fundamental para esse avanço. No entanto, uma única célula FV gera aproximadamente 0,5 V, o que exige a associação de múltiplas células em configuração série-paralelo para formar painéis solares com tensão e corrente adequadas ao uso prático (Al-Ezzi; Ansari, 2022). Atualmente, a potência de um painel FV gira em torno de algumas centenas de Watts, que na maioria das vezes, assim como as células FV, precisam ser associadas para se ter uma geração satisfatória de energia (Guerriero P.; Cennamo P.; Daliento S., 2018).

Porém é importante saber que é natural que os painéis sofram degradações causadas pelo envelhecimento, desgaste e exposição ao ar livre, o que conseqüentemente diminui a sua eficiência (Morales-Aragonés et al., 2021).

Alguns projetos chegam a ter milhares de painéis conectados e, dependendo do inversor de tensão utilizado, isso pode ser um problema, porque um defeito em apenas um painel pode causar perdas significativas em toda a geração (Guerriero P.; Cennamo P.; Daliento S., 2018).

Por conta disso é necessário verificar a confiabilidade do sistema, de forma que se possa extrair a máxima potência possível dos painéis. Um dos equipamentos mais importantes para o comissionamento de um sistema FV é o traçador de curva I-V, que é capaz de fornecer os parâmetros elétricos mais importantes do sistema, como a corrente de curto-circuito (I_{SC}), a tensão de circuito aberto (V_{OC}) e o ponto de máxima potência (M_{PP}). A comparação desses valores com as especificações do fabricante permite detectar anomalias e tomar ações corretivas (Campos et al., 2019).

Os métodos de obtenção da curva I-V de um painel fotovoltaico compartilham de um mesmo princípio, que é o de utilizar uma carga com resistência variável conectada em série com o painel. A resistência é variada linearmente desde o circuito aberto (corrente nula) até o curto-circuito (corrente máxima).

Durante esta variação, amostras de corrente e tensão são medidas periodicamente, permitindo mapear o comportamento elétrico do painel e gerar a curva I-V para avaliação de seu desempenho (Brito; Machado, 2022).

Esta resistência em questão pode ser representada, por exemplo, por um transistor MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) operando como uma carga eletrônica, no qual é possível variar a sua resistência entre *Drain* e *Source* através da variação do *duty cycle* de um sinal PWM (*Pulse Width Modulation*) em seu *Gate*.

Durante a aquisição de dados no painel fotovoltaico, dois fatores exercem forte influência sobre a qualidade das medições, sendo eles a irradiação solar e a temperatura o módulo. Enquanto a primeira afeta diretamente a corrente de curto-circuito (I_{SC}), a segunda impacta a tensão de circuito aberto (V_{OC}) (Morales-Aragonés et al., 2021).

Essas variáveis dificultam a obtenção de sinais em condições ideais, que correspondem a 25 °C de temperatura e 1000 W/m² de irradiação solar (Monokroussos et al., 2023). Para garantir tais parâmetros, a geração da curva I-V deveria ser realizada em ambiente controlado.

Embora seja difícil controlar a irradiância solar, o que exige a realização das medições sob condições ambientais favoráveis ou, alternativamente, com o uso de um simulador solar, a temperatura pode ser controlada ativamente.

Diante deste cenário, o presente projeto propõe um sistema integrado para traçado automatizado de curvas I-V, combinando: a implementação de um controle PWM para uma carga eletrônica; um sistema de controle de temperatura para manutenção de uma das condições padrão de testes; uma plataforma *web* para solicitação e visualização remota dos resultados.

Esta solução visa democratizar o acesso à tecnologia de diagnóstico fotovoltaico, especialmente para sistemas de pequeno e médio porte, onde os elevados custos dos equipamentos comerciais representam barreira significativa à adoção de práticas eficientes de monitoramento e manutenção.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema integrado para o traçado automatizado de curvas I-V em painéis fotovoltaicos, combinando carga eletrônica virtual controlada por PWM, controle de temperatura e plataforma *web* para solicitação e monitoramento remoto dos resultados.

2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um protótipo de controle de carga eletrônica com ESP32, que gera um sinal PWM iniciado por um comando remoto.
- Simular um controle térmico em malha fechada, onde o *duty cycle* do PWM é ajustado dinamicamente com base nos dados de leitura da temperatura.
- Criar uma API em Express.js responsável pela comunicação entre um *broker* MQTT e uma interface *web*, garantindo confiabilidade na troca de comandos e dados.
- Interpretar e disparar dados pelo ESP32 ao *broker* MQTT.
- Desenvolver uma interface *web* em React.js, que permita ao usuário solicitar remotamente a geração da curva I-V e visualizar o gráfico resultante.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Energia fotovoltaica

Nas últimas três décadas a demanda energética para usos comerciais e residenciais tem crescido de forma acelerada. No início, energias geradas a partir de combustíveis fósseis como carvão e gás natural dominavam o mercado, no entanto, a combustão destes materiais dispersa gás carbônico (CO₂) na atmosfera, gerando impactos ambientais. Devido a isso, países em todo o mundo tem restringido cada vez mais o uso desses tipos de combustíveis, e incentivado a utilização de fontes de energias renováveis (Olayiwola; Hyun; Choi, 2024).

A forma de energia limpa mais amplamente utilizada tem sido a fotovoltaica, que exige baixos custos de operação e manutenção. Estima-se que com a irradiância solar na superfície do planeta terra seria possível gerar 10 mil vezes mais energia do que se é consumido, no entanto, a eficiência da conversão de energia e as não linearidades geradas pelos módulos fotovoltaicos ainda são uma barreira no momento da geração (Silva et al., 2018).

3.1.1 Célula fotovoltaica

As células fotovoltaicas, também conhecidas como células solares, são dispositivos que convertem a luz do sol diretamente em eletricidade. Esse processo ocorre graças ao efeito fotovoltaico, um fenômeno físico que acontece em materiais semicondutores, como o silício (Pavlik; Mamchur, 2023).

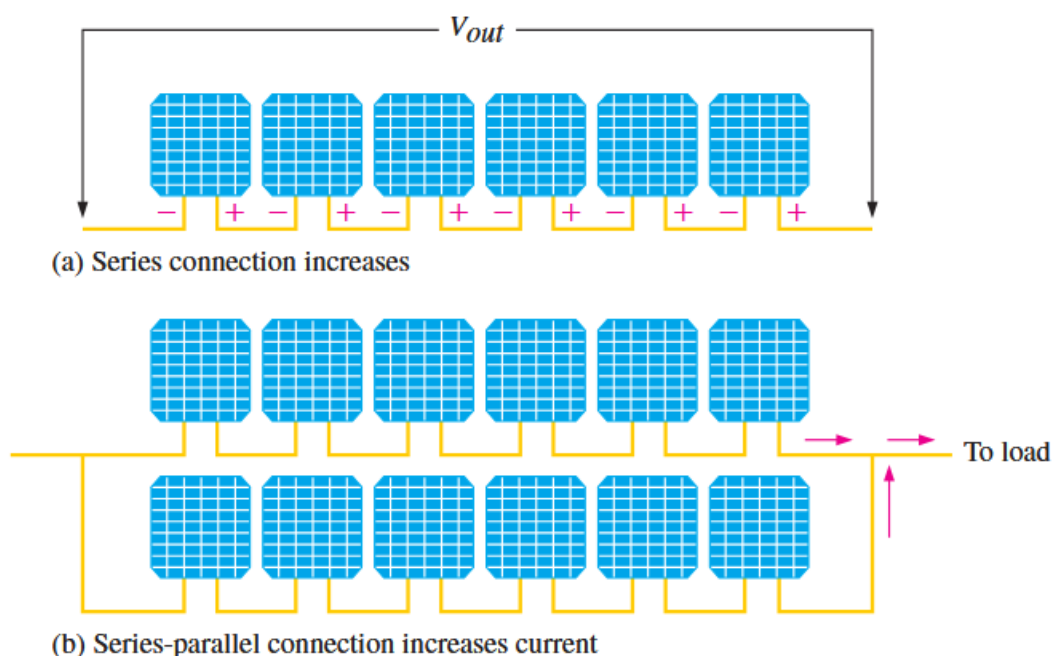
Uma célula solar é formada por duas camadas de silício: uma dopada com excesso de elétrons (tipo N) e outra com deficiência de elétrons (tipo P). Quando a luz solar incide sobre a célula, os fótons excitam os elétrons ligados, criando pares elétron-lacuna próximos à junção P-N. O campo elétrico interno nessa junção separa essas cargas: os elétrons são atraídos para a região tipo N e as lacunas para a região tipo P. Essa separação gera uma diferença de potencial. Ao conectar um circuito externo, os elétrons fluem da camada N para a camada P, produzindo corrente elétrica (Al-Ezzi; Ansari, 2022).

A tensão útil gerada por uma célula fotovoltaica varia entre 0,5 V e 0,6 V, o que inviabiliza seu uso isolado. Já a corrente produzida depende diretamente da irradiância solar, tamanho da célula e eficiência (Floyd T., 2011).

3.1.2 Painel fotovoltaico

Segundo Floyd T. (2011), ao se utilizar uma célula fotovoltaica capaz de gerar tensão de 0,5 V e uma corrente máxima de 2 A, para atingir valores maiores de tensão seria necessária uma associação em série de várias dessas células, conforme Figura 1a. Caso a associação fosse feita entre 6 células, por exemplo, a tensão na saída seria de 3V, porém a corrente permaneceria a mesma. Para aumentar os valores de corrente, seria necessário associar também células em paralelo, como representado na Figura 1b.

Figura 1 - Associação entre células fotovoltaicas.

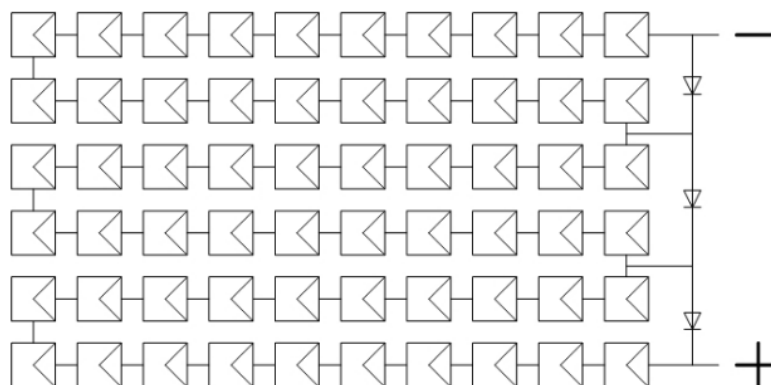


Fonte: Floyd et al. (2011)

Com essas associações, é possível atingir valores de tensão e corrente mais relevantes, chegando ao que é conhecido e comercializado hoje como painel fotovoltaico, ou módulo fotovoltaico.

Campos et al. (2019), afirmam que durante o processo produtivo de um painel, são adicionados alguns diodos de *bypass*, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Módulo FV com 60 células e 3 diodos de *bypass*.



Fonte: Campos et al. (2019)

Os módulos FV geralmente contêm três ou quatro diodos de *bypass*, como mostra a Figura 2. Esses diodos são integrados durante a fabricação para evitar a formação de *hotspots*, que ocorrem quando há diferenças de corrente entre as células — como em casos de sombreamento, por exemplo. Quando uma célula sombreada não consegue conduzir a corrente necessária, os diodos de *bypass* atuam como um caminho alternativo, desviando o fluxo de corrente (Campos et al., 2019).

3.2 Análise de eficiência em um sistema FV

A forma mais utilizada para caracterizar uma célula ou módulo fotovoltaico é por meio da obtenção de suas curvas de resposta, que apresentam informações de tensão, corrente e potência. Essas respostas do dispositivo são conhecidas como curvas I–V e P–V. Tais curvas características fornecem dados importantes sobre o estado da célula ou módulo em análise e dependem diretamente da temperatura e da radiação recebida (Morales-Aragonés et al., 2021).

Para obter a curva característica I–V de um painel solar, é necessário utilizar uma carga variável conectada em série com o painel em teste. Essa carga deve permitir um ajuste contínuo da resistência, variando desde uma condição de circuito aberto (resistência infinita) até um curto-circuito (resistência nula). Durante essa variação, devem ser realizadas medições periódicas da tensão e corrente no painel, permitindo assim a construção da curva I–V com base nos pontos coletados (Londoño; Cano; Velilla, 2022).

Uma implementação prática para essa carga variável pode ser feita utilizando um MOSFET operando como carga eletrônica.

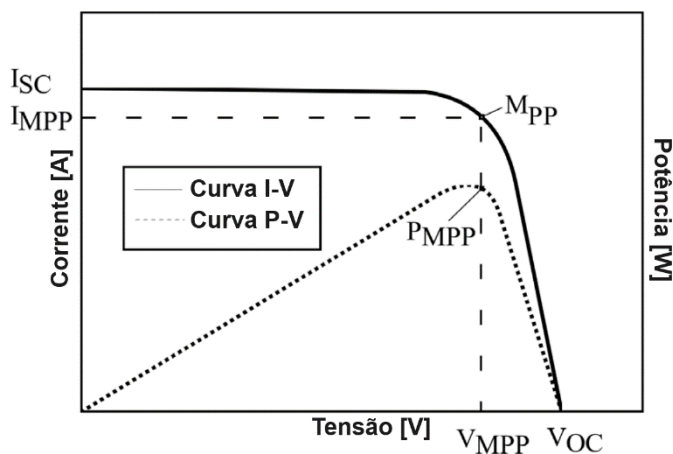
3.2.1 MOSFET operando como carga eletrônica

Nessa configuração, aplica-se um sinal PWM no terminal *Gate* do transistor, onde a variação do *duty cycle* permite controlar sua resistência de forma eficiente. Quando o *duty cycle* está em 0%, o MOSFET se comporta como um circuito aberto, bloqueando a passagem de corrente. À medida que o *duty cycle* aumenta, a resistência equivalente diminui, até atingir 100%, quando o transistor simula um curto-circuito, permitindo a máxima corrente. Dessa forma, ao monitorar continuamente a tensão e corrente no painel enquanto se varre todo o intervalo do PWM, obtêm-se os dados necessários para traçar a curva I-V com precisão. Essa abordagem oferece um método eficaz e controlável para caracterizar o desempenho do painel solar em diferentes condições de operação.

3.2.2 Curvas I-V e P-V

A curva característica de um painel fotovoltaico, gerada sob condições ideais, está representado na Figura 3.

Figura 3 - Representação das curvas I-V e P-V.



Fonte: Morales-Aragonés et al. (2021)

Conforme afirmam Pavlik; Mamchur, (2023), ao visualizar a curva é possível notar algumas informações valiosas a respeito do módulo em teste, sendo elas:

- Tensão de circuito aberto (V_{oc}): É a tensão máxima que o painel consegue disponibilizar. Ocorre quando não há cargas conectadas e não há corrente sendo consumida;

- Corrente de curto circuito (I_{SC}): É a corrente máxima que o painel consegue disponibilizar, e ocorre quando os terminais do painel estão em curto circuito;
- Ponto de máxima potência (M_{PP}): É o ponto de operação do painel, de onde é possível extrair a sua máxima potência, e é obtido através do produto das medições de corrente e tensão. Derivando deste ponto temos a corrente de operação (I_{MPP}) e também a tensão de operação (V_{MPP}).

As medições das curvas disponibilizadas nos painéis são normalmente geradas em ambientes controlados, mantendo irradiância solar de 1000 W/m^2 e temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, inviabilizando que as medições em campo tenham o mesmo resultado, como mostra a Tabela 1, que traduzindo para o português diz “STC (Condições Padrões de Testes): Irradiância 1000 W/m^2 , Temperatura no módulo $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (com erro de 2 graus para mais ou para menos)”.

Tabela 1 - Datasheet de um painel fotovoltaico.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS | STC*

Nominal Power Watt Pmax(W)*	550	555	560	565	570	575
Maximum Power Voltage Vmp(V)	38.10	38.30	38.50	38.70	38.90	39.10
Maximum Power Current Imp(A)	14.44	14.50	14.55	14.60	14.66	14.71
Open Circuit Voltage Voc(V)	46.00	46.20	46.40	46.60	46.80	47.00
Short Circuit Current Isc(A)	15.34	15.39	15.39	15.44	15.49	15.54
Module Efficiency (%)	21.3	21.5	21.7	21.9	22.1	22.3

*The data above is for reference only and the actual data is in accordance with the practical testing

*STC (Standard Test Condition): Irradiance 1000W/m^2 , Module Temperature $25\pm 2^\circ\text{C}$, AM 1.5

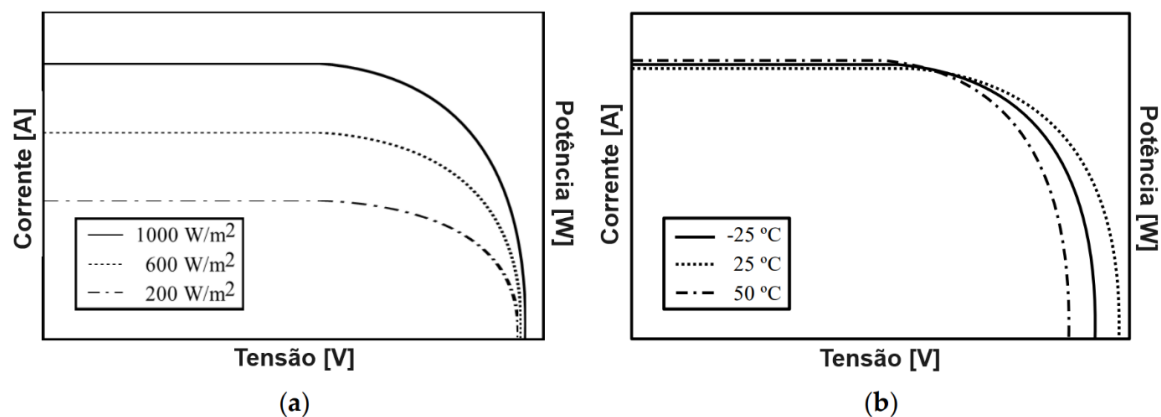
*Measuring uncertainty: $\pm 3\%$, all the electrical characteristics such as Power, Im, Vm and FF are within + 3% tolerance.

Fonte: Datasheet dos painéis da série ZXMR-UHLD132.

3.2.3 Influências de temperatura e irradiação

A curva I-V pode ser influenciada pela irradiação solar, a qual pode sofrer alterações devido à nebulosidade do céu ou posição do sol, o que resulta em uma corrente I_{SC} menor que a ideal (Figura 4a). Por outro lado, a V_{OC} também pode se alterar dependendo da temperatura no painel, sendo que quanto maior a temperatura, menor será essa tensão (Figura 4b) (Morales-Aragonés et al., 2021).

Figura 4 - Curvas I-V e P-V para níveis diferentes de (a) irradiação solar e (b) temperatura.

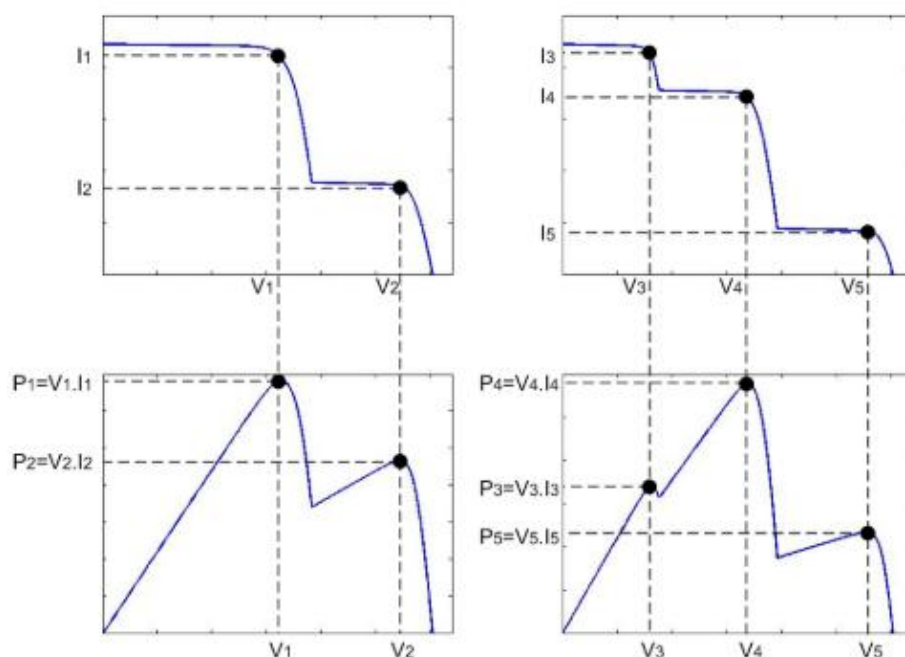


Fonte: Morales-Aragonés et al. (2021)

Estes dois fatores acabam dificultando a aquisição de sinais em campo, tendo em vista que as condições ideais de teste são 25 °C de temperatura e 1000 W/m² de irradiação solar (Monokroussos et al., 2023).

Um outro fator que gera um forte impacto na geração da curva I-V, ainda relacionado à irradiação solar, é o sombreamento parcial de uma célula em um painel. Quando isso ocorre, os diodos de *bypass* entram em ação, desviando a corrente de um conjunto de células interligadas. Como consequência, podemos ter um grande desvio na curva I-V gerada, e consequentemente também na curva P-V, como representado na Figura 5 (Campos et al., 2019).

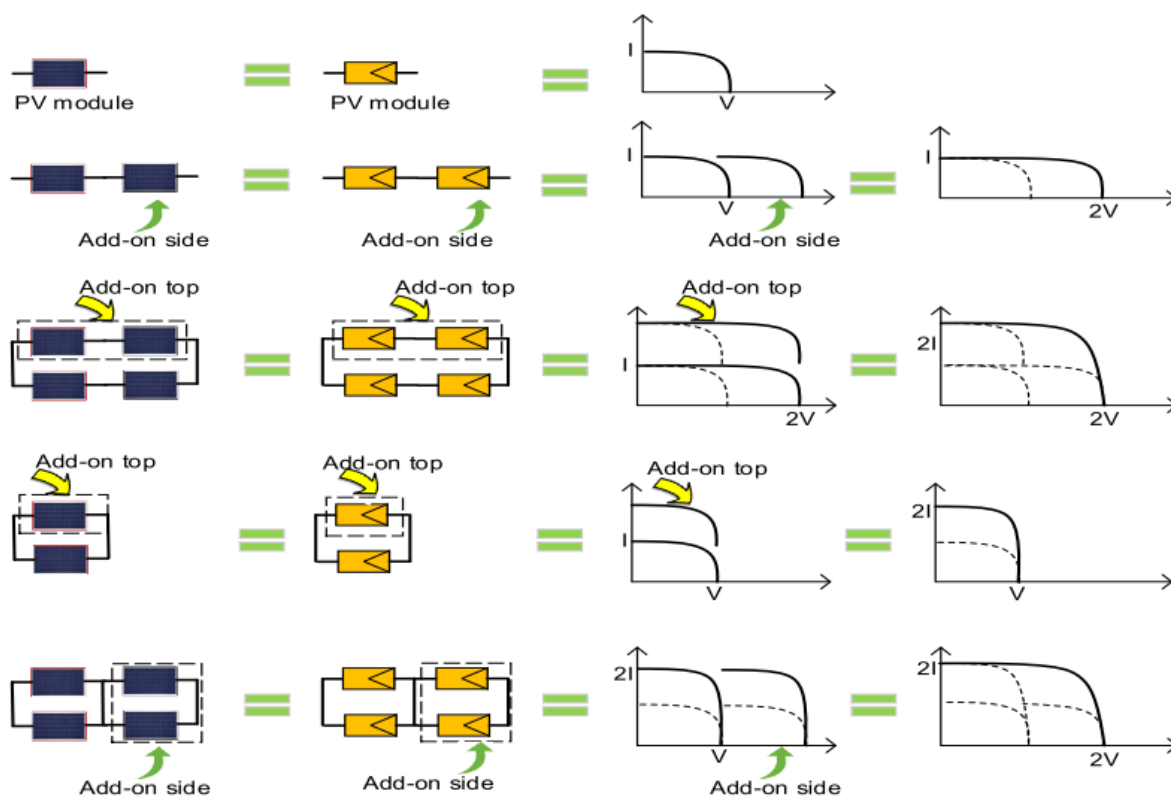
Figura 5 - Curvas I-V e P-V sob efeito de sombreamento parcial.



Fonte: Campos et al. (2019)

O comportamento da curva ocorre devido à forma de conexão dos módulos fotovoltaicos. Em condições ideais, um único painel tem uma curva característica em forma de "degrau". Quando dois desses módulos são conectados, a tensão de saída dobra se a ligação for em série, e a corrente de saída dobra se a ligação for em paralelo, conforme ilustrado na Figura 6 (Matam M., 2020).

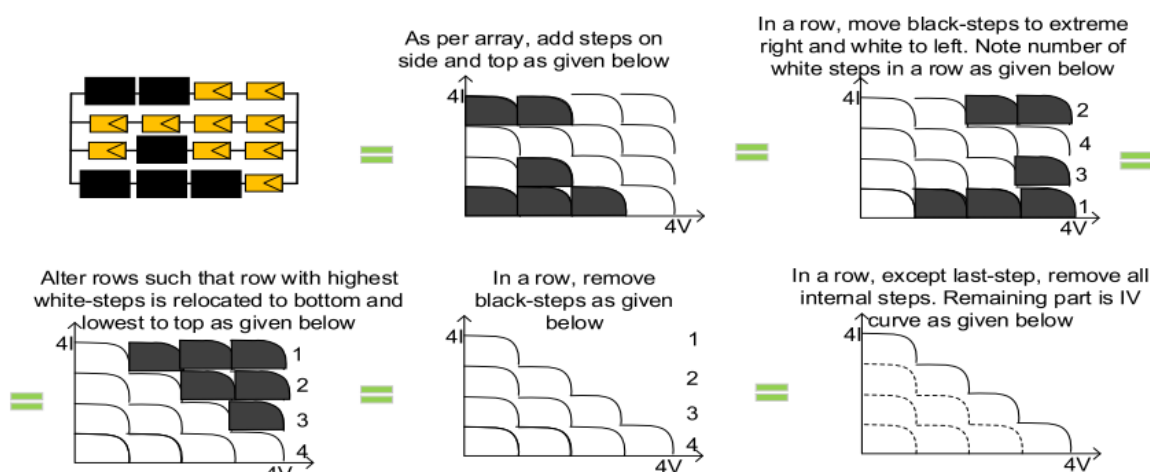
Figura 6 - Comportamento da curva na associação de módulos.



Fonte: Matam M. (2020)

Quando um ou mais módulos estão sombreados, o "degrau" correspondente na curva de potência total do sistema se enfraquece, resultando em uma queda acentuada na potência daquela parte da curva. A Figura 7 ilustra isso, mostrando que cada módulo contribui com um segmento, representado por um "degrau" branco. O sombreamento de um módulo, representado pelos "degraus" pretos, resulta na perda desse segmento e na alteração da curva total. Quando há vários módulos sombreados, a curva resultante fica irregular e fragmentada, indicando a perda de potência em diversos pontos ao longo de sua trajetória.

Figura 7 - Efeito do sombreamento de painéis em um array.



Fonte: Matam M. (2020)

3.3 Traçadores de Curva I-V comerciais

Os traçadores de curva I–V são instrumentos essenciais para a avaliação do desempenho e a detecção de falhas em sistemas fotovoltaicos. Eles realizam medições que abrangem desde a condição de circuito aberto até o curto-circuito, permitindo uma análise completa da curva característica do módulo. O traçador I-V é utilizado principalmente de forma *offline* para diagnósticos detalhados. Apesar de sua relevância, o alto custo desses dispositivos tem limitado sua ampla utilização, o que motiva pesquisas para torná-los mais acessíveis e precisos (Zhu; Xiao, 2020). Com base nessas limitações, é fundamental conhecer modelos disponíveis no mercado para contextualizar o escopo e os diferenciais deste projeto.

Na Figura 8 estão representados três modelos de traçadores, sendo eles o PVPM1540X fabricado pela PVE (Figura 8a), o SMFT-1000 fabricado pela Fluke (Figura 8b) e por fim o PVA-1500HE2, também da fabricante Fluke (Figura 8c). É possível ver que todos eles exigem um grande investimento, com o preço variando principalmente devido as suas capacidades máximas de leitura de tensão (V) e corrente (A) sendo elas 1500 V / 40 A (Figura 8a), 1000 V / 20 A (Figura 8b) e 1500 V / 30 A (Figura 8c), conforme especificado em seus respectivos manuais (Fluke, 2024; Fluke, 2022; PVE, 2024).

Figura 8 - Modelos de traçadores de curva I-V disponíveis no mercado.



Fonte: Google (2025)

Para a realização dos testes, os especialistas precisam se deslocar até o local da instalação, onde os painéis devem ser desconectados de qualquer carga para que as medições possam ser feitas, interrompendo assim a geração de energia. Esse processo de isolamento expõe os técnicos a altos riscos, devido ao contato potencial com a alta tensão gerada pelo conjunto de painéis. Além disso, todas as medições são realizadas *offline*, sem integração com a internet para a transmissão de dados (Fluke, 2024; Fluke, 2022; PVE, 2024).

3.4 MPPT - *Maximum Power Point Tracker*

Nos sistemas fotovoltaicos, tanto *off-grid* quanto *on-grid*, é comum a utilização da tecnologia MPPT (*Maximum Power Point Tracker*), que em português significa "Rastreador do Ponto de Máxima Potência". Essa tecnologia tem como função garantir que o sistema opere sempre no seu desempenho máximo, representado na curva I-V pelo ponto M_{pp} (ALDO, 2025).

Para encontrar esse ponto, o controlador mede continuamente a potência fornecida pelo módulo e ajusta a carga elétrica equivalente até atingir a maior potência possível. Esse controle é realizado por meio de um conversor DC-DC, que adapta a tensão de saída dos painéis às necessidades do sistema, sem tirar os módulos da sua faixa de operação ideal. Assim, o MPPT assegura que a energia extraída seja sempre a máxima disponível em cada momento, aumentando a eficiência do sistema, especialmente em situações como variações climáticas, sombreamento parcial ou mudanças rápidas na demanda elétrica (Mariprasath; Kishore; Kalyankumar, 2023).

Ao observar a Figura 5 proposta anteriormente, pode-se observar que foram levantados múltiplos pontos M_{PP} relativos, dificultando a identificação automática do ponto M_{PP} absoluto que, caso não seja alcançado, gerará impacto na geração da energia (Bifaretti S. et al., 2012).

3.5 Inversores de tensão

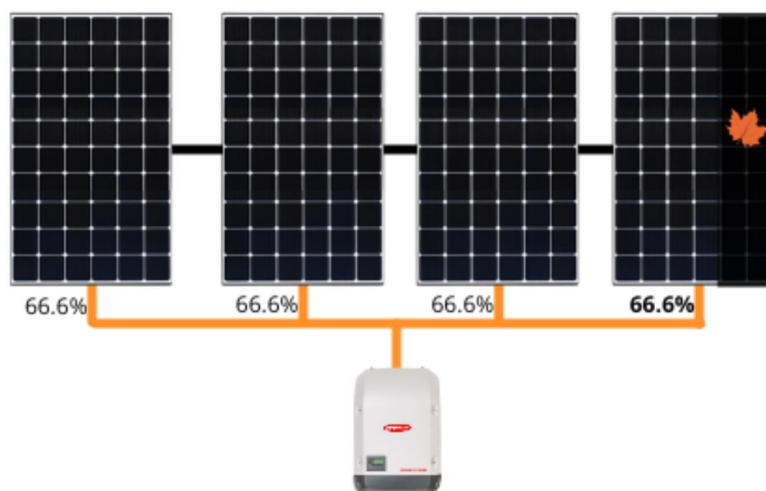
Segundo Rakshaya et al., o inversor de tensão é um componente essencial em um sistema fotovoltaico, cuja função principal é a conversão de corrente contínua (DC) gerada pelos painéis FV em corrente alternada (AC), que é o formato de energia compatível com redes elétricas e cargas domésticas e industriais.

A tradicional forma de conversão utiliza um inversor *string*, no qual são ligados múltiplos painéis FV em série, e o inversor processa toda a energia deste arranjo convertendo-a para AC. Apesar de este tipo de inversor ser amplamente utilizado, ele traz consigo algumas vulnerabilidades que impactam diretamente em seu desempenho. Em contrapartida, os microinversores resolvem grande parte destas vulnerabilidades, devido a ser conectado individualmente a cada painel FV ele descentraliza o processo de conversão, possibilitando a conversão de CC para CA de cada painel individualmente (Rakshaya et al., 2023).

3.5.1 Inversores *string*

Os inversores *string* são alimentados por um conjunto de painéis fotovoltaicos conectados em série. O desempenho desses sistemas na geração de energia pode ser afetado por incompatibilidade entre os painéis, o que causa perdas de energia e reduz a eficiência do algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). Isso pode ocorrer devido a sombreamento parcial ou sujeira nos painéis, conforme representado na Figura 9 (Godoi et al., 2023).

Figura 9 - Efeito do sombreamento em um inversor *string*.

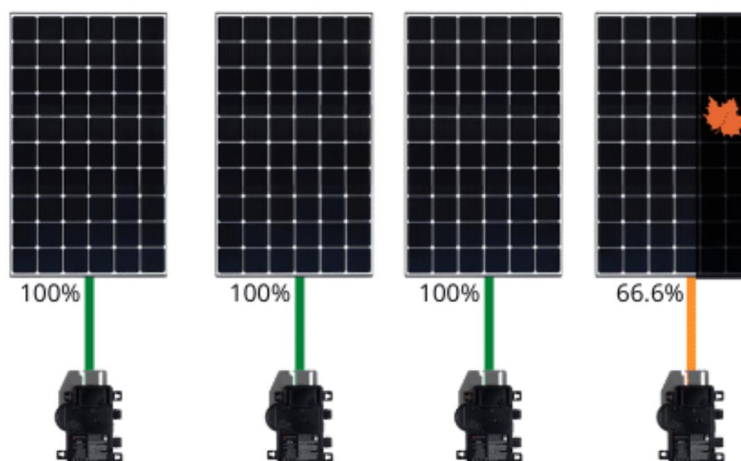


Fonte: *Electrical Sensations (2021)*

3.5.2 Microinversores

Com a configuração de microinversores, o rastreamento da potência máxima e a conversão de energia são aplicados em cada módulo individualmente. Isso oferece uma capacidade mais precisa de rastrear e diagnosticar a energia dos módulos. Os microinversores proporcionam a melhor eficiência na captação de energia, pois qualquer sombreamento ou falha em um painel não afeta a string inteira ou o arranjo completo, conforme Figura 10. Outra vantagem é que painéis fotovoltaicos com potências diferentes podem ser adicionados ao mesmo arranjo, já que cada módulo é conectado de forma independente à rede. Isso elimina a necessidade de usar módulos com potências semelhantes, que é uma exigência para conexões em série e paralelo (Ismail; El-Deib, 2023).

Figura 10 - Efeito do sombreamento ao utilizar microinversores.



Fonte: *Electrical Sensations (2021)*

3.6 Demais tecnologias utilizadas no projeto

Aqui serão contextualizadas as tecnologias utilizadas durante o desenvolvimento do projeto.

3.6.1 React.js

React.js é uma biblioteca *JavaScript* de código aberto, desenvolvida pelo Facebook, utilizada para a criação de interfaces de usuário (UI) em aplicações *web* de página única (SPA - *Single Page Application*). Sua principal característica é a abordagem baseada em componentes, onde a UI é dividida em pequenas partes reutilizáveis e independentes. Essa arquitetura modular facilita a organização do código, a manutenção e o desenvolvimento colaborativo.

Um dos conceitos centrais do React.js é o DOM (*Document Object Model*) Virtual. Em vez de manipular o DOM real diretamente, o *React* cria uma representação virtual na memória. Quando o estado de um componente muda, o *React* atualiza o DOM Virtual e, em seguida, compara essa nova versão com a anterior para identificar apenas as modificações necessárias. Essa técnica, conhecida como *diffing*, minimiza as operações no DOM real, resultando em um desempenho significativamente melhor e em uma renderização mais rápida da interface. O fluxo de dados no React é unidirecional, seguindo do componente pai para o componente filho, o que torna o controle de dados mais previsível e o processo de depuração mais simples (React Documentation, 2025).

3.6.2 Express.js

Express.js é um *framework* de código aberto para aplicações *web*, amplamente utilizado para construir APIs (*Application Programming Interface*) e servidores *web* com Node.js. Conhecido por ser minimalista e flexível, o Express.js fornece uma camada fina de recursos para a construção de *back-ends* robustos e escaláveis.

Ele opera no modelo de *middleware*, onde uma série de funções são executadas em sequência para processar uma requisição HTTP. Cada *middleware* pode realizar tarefas como autenticação, validação de dados, registro de requisições, e roteamento, passando o controle para a próxima função da cadeia. O sistema de roteamento do Express.js é poderoso e permite definir rotas para diferentes URLs

(*Uniform Resource Locator*) e métodos HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*), facilitando a organização das requisições e respostas do servidor. Sua simplicidade e a vasta comunidade de pacotes e *plugins* disponíveis o tornam uma escolha popular para o desenvolvimento de aplicações *back-end* (MDN Web Docs, 2025).

3.6.3 MQTT

MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) é um protocolo de comunicação leve, projetado para dispositivos com restrições de rede, como os encontrados em sistemas de Internet das Coisas (IoT). Ele opera sobre o protocolo TCP/IP e utiliza um modelo de comunicação publicar/assinar (*publish/subscribe*), em contraste com o modelo tradicional cliente/servidor.

Nesse modelo, os dispositivos não se comunicam diretamente uns com os outros. Em vez disso, eles se conectam a um servidor central, chamado *broker*. Os dispositivos que desejam enviar informações são chamados de *publishers* (publicadores) e enviam mensagens para tópicos específicos. Os dispositivos que desejam receber essas informações são chamados de *subscribers* (assinantes) e se inscrevem nos tópicos de seu interesse.

O *broker* é responsável por receber as mensagens dos *publishers* e encaminhá-las a todos os *subscribers* que estão inscritos naquele tópico. Esse *design* desacoplado permite que os dispositivos se comuniquem de forma eficiente, reduzindo o tráfego de rede e a sobrecarga de processamento. O MQTT também suporta diferentes níveis de Qualidade de Serviço (QoS), garantindo a entrega das mensagens de acordo com a necessidade da aplicação (HiveMQ, 2025).

3.6.4 ESP32

O ESP32 é um microcontrolador de baixo custo e baixo consumo de energia, desenvolvido pela *Espressif Systems*. Ele se destaca por integrar as funcionalidades de Wi-Fi e Bluetooth, tornando-o uma solução ideal para projetos de IoT. O ESP32 possui um processador *dual-core* (*Tensilica Xtensa LX6*), o que permite a execução de múltiplas tarefas simultaneamente.

Além da conectividade sem fio, o ESP32 oferece uma vasta gama de periféricos integrados, como GPIOs (*General-Purpose Input/Output*), ADC (conversor analógico-digital), DAC (conversor digital-analógico), e possui suporte para diversos

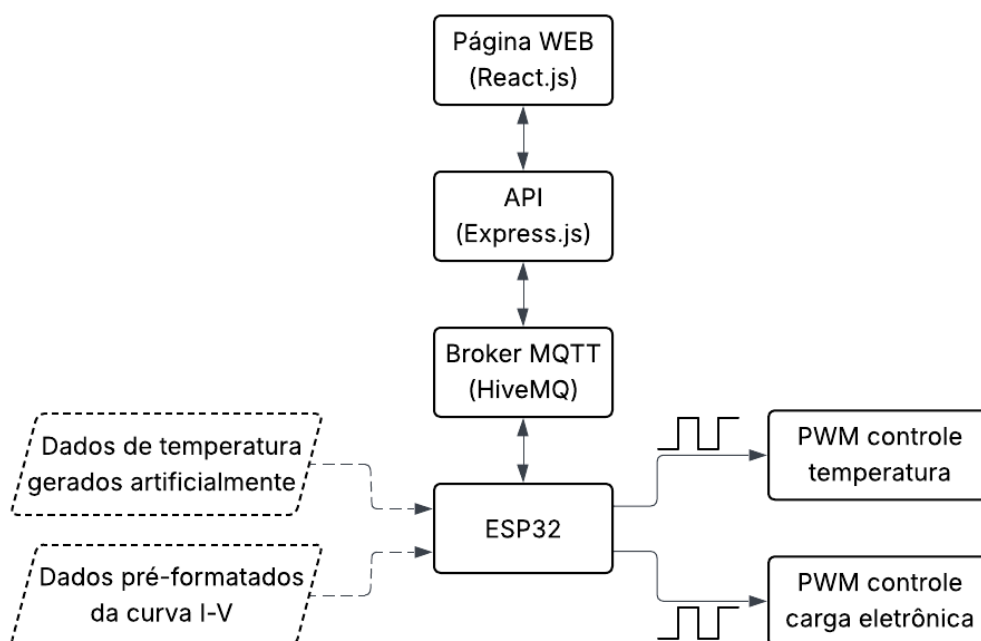
protocolos de comunicação, como SPI (*Serial Peripheral Interface*), I2C (*Inter-Integrated Circuit*), UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*), entre outros. Essa diversidade de periféricos possibilita a interação com uma ampla variedade de sensores e atuadores, como sensores de temperatura, umidade, movimento, motores e *displays*. A programação do ESP32 pode ser feita usando diversas ferramentas e linguagens, como o Arduino IDE (usando C++), MicroPython ou o *framework* ESP-IDF, o que oferece flexibilidade e acessibilidade para desenvolvedores de diferentes níveis de experiência. Sua combinação de poder de processamento, conectividade e baixo custo o torna uma plataforma popular para prototipagem e desenvolvimento de dispositivos inteligentes (Espressif Systems, 2025).

4 METODOLOGIA

Diferentemente dos equipamentos disponíveis no mercado, a solução proposta neste trabalho integra monitoramento remoto e automação das medições, possibilitando a análise contínua do desempenho do sistema fotovoltaico, além da proposta de um controle de temperatura no painel. A decisão de não desenvolver um *hardware* específico para medição baseou-se no fato de já existirem dispositivos consolidados para a geração da curva I-V. Contudo, identificou-se uma lacuna importante: a ausência de integração eficiente com plataformas IoT, recurso que constitui um dos principais diferenciais da presente proposta.

Partindo deste princípio, o projeto é composto por quatro elementos principais: uma página *web*, que permite ao usuário solicitar a geração da curva I-V; uma API, responsável por receber os dados enviados pelo ESP32 e disponibilizá-los na página *web*; um *broker* MQTT, que intermedia a comunicação entre o ESP32 e a API; e, por fim, o ESP32, que gera sinais PWM para simular tanto o controle de temperatura quanto o controle de uma carga resistiva conectada em série ao módulo fotovoltaico, além de enviar as medições virtuais necessárias para a montagem da curva I-V ao *broker* MQTT. Um diagrama em blocos do sistema pode ser visto na Figura 11.

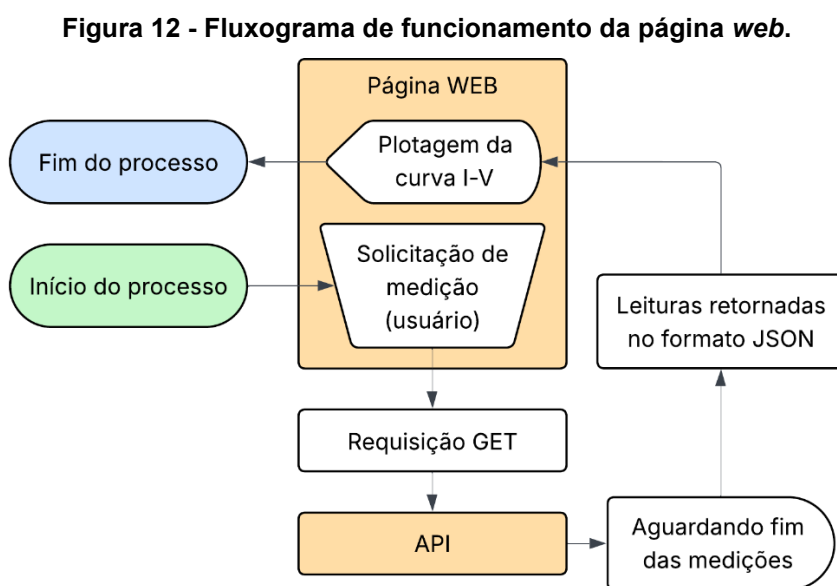
Figura 11 - Estrutura do projeto.



Fonte: Autoria própria (2025).

4.1 Página web

É o ponto de partida para a geração e visualização da Curva I-V. A aplicação, que atua como uma interface de usuário, aguarda a ação do operador (um clique em um botão) para iniciar o processo. Conforme representado na Figura 12, uma vez acionada, essa interface assume a responsabilidade de se comunicar com a camada de serviço, representada por uma API.



Fonte: Autoria própria (2025).

A comunicação se estabelece através de uma requisição utilizando o método *GET*. O comportamento da aplicação, neste momento, é de espera síncrona: ela envia a requisição e "trava", aguardando a resposta da API. Com esta resposta, espera-se uma mensagem no formato JSON (*JavaScript Object Notation*), que será utilizada para a apresentação do gráfico.

4.2 API

Para operar, a API inicialmente se conecta ao *broker* MQTT usando as credenciais fornecidas pela HiveMQ. Essa conexão inicial é crucial para o sistema.

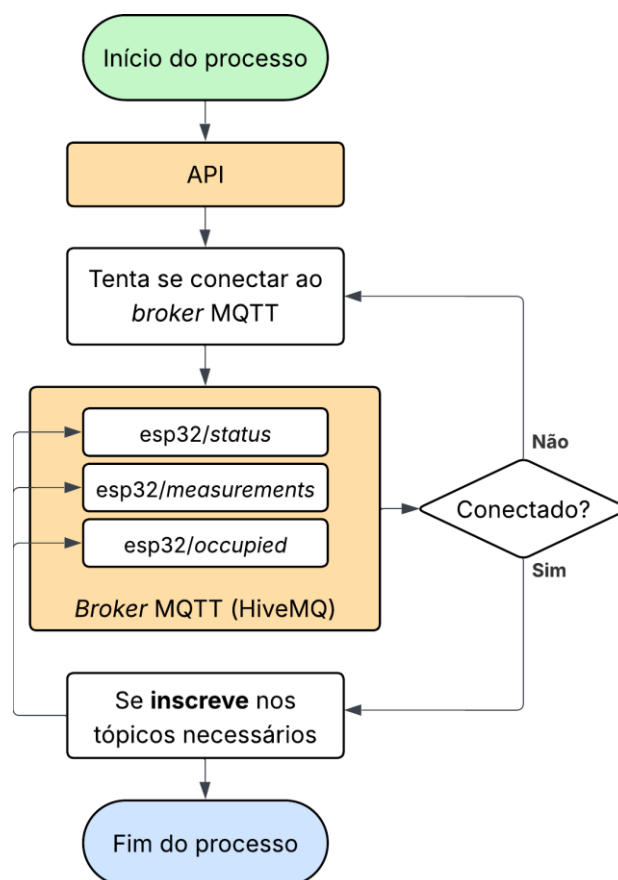
Após se conectar, a API se inscreve em três tópicos principais para monitorar o ESP32, sendo eles:

- *esp32/status*: Usado para verificar se o ESP32 está online e conectado ao *broker*.

- *esp32/measurements*: Onde a API recebe os dados de medição enviados pelo ESP32.
- *esp32/occupied*: Indica se o ESP32 está ocupado com uma medição (o valor é 1) ou disponível (o valor é 0).

Este processo inicial da API está representado na Figura 13.

Figura 13 - Configuração inicial da API.



Fonte: Autoria própria (2025).

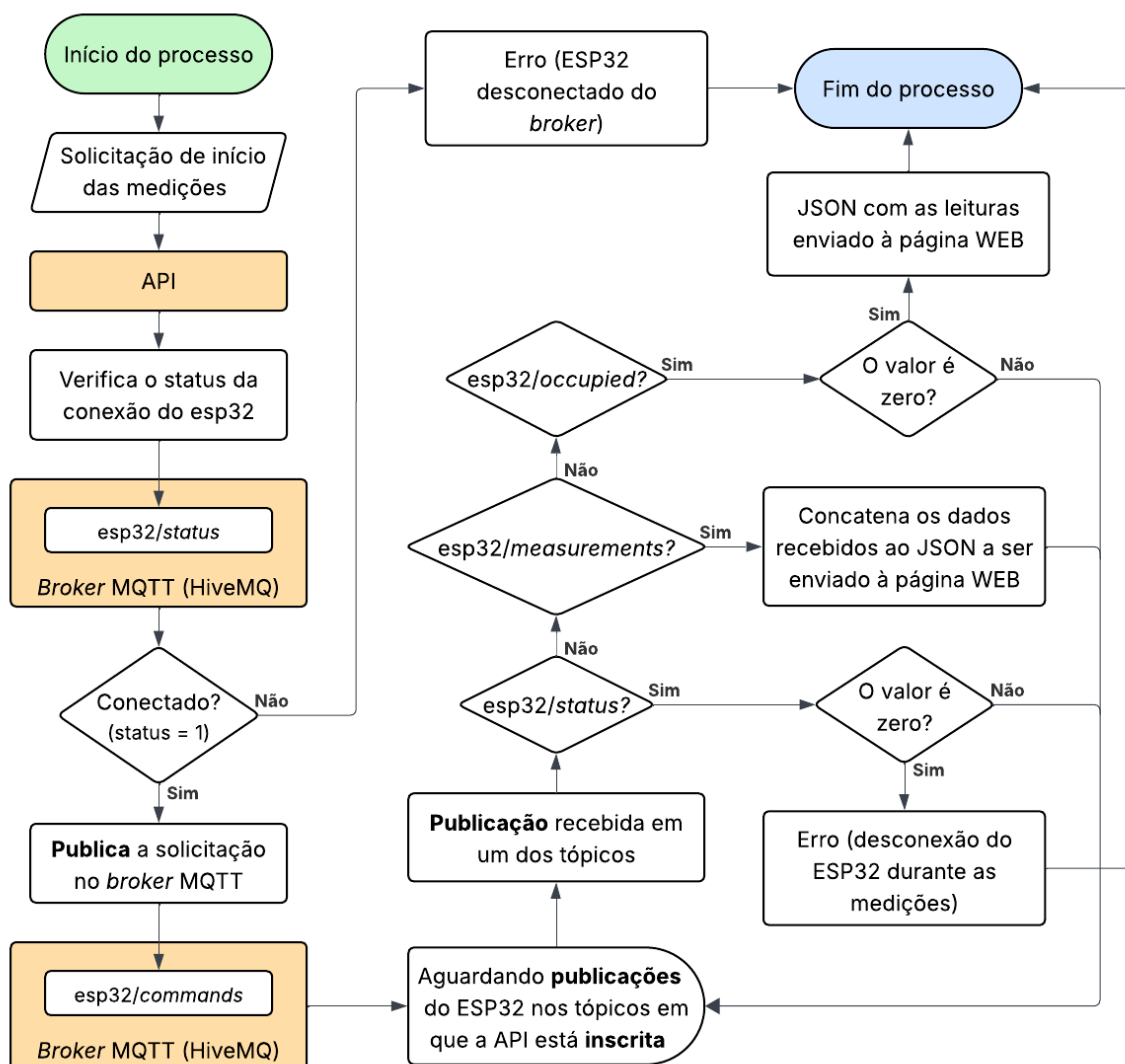
O processo de medição é iniciado por uma solicitação da página *web* para o *endpoint* “*start-measurement*”. A API executa os seguintes passos:

1. Verificação: A API primeiro verifica se o ESP32 está *online* através do tópico “*esp32/status*”. Se não estiver, a requisição é encerrada com um erro.
2. Início da Medição: Estando o ESP32 conectado, a API envia um comando em formato JSON para o tópico “*esp32/commands*”, solicitando o início da medição.

3. Coleta de Dados: A API aguarda e coleta os dados de medição que são enviados pelo ESP32 através do tópico “esp32/measurements”.
4. Finalização: A API espera a confirmação do fim do processo, que ocorre quando o ESP32 publica o valor 0 no tópico “esp32/occupied”.
5. Envio de Dados: Por fim, todas as medições coletadas são concatenadas e enviadas para a página *web* no formato JSON.

O fluxograma da Figura 14 mostra o comportamento da API após a solicitação da geração da curva I-V.

Figura 14 - Fluxograma de funcionamento da API.



Fonte: Autoria própria (2025).

4.3 Broker MQTT

É responsável por intermediar a comunicação entre o ESP32 e a API, como exemplificado anteriormente, evitando assim a comunicação direta entre a *web* e o ESP32. Esta tecnologia foi escolhida por conta de dois principais fatores:

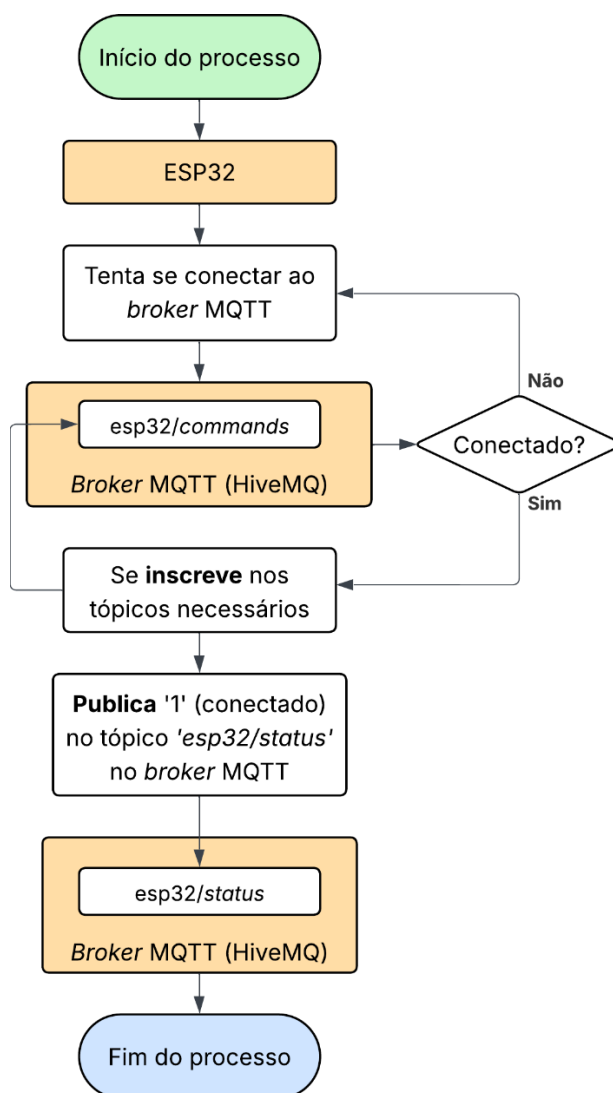
- **Segurança:** Ao usar o *broker* MQTT, a API atua como um intermediário seguro, controlando o acesso e as permissões de mensagens. Isso impede que o ESP32 seja exposto diretamente à internet, reduzindo o risco de ataques.
- **Escalabilidade:** A arquitetura baseada em *broker* permite que o sistema cresça facilmente. É possível adicionar mais dispositivos ESP32 ou outras APIs sem alterar a lógica de comunicação existente, já que todos se conectam ao mesmo ponto central, necessitando apenas da criação de tópicos específicos.

Para este propósito foi escolhido o *broker* MQTT da HiveMQ, que oferece uma opção de um *broker* gratuito e *online*, permitindo inclusive o monitoramento em tempo real das mensagens postadas nos tópicos, como será visto posteriormente.

4.4 ESP32

Assim como ocorre com a API, o ESP32 também precisa passar por algumas configurações iniciais, conforme representado na Figura 15. A primeira etapa é estabelecer conexão com o *broker* MQTT, publicando o valor 1 no tópico “*esp32/status*”, sinalizando aos assinantes que está *online*. Em seguida, o dispositivo se inscreve no tópico ‘*esp32/commands*’, permitindo que receba comandos para iniciar a geração da curva I-V.

Figura 15 - Fluxograma das configurações iniciais do ESP32.

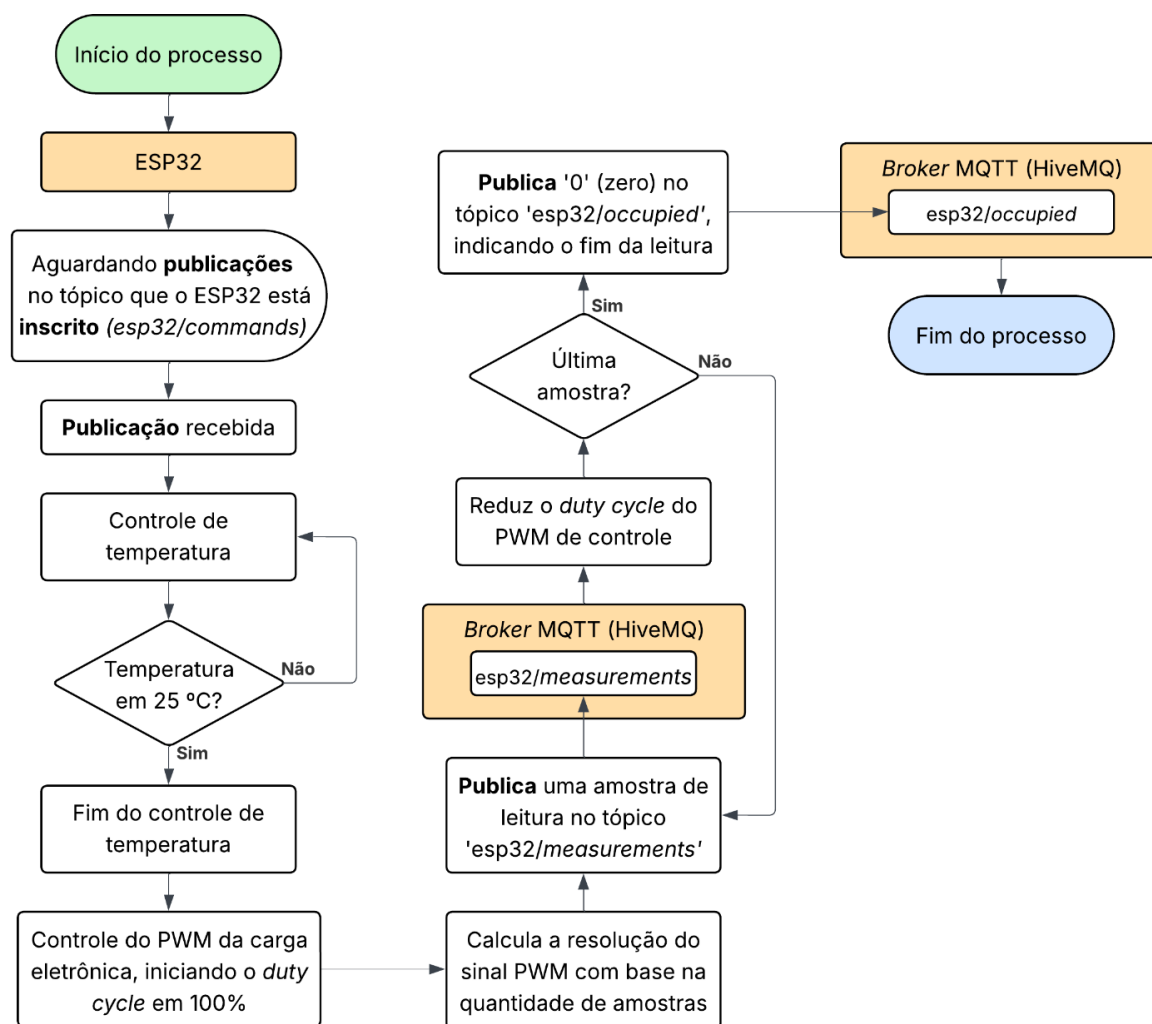


Fonte: Autoria própria (2025).

O ESP32 é responsável por gerar os sinais de PWM para simular o controle de uma carga eletrônica e o controle de temperatura. Vale ressaltar que o PWM de controle de temperatura utiliza também um algoritmo PID (Proporcional, Integral e Derivativo), garantindo maior estabilidade e precisão na regulação.

Sendo assim, após a inicialização do ESP32, ele se comporta conforme o fluxograma da Figura 16.

Figura 16 - Fluxograma de funcionamento do ESP32.



Fonte: Autoria própria (2025).

Assim que o ESP32 recebe o comando de início de medição pelo tópico “esp32/commands”, ele começa a simular o controle de temperatura. Usando um sinal de temperatura simulado (ajustado por *push buttons*), ele ajusta o ciclo de trabalho do PWM até que a temperatura atinja 25 °C.

Depois que esta temperatura é alcançada, o ESP32 inicia o PWM que simula o controle da carga eletrônica. O ciclo de trabalho varia de 100% a 0% em 5 segundos, gerando 49 amostras de tensão, corrente e potência. Essas amostras, no contexto deste projeto, são obtidas de um JSON pré-formatado que simula uma curva I-V ideal.

Todas as medições simuladas são enviadas uma de cada vez para a API por meio do tópico “esp32/measurements” do *broker* MQTT.

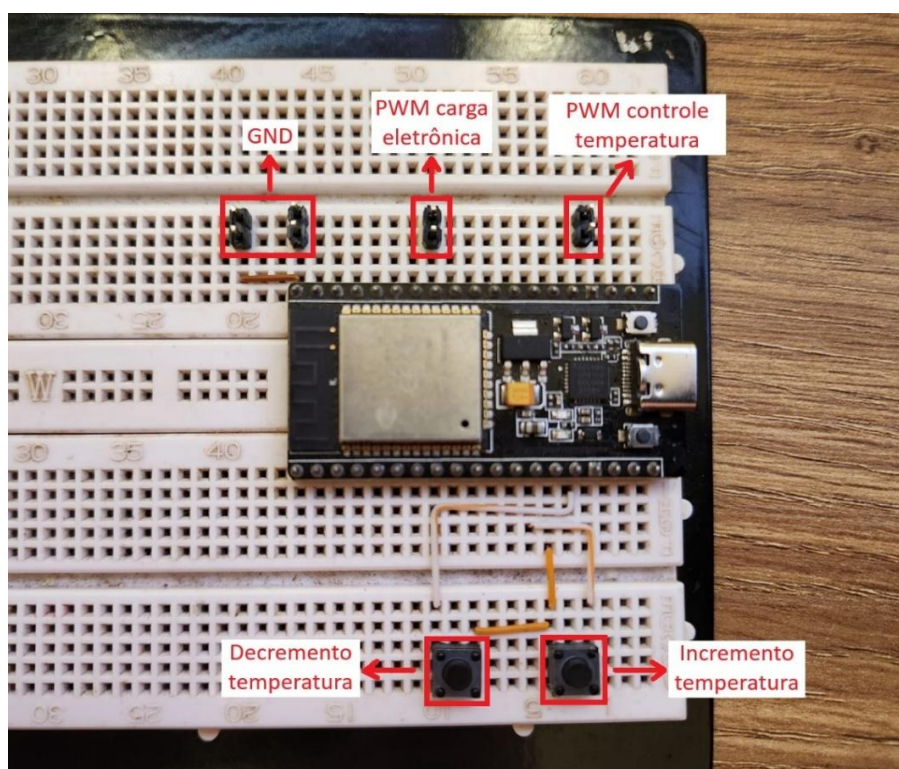
5 RESULTADOS

Os resultados obtidos podem ser divididos em duas partes principais. A primeira corresponde ao *hardware*, composto pelo ESP32, pelos botões utilizados para simular a leitura de temperatura e pinos de saída dos sinais PWM. A segunda parte refere-se ao *software*, englobando a página *web*, a API, o *broker* MQTT e o próprio *software* desenvolvido para o ESP32.

5.1 Hardware

A Figura 17 apresenta a montagem do protótipo do *hardware* utilizado em uma *protoboard*, composta pelo ESP32 e componentes auxiliares utilizados para a simulação do sistema. Estão destacados os pinos responsáveis pelas funções principais, sendo eles o GND (referência de aterramento), PWM da carga eletrônica, que simula o controle de uma carga conectada ao módulo fotovoltaico, e PWM do controle de temperatura, associado ao controle PID. Além disso, a montagem conta com dois botões de ajuste manual, um para incrementar e outro para decrementar a temperatura de referência, permitindo ao usuário modificar os parâmetros durante os testes.

Figura 17 - Protótipo para leitura dos sinais PWM e controle de temperatura manual.



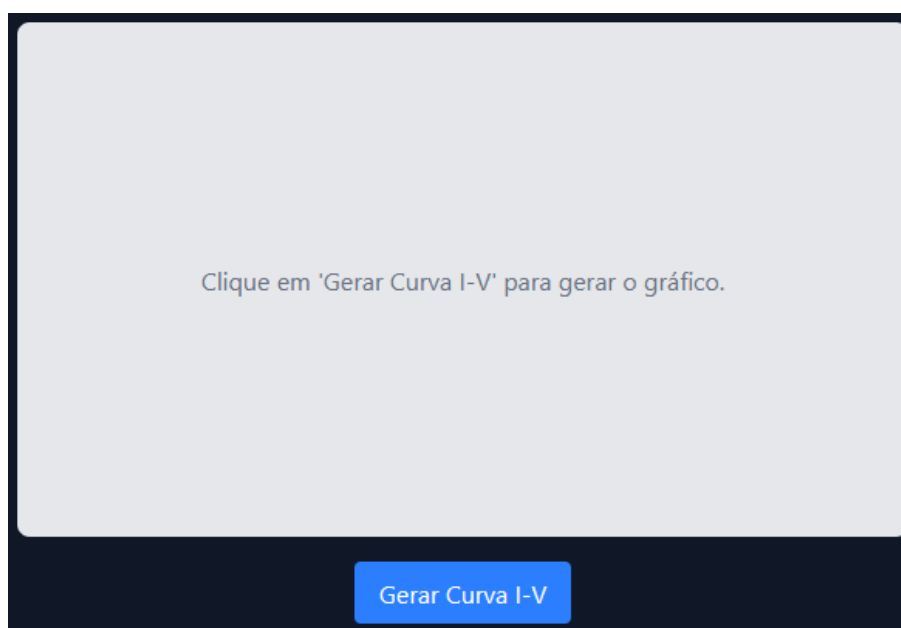
Fonte: Autoria própria (2025)

5.2 Software

A princípio, todas as aplicações desenvolvidas estão sendo executadas localmente, em um computador pessoal, devido ao custo de hospedagem e a necessidade da utilização de um servidor VPS (*Virtual Private Server*) *online* para a API.

A Figura 18 mostra a aparência da página *web* ao acessá-la inicialmente.

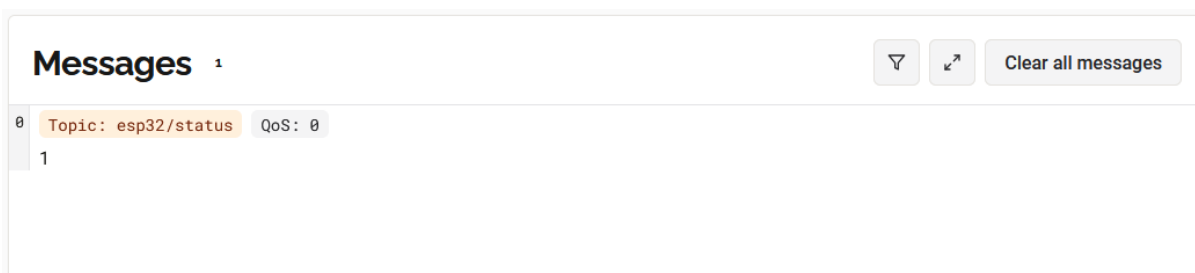
Figura 18 - Visualização inicial da página *web*.



Fonte: Autoria própria (2025).

Ao clicar no botão de 'Gerar Curva I-V' é solicitado o início do processo de medição. Quando isso ocorre a API recebe o comando e verifica se o ESP32 está conectado ao *broker* (pelo tópico *esp32/status* = 1). Pode-se ver na Figura 19, retirada do HiveMQ, o *status* da conexão do ESP32 com o *broker*.

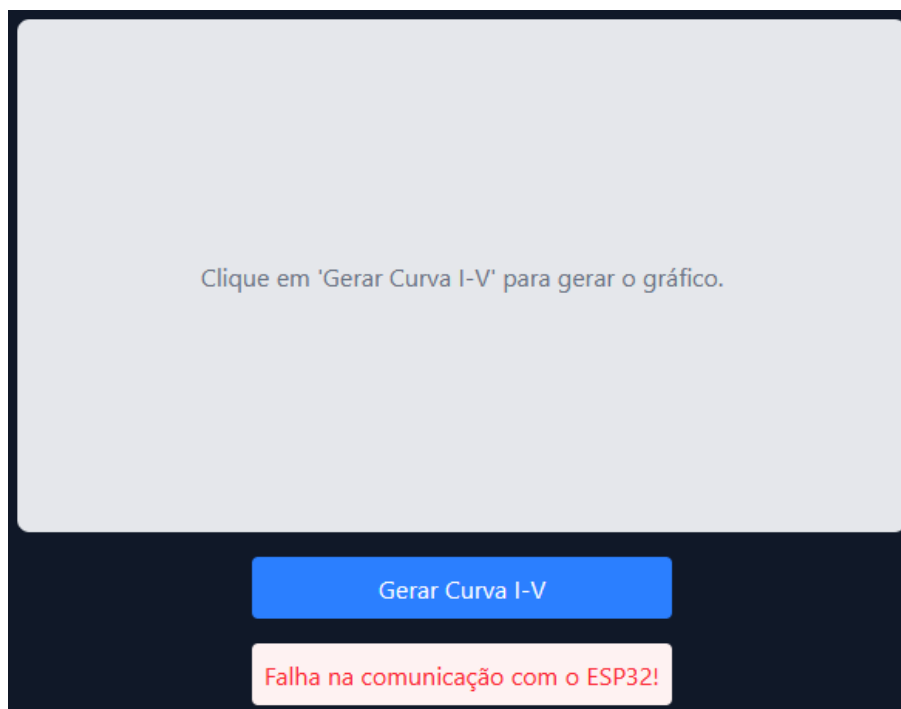
Figura 19 - Visualização no HiveMQ do *status* do ESP32.



Fonte: Autoria própria (2025).

Caso esteja desconectado é imediatamente apresentada uma mensagem ao usuário conforme a imagem a seguir, na Figura 20.

Figura 20 - Mensagem de erro na comunicação.



Fonte: Autoria própria (2025).

Porém, caso esteja conectado, a API inicia a medição via tópico “esp32/commands”, enviando um JSON no formato mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Estrutura JSON de solicitação de medição.

```
{  
  "command": "startMeasurement",  
  "params": {  
    "samplingRate": 1,  
    "duration": 1  
  }  
}
```

Fonte: Autoria própria (2025).

A princípio somente os parâmetros “command” e “duration” são utilizados no processo. O “command” representa a operação a ser executada, que apesar de o

projeto propor apenas a opção de traçar a curva I-V (comando “*startMeasurement*”) seria possível expandir o projeto para novas funcionalidades. O parâmetro “*duration*” define o tempo de duração da medição no ESP32, aceitando valores entre 1 e 10 segundos. Caso seja informado um valor fora desse intervalo, o dispositivo desconsidera o valor e realiza a medição com a duração padrão de 5 segundos.

O parâmetro “*samplingRate*” representa a quantidade de amostras a serem feitas durante o período passado pelo “*duration*”, no entanto, como os dados da curva I-V são pré-formatados, não é possível utilizar esta funcionalidade sem a possibilidade de medição em um painel FV real.

Figura 22 - Recebimento da solicitação da medição no *broker* MQTT.



Fonte: Autoria Própria (2025)

Após o envio do JSON ao *broker*, representado na Figura 22, estes são recebidos pelo ESP32, que inicia o PWM de controle de temperatura. A temperatura alvo para início das medições é 25 °C, conforme ditam as condições padrão de testes e, enquanto essa temperatura não é atingida, o ESP32 ajusta automaticamente o *duty cycle* do PWM devido ao algoritmo de PID presente no controle, conforme representado na Figura 23.

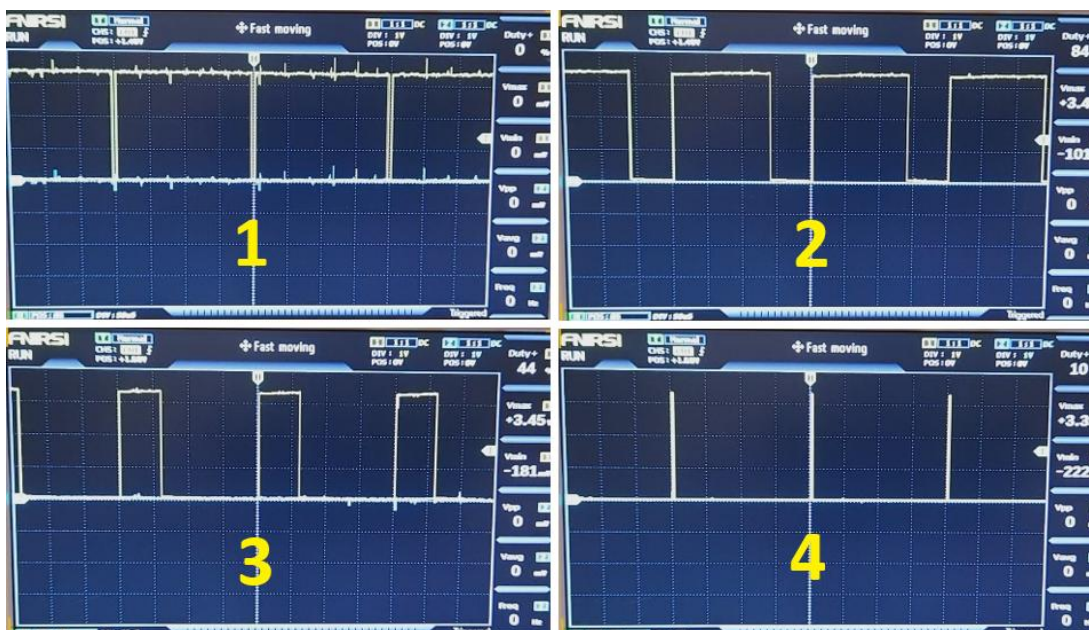
Figura 23 – PWM no início da medição (a) e 10 segundos após o início (b).



Fonte: Autoria própria (2025)

Ao atingir a temperatura de 25 °C, o controle de temperatura se finda para dar início ao controle da carga eletrônica. O PWM responsável por este controle é iniciado com o *duty cycle* em 100% e vai decrescendo até atingir 0%, possibilitando o controle de uma carga resistiva, de um curto-circuito até um circuito aberto. O PWM gerado pode ser visualizado na Figura 24, seguindo a ordem numérica indicada.

Figura 24 - Controle PWM da carga eletrônica.



Fonte: Autoria própria (2025)

Simultaneamente ao ajuste do *duty cycle* da carga eletrônica, são enviados os valores predefinidos para a geração da curva I-V. Esses dados são transmitidos individualmente ao broker, por meio do tópico “*esp32/measurements*”, durante toda a varredura do PWM, simulando as medições de corrente e tensão em um painel fotovoltaico sob diferentes condições de resistência da carga eletrônica. Este comportamento pode ser visto na Figura 25.

Figura 25 - Dados retornados pelo ESP32 ao *broker* MQTT.

Message ID	Topic	QoS	Message Content
0	esp32/status	0	1
1	esp32/commands	0	{"command": "startMeasurement", "params": {"duration": 15, "samplingRate": 4}}
2	esp32/measurements	0	{"V": 0, "I": 7.5, "P": 0}
3	esp32/measurements	0	{"V": 0.5, "I": 7.5, "P": 3.75}
4	esp32/measurements	0	{"V": 1, "I": 7.5, "P": 7.5}
5	esp32/measurements	0	{"V": 1.5, "I": 7.49, "P": 11.24}
6	esp32/measurements	0	{"V": 2, "I": 7.49, "P": 14.98}
7	esp32/measurements	0	{"V": 2.5, "I": 7.49, "P": 18.72}
8	esp32/measurements	0	{"V": 3, "I": 7.49, "P": 22.46}
9	esp32/measurements	0	{"V": 3.5, "I": 7.48, "P": 26.19}
10	esp32/measurements	0	

Fonte: Autoria própria (2025).

Ao finalizar o processo de envio dos dados para a geração da curva I-V, o ESP32 também envia uma mensagem ao tópico “esp32/occupied” com valor 0 (zero), representando o final do processo de medições, conforme mostra a Figura 26.

Figura 26 - Mensagem de fim das medições.

			{"V": 22.5, "I": 4.1, "P": 92.25}
48	esp32/measurements	0	{"V": 23, "I": 2.9, "P": 66.7}
49	esp32/measurements	0	{"V": 23.5, "I": 1.7, "P": 39.95}
50	esp32/measurements	0	{"V": 24, "I": 0, "P": 0}
51	esp32/occupied	0	0

Fonte: Autoria própria (2025).

Com isso, após obter todas estas informações, a API retorna para a página *web* todas estas leituras concatenadas em apenas um JSON, no padrão representado na Figura 27.

Figura 27 - Formato JSON de retorno à página web.

```
[  
  { "V": 0, "I": 7.5, "P": 0 },  
  { "V": 0.5, "I": 7.5, "P": 3.75 },  
  { "V": 1, "I": 7.5, "P": 7.5 },  
  { "V": 1.5, "I": 7.49, "P": 11.24 },  
  { "V": 2, "I": 7.49, "P": 14.98 },  
  { "V": 2.5, "I": 7.49, "P": 18.72 },  
  { "V": 3, "I": 7.49, "P": 22.46 },  
  { "V": 3.5, "I": 7.48, "P": 26.19 },  
  { "V": 4, "I": 7.48, "P": 29.92 },  
  { "V": 4.5, "I": 7.48, "P": 33.64 },  
  { "V": 5, "I": 7.47, "P": 37.35 },  
  { "V": 5.5, "I": 7.47, "P": 41.06 },  
  { "V": 6, "I": 7.46, "P": 44.76 },  
  { "V": 6.5, "I": 7.46, "P": 48.46 },  
  { "V": 7, "I": 7.45, "P": 52.15 },  
  { "V": 7.5, "I": 7.45, "P": 55.84 },  
  { "V": 8, "I": 7.44, "P": 59.52 },  
  { "V": 8.5, "I": 7.44, "P": 63.2 },  
  { "V": 9, "I": 7.43, "P": 66.87 },  
  { "V": 9.5, "I": 7.43, "P": 70.54 },  
  { "V": 10, "I": 7.43, "P": 74.21 },  
  { "V": 10.5, "I": 7.43, "P": 77.88 },  
  { "V": 11, "I": 7.43, "P": 81.55 },  
  { "V": 11.5, "I": 7.43, "P": 85.22 },  
  { "V": 12, "I": 7.43, "P": 88.89 },  
  { "V": 12.5, "I": 7.43, "P": 92.56 },  
  { "V": 13, "I": 7.43, "P": 96.23 },  
  { "V": 13.5, "I": 7.43, "P": 99.9 },  
  { "V": 14, "I": 7.43, "P": 103.57 },  
  { "V": 14.5, "I": 7.43, "P": 107.24 },  
  { "V": 15, "I": 7.43, "P": 110.91 },  
  { "V": 15.5, "I": 7.43, "P": 114.58 },  
  { "V": 16, "I": 7.43, "P": 118.25 },  
  { "V": 16.5, "I": 7.43, "P": 121.92 },  
  { "V": 17, "I": 7.43, "P": 125.59 },  
  { "V": 17.5, "I": 7.43, "P": 129.26 },  
  { "V": 18, "I": 7.43, "P": 132.93 },  
  { "V": 18.5, "I": 7.43, "P": 136.6 },  
  { "V": 19, "I": 7.43, "P": 140.27 },  
  { "V": 19.5, "I": 7.43, "P": 143.94 },  
  { "V": 20, "I": 7.43, "P": 147.61 },  
  { "V": 20.5, "I": 7.43, "P": 151.28 },  
  { "V": 21, "I": 7.43, "P": 154.95 },  
  { "V": 21.5, "I": 7.43, "P": 158.62 },  
  { "V": 22, "I": 7.43, "P": 162.29 },  
  { "V": 22.5, "I": 7.43, "P": 165.96 },  
  { "V": 23, "I": 7.43, "P": 169.63 },  
  { "V": 23.5, "I": 7.43, "P": 173.3 },  
  { "V": 24, "I": 7.43, "P": 176.97 }  
]
```

Fonte: Autoria própria (2025).

Com esse JSON retornado, a página *web* consegue representar graficamente o traçado da curva I-V, e P-V, conforme ilustrado na Figura 28.

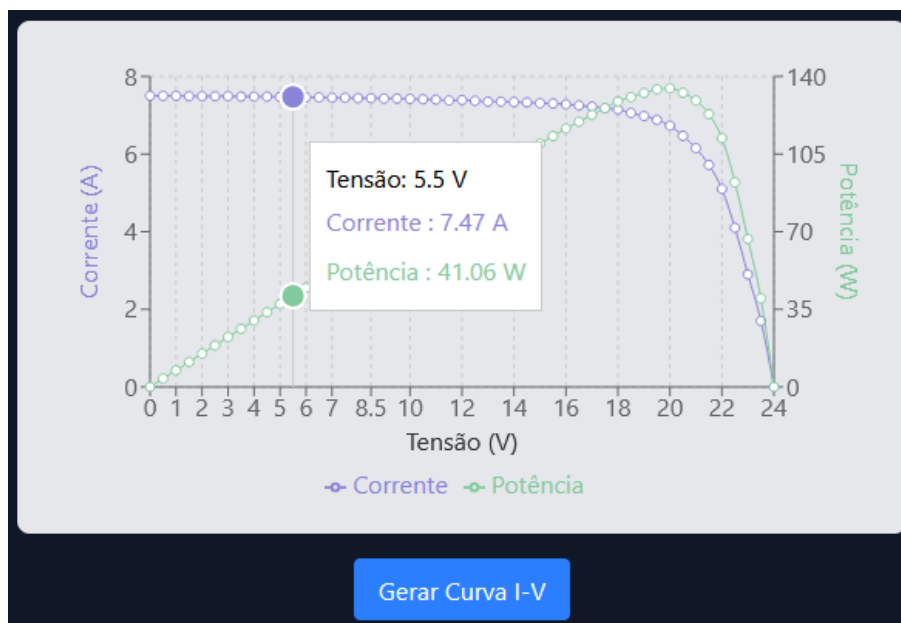
Figura 28 - Resultado final da Curva I-V.



Fonte: Autoria própria (2025).

Com a curva I-V e P-V plotadas em tela, é também possível arrastar o ponteiro do *mouse* sobre os pontos em destaque, possibilitando ver os valores de Tensão, Corrente e Potência medidos em cada ponto, conforme Figura 29.

Figura 29 - Visualização ponto a ponto das medições retornadas pelo ESP32



Fonte: Autoria própria (2025).

As curvas I-V e P-V apresentadas nas Figuras 28 e 29, indicam que o procedimento foi concluído com êxito. A interpretação correta dessas curvas permite ao usuário analisar a eficiência real do sistema fotovoltaico.

6 CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho demonstram que a arquitetura proposta, utilizando tecnologias *web* e IoT, é uma alternativa viável e promissora para a avaliação de desempenho de painéis fotovoltaicos. A solução, embora utilizando-se de dados não adquiridos em um sistema FV real, comprovou a capacidade de realizar medições em tempo real e controlar uma das condições padrão de teste. A combinação de uma interface *web* intuitiva e um dispositivo de controle de baixo custo possibilita democratizar o acesso a uma tecnologia de diagnóstico que, atualmente, é restrita devido ao alto custo dos equipamentos comerciais.

A abordagem proposta necessita que haja um traçador de curva I-V fixo no *array* de painéis do sistema fotovoltaico. Embora este ainda seja um fator limitador devido ao alto custo, a arquitetura desenvolvida serve de base para futuras pesquisas focadas na construção de um protótipo físico de baixo custo, viabilizando a implantação real dessa abordagem em larga escala.

7 TRABALHOS FUTUROS

O projeto demonstrou a viabilidade de uma arquitetura baseada em tecnologias *web* e IoT para a avaliação de desempenho em painéis fotovoltaicos, no entanto existe espaço para novos projetos, sendo eles:

- Desenvolvimento do *hardware* da carga eletrônica a ser controlada pelo ESP32 e estrutura do controle de temperatura;
- Validação do *hardware* em um sistema FV real;
- Utilização de Inteligência Artificial para interpretação dos dados fornecidos nas leituras da curva I-V, não sendo necessária a análise de um especialista;
- Armazenamento do histórico das medições realizadas em um banco de dados;
- Possibilitar que o usuário controle parâmetros de medição, como tempo da medição e quantidade de amostras;

8 REFERENCIAS

ALDO. **MPPT**: Tudo o que você precisa saber sobre. 2 jun. 2025. Disponível em: <https://www.aldo.com.br/blog/o-que-e-mppt-e-sua-importancia>. Acesso em: 17 ago. 2025.

AL-EZZI, Athil S.; ANSARI, Mohamed Nainar M. **Photovoltaic Solar Cells: A Review**. Selangor, Malásia, 2022.

BIFARETTI S. *et al.* **2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition**. Roma, Itália: IEEE, 2012.

BRITO, L.; MACHADO, E. ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM TRAÇADOR DE CURVA I-V PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO CONVERSORES CC-CC. *In*: 2022.

CAMPOS, R. *et al.* Experimental Analysis of a Developed I-V Curve Tracer under Partially Shading Conditions. *In*: Campinas, Brasil: 2019.

Electrical Sensations. **String Inverters vs. Micro-Inverters: Which one is better?** 23 nov. 2021. Disponível em: <https://www.electricalsensations.com.au/post/string-inverters-vs-micro-inverters-which-one-is-better>. Acesso em: 3 set. 2025

Espressif Systems. **ESP32 Series Datasheet**. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 17 de ago. de 2025.

FLOYD T. **Electronic devices: Electron Flow Version**. Nova Jersey, Estados Unidos: Prentice Hall, 2011.

Fluke. **PVA-1500HE2/PVA1500T2/SolSensor-300V3**: Solmetric I-V Curve Tracer Kit., 2024.

Fluke. **SMFT-1000**: Multifunction PV Analyzer., 2022.

GODOI, R. *et al.* Comparison of String Inverter and Microinverters: A Case Study Concerning Energy Yield and Accuracy of MPPT Algorithms. *In*: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023.

GUERRIERO P.; CENNAMO P.; DALIENTO S. **A Two Legs Darlington Based Circuit for on Site Tracing of Solar Panels I-V Curve**. Nápoles, Itália: IEEE, 2018.

HiveMQ. **MQTT Essentials** - All Core Concepts Explained. HiveMQ.com. Disponível em: <https://www.hivemq.com/mqtt/>. Acesso em: 17 de ago. de 2025.

ISMAIL, A.; EL-DEIB, A. DC/AC Conversion Topologies for Photovoltaic Applications. *In*: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023.

LONDOÑO, C. D.; CANO, J. B.; VELILLA, E. Capacitive tracer design to mitigate incomplete I-V curves in outdoor tests. **Solar Energy**, v. 243, set. 2022.

MARIPRASATH, T.; KISHORE, P.; KALYANKUMAR, K. **Solar photovoltaic system modelling and analysis: design and estimation**. Gistrup, Dinamarca: River Publishers, 2023.

MATAM M. **2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)**. Flórida, Estados Unidos: IEEE, 2020.

MDN Web Docs. **Express Web Framework** (Node.js/JavaScript). Disponível em: https://developer.mozilla.org/pt-BR/docs/Learn_web_development/Extensions/Server-side/Express_Nodejs. Acesso em: 17 de ago. de 2025.

MONOKROUSSOS, C. *et al.* Energy performance of commercial c-Si PV modules in accordance with IEC 61853-1, -2 and impact on the annual specific yield. **EPJ Photovoltaics**, 2023.

MORALES-ARAGONÉS, J. *et al.* A review of I–V tracers for photovoltaic modules: Topologies and challenges. **Electronics (Switzerland)**, 2021.

OLAYIWOLA, T.; HYUN, S.; CHOI, S. Photovoltaic Modeling: A Comprehensive Analysis of the I–V Characteristic Curve. **Sustainability (Switzerland)**, 2024.

PAVLIK, M.; MAMCHUR, D. Modelling Photovoltaic Cells under Variable Conditions of Temperature and Solar Insolation Intensity. *In*: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023.

PVE. **PVPM 1540X**: Peak Power Measuring Device and IV-Curve Tracer for Photovoltaic Generators. 2024

RAKSHAYA, N. M. *et al.* DC to Ac Inverters for Solar Panel. *In*: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023.

React Documentation. **Describing the UI**. Disponível em: <https://react.dev/learn/describing-the-ui>. Acesso em: 17 de ago. de 2025.

REISCHAUER, I.; RIX, A. Design of a low cost multi-module capacitive IV curve tracer for PV module mismatch characterisation. *In*: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019.

SILVA, I. *et al.* **COBEP : 2017 Brazilian Power Electronics Conference : 19-22 November 2017**. São João del-rei, Brasil: IEEE, 2018.

ZHU, Y.; XIAO, W. A comprehensive review of topologies for photovoltaic I–V curve tracer. **Solar Energy**, v. 196, p. 346–357, 15 jan. 2020.