



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

PEDRO HENRIQUE DA COSTA EUSTÁCHIO

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA ESTIMADOR DE IRRADIÂNCIA COM
COMUNICAÇÃO IOT UTILIZANDO MICROCONTROLADOR ESP32 E
PROTOCOLO MQTT**

Recife
2025

PEDRO HENRIQUE DA COSTA EUSTÁCHIO

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA ESTIMADOR DE IRRADIÂNCIA COM
COMUNICAÇÃO IOT UTILIZANDO MICROCONTROLADOR ESP32 E
PROTOCOLO MQTT**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador(a): Prof. Dr. Eduardo José Barbosa

Corientador(a): Prof. Dr. Rafael Cavalcanti Neto

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Eustáchio, Pedro Henrique da Costa.

Desenvolvimento de sistema estimador de irradiância com comunicação IoT utilizando microcontrolador ESP32 e protocolo MQTT / Pedro Henrique da Costa Eustáchio. - Recife, 2025.

88 p. : il., tab.

Orientador(a): Eduardo José Barbosa

Coorientador(a): Rafael Cavalcanti Neto

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Controle e Automação - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices.

1. estimação de irradiância. 2. sistemas fotovoltaicos. 3. IoT. 4. ESP32. 5. MQTT. 6. ElipseE3. I. Barbosa, Eduardo José. (Orientação). II. Cavalcanti Neto, Rafael. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

PEDRO HENRIQUE DA COSTA EUSTÁCHIO

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA ESTIMADOR DE IRRADIÂNCIA COM
COMUNICAÇÃO IOT UTILIZANDO MICROCONTROLADOR ESP32 E
PROTOCOLO MQTT**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Controle e
Automação.

Aprovado em: 24/02/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo José Barbosa (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Márcio Rodrigo Santos de Carvalho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. M.Sc. Valdemar Moreira Cavalcante Junior (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, à minha namorada, Alice, por transformar minha visão de mundo e me tornar uma pessoa melhor, mais equilibrada e determinada. Sem você, eu não teria superado muitos dos desafios que enfrentei. Você é a minha força de vontade, e desejo que continue ao meu lado para celebrarmos juntos nossas próximas conquistas. É por você e com você que quero construir um futuro melhor, onde possamos explorar o mundo, crescer juntos e aproveitar cada etapa ao máximo. Tenho muita admiração por você. Muito obrigado por tudo, Lico.

Agradeço à minha mãe, Rossana, por ter me dado a vida, sido meu maior exemplo e proporcionado a melhor educação possível, ensinando-me a ser justo, educado e cuidadoso. Também agradeço aos meus irmãos, Matheus, Maria e Guilherme, a quem, como irmão mais velho, espero retribuir todo o amor e carinho que sempre me deram, com orgulho e orientação.

Na vida acadêmica, agradeço especialmente a Renato Freitas e Valdemar Moreira pelas oportunidades profissionais e acadêmicas, e, principalmente, por me apresentarem ao GEPAE, onde pude desenvolver minha pesquisa. Agradeço também aos meus orientadores, Rafael Cavalcanti e Eduardo Barbosa, por todo o apoio e orientação neste TCC e em outros projetos.

Agradeço aos amigos que fiz na graduação — Tiago Alves, Nathan Pinheiro, Clarissa Gusmão e Felipe José — que, além de compartilhar as dificuldades da universidade, contribuíram com suas expertises para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também aos meus amigos de laboratório — Camila, Duda, Ericles, Fialho, Gustavo, Lucas, Nestor, Bia e Igor — pelas conversas e momentos descontraídos.

Por fim, agradeço aos professores Márcio Rodrigo e Valdemar Moreira por aceitarem integrar a banca examinadora e pelas valiosas contribuições ao trabalho durante o processo de avaliação. Assim como aos professores e profissionais que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação.

RESUMO

A irradiância solar desempenha um papel essencial no controle e na eficiência dos sistemas fotovoltaicos (FV). Além disso, com base nas características do módulo FV e no valor irradiância, é possível monitorar o rendimento dos módulos, buscar o ponto de máxima potência e supervisionar condições críticas, como sombreamentos parciais e módulos envelhecidos. No entanto, os piranômetros, que são sensores de irradiância, apresentam custo elevado, medições pontuais limitadas e necessidade de calibrações periódicas. Este trabalho propõe uma solução de baixo custo para estimar a irradiância em sistemas FV, utilizando medições de corrente, tensão e temperatura dos módulos FV. A técnica de estimação baseia-se na aplicação de um algoritmo *lookup table*, construído a partir do Modelo Global Não Linear (MGNL) do módulo. O sistema desenvolvido utiliza o microcontrolador ESP32 para adquirir as grandezas do módulo e as envia via protocolo MQTT para um *broker*, que encaminha os dados para um *script* em Python, responsável por estimar a irradiância. Essa abordagem alivia o impacto computacional na ESP32, permitindo uma estimação mais precisa. Dessa forma, esse sistema permite o monitoramento remoto do módulo FV através da internet, com comunicação IoT. Para validar o conceito, foi desenvolvida uma Interface Homem-Máquina (IHM) no Eclipse E3, que exibe as informações de maneira eficiente. Resultados experimentais demonstraram que o protótipo obteve um MAPE de 3,45%, um desempenho superior à média dos métodos avaliados (3,60%), confirmando sua precisão sob diferentes condições ambientais. A solução proposta não apenas permite a estimação precisa da irradiância, mas também se destaca pela implementação da conectividade IoT, contribuindo para o monitoramento e manutenção eficiente de sistemas fotovoltaicos.

Palavras-chaves: estimação de irradiância; sistemas fotovoltaicos; IoT; ESP32; MQTT; Eclipse E3.

ABSTRACT

Solar irradiance plays a crucial role in controlling and optimizing the efficiency of photovoltaic (PV) systems. Moreover, based on the characteristics of the PV module and the current irradiance value, it is possible to monitor the performance of the modules, search for the maximum power point, and supervise critical conditions such as partial shading and module degradation. However, conventional pyranometers, which are irradiance sensors, present high costs, limited spot measurements, and require periodic calibration. This work proposes a low-cost solution for estimating irradiance in PV systems by using measurements of current, voltage, and temperature from the PV modules. The estimation technique is based on a lookup table algorithm, built from the Non-Linear Global Model of the module. The developed system uses the ESP32 microcontroller to acquire the module's parameters and transmits them via MQTT protocol to a broker, which forwards the data to a Python script responsible for estimating the irradiance. This approach reduces the computational load on the ESP32, enabling more accurate estimations. The system allows for remote monitoring of the PV module through the internet, with IoT communication. To validate the concept, a Human-Machine Interface (HMI) was developed in Elipse E3, efficiently displaying the information. Experimental results demonstrated that the prototype achieved a MAPE of 3.45%, outperforming the average of the evaluated methods (3.60%), confirming its accuracy under different environmental conditions. The proposed solution not only enables precise irradiance estimation but also stands out for its IoT connectivity implementation, contributing to the efficient monitoring and maintenance of photovoltaic systems.

Keywords: irradiance estimation; photovoltaic systems; IoT; ESP32; MQTT; Elipse E3.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curvas I-V (em azul) e P-V (em vermelho).	19
Figura 2 – Variações na curva I-V em função da temperatura e da irradiância - módulo FV CS6W-530MS da Canadian Solar.	19
Figura 3 – Modelos de painéis FV baseados em circuitos elétricos equivalentes. . .	21
Figura 4 – Fluxograma simplificado do MGNL proposto por Silva (2019).	23
Figura 5 – Resposta espectral do sol e dos piranômetros de termopilha e fotoelétricos.	25
Figura 6 – Interpolação trilinear aplicada para estimar G	35
Figura 7 – Esquemático do estimador de irradiância e suas conexões com o módulo FV.	36
Figura 8 – Erro percentual da estimação para diferentes dimensões de tabelas ($G = 605W/m^2$ e $T = 60^\circ C$).	37
Figura 9 – Curva P-V real vs Curva P-V do MGNL ($G = 337W/m^2$ e $T = 65^\circ C$). . .	37
Figura 10 – Impacto do envelhecimento em módulos FV ao longo de 10 e 20 anos de uso.	38
Figura 11 – Erros percentuais na estimativa de irradiância comparando módulo novo e módulo envelhecido (20 anos).	38
Figura 12 – Erro percentual por irradiância estimada.	39
Figura 13 – Placa de desenvolvimento ESP32-DevKitM-1, escolhida como central de processamento para o estimador de irradiância proposto.	45
Figura 14 – Diagrama eletrônico proposto para estimador de irradiância com co- municação IoT através do protocolo MQTT.	47
Figura 15 – Amplificador operacional na configuração subtrator.	48
Figura 16 – Circuito de condicionamento de sinais da tensão V do módulo FV. . .	49
Figura 17 – Circuito de condicionamento de sinais da corrente I do módulo FV. . .	50
Figura 18 – Fluxograma simplificado do estimador de irradiância com comunicação MQTT.	51
Figura 19 – Diagrama do sistema estimador de irradiância vinculado ao sistema supervisório através de comunicação MQTT.	55
Figura 20 – Hierarquia visual indicando as informações mais importantes.	56
Figura 21 – Áreas de interface intuitiva baseada nas expectativas visuais dos usuários.	57
Figura 22 – Contraste entre botões sem e com características de <i>affordance</i> para <i>links</i>	57
Figura 23 – Aplicação do processo de redução de desordem em interface ineficiente.	58
Figura 24 – Diferentes fundos de tela para IHMs.	59
Figura 25 – Paleta de cores recomendada em IHMs de alto desempenho.	60
Figura 26 – Diferença entre elementos com e sem gradientes de cores.	60

Figura 27 – Impacto do gradiente aplicado ao fundo de tela.	60
Figura 28 – Diferentes representações de uma variável e seus aspectos.	61
Figura 29 – Comparação na representação de quantidade através de linha ou área. . .	62
Figura 30 – Variáveis agrupadas através de contornos ou preenchimentos.	62
Figura 31 – Níveis de severidade de alarmes distintos por forma e cor.	63
Figura 32 – Percepção das cores em uma escala de cinza.	63
Figura 33 – Convenção de estados de objetos definidos pelo contraste com o fundo de tela.	63
Figura 34 – Gráficos de colunas representados em 2D e 3D.	64
Figura 35 – Tela de visão geral com elementos 3D.	65
Figura 36 – Interface homem-máquina desenvolvida no Elipse E3, em concordância com as boas práticas no projeto de IHM.	66
Figura 37 – Validação do circuito de condicionamento de tensão.	68
Figura 38 – Validação do circuito de condicionamento de corrente.	70
Figura 39 – Validação do Conversor Analógico-Digital (ADC).	71
Figura 40 – Avaliação do erro de estimativa G em função da tensão do módulo FV para diferentes condições de irradiância e temperatura.	74
Figura 41 – Protótipo estimador de irradiância.	76
Figura 42 – Piranômetro (PVA-1000S) em operação com o módulo FV (CS6W- 555MS).	76
Figura 43 – Configuração experimental do estimador conectado ao módulo FV e à carga resistiva.	77
Figura 44 – Interface homem-máquina do sistema estimador de irradiância ope- rando em campo.	77
Figura 45 – Configuração experimental do estimador conectado à fonte, emulando o módulo FV, e à carga resistiva.	78
Figura 46 – IHM no teste experimental de condições ambientais ($G = 349W/m^2$ e $T = 48^{\circ}C$).	79
Figura 47 – IHM no teste experimental de condições ambientais ($G = 479W/m^2$ e $T = 46^{\circ}C$).	80
Figura 48 – IHM no teste experimental de condições ambientais ($G = 538W/m^2$ e $T = 47^{\circ}C$).	80
Figura 49 – IHM no teste experimental de condições ambientais ($G = 818W/m^2$ e $T = 50^{\circ}C$).	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre métodos de estimação de irradiância apresentados no Capítulo 2.	31
Tabela 2 – Comparação de microcontroladores e seus preços médios (Novembro, 2024).	31
Tabela 3 – Comparação entre as placas de desenvolvimento ESP8266 e ESP32 . .	44
Tabela 4 – Valores de entrada e saída para o circuito de condicionamento de tensão.	68
Tabela 5 – Valores de entrada e saída para o circuito de condicionamento de corrente.	69
Tabela 6 – Valores de entrada analógica e saída digital do ADC.	70
Tabela 7 – Condições ambientais e métricas de erro para o estimador de irradiância.	72
Tabela 8 – Resultados de irradiância estimada no MPP para diferentes condições de irradiância e temperatura, com tabelas 3-D de diferentes dimensões.	73
Tabela 9 – Resultados da emulação do módulo FV em fonte programável.	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i> - Conversor Analógico-Digital
AM	<i>Air Mass</i> - Massa de Ar
AmpOp	Amplificador Operacional
DDM	<i>Double Diode Model</i> - Modelo de Dois Diodos
FV	Fotovoltaico
GMPP	<i>Global Maximum Power Point</i> - Ponto de Máxima Potência Global
IHM	Interface Homem-Máquina
IPN	Interpolação Polinomial de Newton
LUT	<i>Lookup Table</i>
MAPE	<i>Mean Absolute Percentage Error</i> - Erro Máximo Absoluto Percentual
MGNL	Modelo Global Não-Linear
MPP	<i>Maximum Power Point</i> - Ponto de Máxima Potência
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> - Rastreamento do Ponto de Máxima Potência
nRMSE	<i>Normalized Root Mean Squared Error</i> - Erro Quadrático Médio Normalizado
nRMSD	<i>Normalized Root Mean Squared Deviation</i> - Desvio Quadrático Médio Normalizado
NN	<i>Neural Network</i> - Rede Neural
rRMSE	<i>Relative Root Mean Squared Error</i> - Erro Quadrático Médio Relativo
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SDM	<i>Single Diode Model</i> - Modelo de Um Diodo
STC	<i>Standard Test Conditions</i> - Condições de Teste Padrão
TDM	<i>Triple Diode Model</i> - Modelo de Três Diodos
QoS	<i>Quality of Service</i> - Qualidade de Serviço

LISTA DE SÍMBOLOS

I_{mpp}	Corrente no ponto de máxima potência
V_{mpp}	Tensão no ponto de máxima potência
I_{sc}	Corrente de curto-circuito
V_{oc}	Tensão de circuito aberto
I_{ph}	Corrente fotogerada
I_{sat}	Corrente de saturação
R_{sh}	Resistência <i>shunt</i>
R_s	Resistência série
V_0	Tensão de saída
G	Irradiância
I	Corrente
V	Tensão
T	Temperatura
V_t	Tensão térmica
N_s	Número de células em série no módulo fotovoltaico
n	Fator de idealidade
k	Constante de Boltzmann
q	Carga do elétron
R^2	Coefficiente de determinação
G_{med}	Irradiância medida
G_{est}	irradiância estimada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.2	ORGANIZAÇÃO TEXTUAL	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	CURVAS CARACTERÍSTICAS DE MÓDULOS FV	18
2.2	MODELAGEM DE PAINÉIS FV	20
2.2.1	Modelos Globais Não Lineares	21
2.2.1.1	MGNL Proposto por Silva (2019)	22
2.2.1.2	Outros MGNL	23
2.3	MÉTODOS TRADICIONAIS DE MEDIÇÃO DE IRRADIÂNCIA	24
2.4	ESTIMADORES DE IRRADIÂNCIA NA LITERATURA	25
2.4.1	Regressão Não Linear com Mudança no SDM (CARRASCO; MANCILLA-DAVID; ORTEGA, 2014)	25
2.4.2	Regressão Linear com Corrente de Curto-circuito (ALARCON-MAZA et al., 2023)	26
2.4.3	Interpolação Polinomial de Newton (RISDIYANTO et al., 2023)	27
2.4.4	Rede Neural (CHOUAY; OUASSAID, 2024)	27
2.4.5	Estimador de Irradiância Proposto por (BARBOSA et al., 2024)	28
2.4.6	Comparativo entre Métodos	30
2.5	SISTEMAS SUPERVISÓRIOS	32
2.5.1	Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA)	32
2.5.1.1	Vantagens da Aplicação de Sistemas SCADA	32
2.5.1.2	Características de <i>Softwares</i> SCADA	33
2.6	CONCLUSÕES PARCIAIS	33
3	ESTIMADOR DE IRRADIÂNCIA COM SUPORTE A IOT	34
3.1	FUNCIONAMENTO DO ESTIMADOR DE IRRADIÂNCIA PROPOSTO POR (BARBOSA et al., 2024)	34
3.1.1	Críticas e Aperfeiçoamentos	39
3.2	ENGENHARIA DE REQUISITOS	41
3.2.1	Sensoriamento dos Sinais	42
3.2.2	Conversão Analógica-Digital	43
3.2.3	Processamento e Gerenciamento de Dados pelo Microcontrolador	43
3.2.4	Viabilização da Transmissão de Dados via MQTT	45
3.2.5	Realização da Estimação de Irradiância	46
3.3	PROJETO DO SISTEMA EMBARCADO	47
3.3.1	Diagrama Eletrônico Proposto para Estimador de Irradiância	47
3.3.2	Projeto dos Circuitos de Condicionamento	48

3.3.3	Descrição do <i>Firmware</i> (Fluxograma)	49
3.4	IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO	51
3.4.1	Broker MQTT	51
3.4.2	ESP32	52
3.4.3	<i>Script</i> em Python	53
3.5	CONCLUSÕES PARCIAIS	53
4	DESENVOLVIMENTO DE INTERFACE HOMEM-MÁQUINA PARA O ESTIMADOR DE IRRADIÂNCIA	54
4.1	DIAGRAMA COMPLETO DO SISTEMA	54
4.2	BOAS PRÁTICAS NO PROJETO DE INTERFACES HOMEM-MÁQUINA	55
4.2.1	Organização de Layouts	55
4.2.1.1	Hierarquia Visual Clara	56
4.2.1.2	Áreas Definidas Claramente	56
4.2.1.3	Fornecimento (<i>Affordance</i>)	56
4.2.1.4	Redução de Desordem	57
4.2.2	Apresentação Eficiente da Informação	57
4.2.2.1	Cores	58
4.2.2.2	Representações de variáveis	60
4.2.2.3	Forma	61
4.2.2.4	Acessibilidade	62
4.2.2.5	Movimento	64
4.2.2.6	2D vs 3D	64
4.3	IHM DESENVOLVIDA PARA O ESTIMADOR DE IRRADIÂNCIA	65
4.4	CONCLUSÕES PARCIAIS	66
5	RESULTADOS	67
5.1	VALIDAÇÃO DOS CIRCUITOS DE SENSORIAMENTO	67
5.1.1	Validação do Circuito de Condicionamento de Tensão	67
5.1.2	Validação do Circuito de Condicionamento de Corrente	69
5.1.3	Validação do Conversor Analógico-Digital (ADC)	69
5.2	RESULTADOS SIMULADOS	71
5.3	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	75
5.3.1	Validação da Comunicação	75
5.3.2	Emulação de Módulo FV em Fonte	78
5.4	CONCLUSÕES PARCIAIS	81
6	CONCLUSÕES	82
6.1	TRABALHOS FUTUROS	82
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICE A – REPOSITÓRIO DE ACESSO AOS ARQUI- VOS DO SISTEMA	88

1 INTRODUÇÃO

O cenário global atual é marcado por mudanças climáticas aceleradas, impulsionadas pela ação humana, e uma demanda de energia que cresce com a população. Diante disso, torna-se cada vez mais essencial buscar soluções sustentáveis e fontes renováveis de energia (EYRING et al., 2021). Historicamente, políticas globais têm sido estabelecidas para reduzir as emissões de dióxido de carbono e diminuir a dependência de combustíveis fósseis na produção de energia (GUPTA, 2010).

Neste contexto, a energia solar se destaca como uma fonte renovável que oferece diversos benefícios. Os sistemas fotovoltaicos (FV) são reconhecidos principalmente pela produção de energia limpa, sem emissão de poluentes, e também por sua facilidade de instalação em locais remotos e baixa necessidade de manutenção. Essas características possibilitam que a energia solar preencha um dos papéis principais na contribuição à crescente necessidade global de energia (JUNIOR, 2018a).

Devido às suas vantagens técnicas e econômicas, os módulos fotovoltaicos se consolidam como uma das principais matrizes energéticas, tanto comercialmente, nas indústrias e residências, quanto na comunidade científica, que constantemente busca por melhorias no desempenho energético dos sistemas de produção de energia solar (JUNIOR, 2018a).

Observar e monitorar o comportamento dos módulos fotovoltaicos é de suma importância para obter uma performance elevada do sistema e avaliar o potencial de geração de energia solar (MADUREIRA; CHAGAS; JESUS, 2020). Nesse sentido, a medição de irradiância a medição de irradiância auxilia no controle e na eficiência dos módulos, sendo possível monitorar o rendimento dos módulos, buscar o ponto de máxima potência, e supervisionar condições críticas, como envelhecimento desigual entre módulos e acúmulo de sujeira nas unidades FV (BARBOSA et al., 2024).

Embora o método mais confiável para medição da irradiância seja através de piranômetros, esses dispositivos apresentam custo elevado, medições pontuais limitadas e necessidade de calibrações periódicas. Como alternativa, a estimativa da irradiância tem se mostrado uma área promissora, com potencial para oferecer soluções mais acessíveis e eficazes (MADUREIRA; CHAGAS; JESUS, 2020; BARBOSA et al., 2024).

Diversos estudos demonstram a importância da estimativa da irradiância em aplicações de detecção de falhas em sistemas FV. Hajji et al. (2023) utilizaram técnicas de aprendizado de máquina para avaliar como variações abruptas de potência no módulo podem ser decorrentes de falhas ou de variações naturais de irradiância. A partir das condições climáticas, Yildiz e Gol (2019) desenvolveram um método baseado em redes neurais para identificar automaticamente falhas em inversores e módulos FV. Da mesma forma, Lazzaretti et al. (2020) propuseram um modelo de regressão linear para detectar falhas no sistema.

Dessa forma, o desenvolvimento de sistemas de supervisão e estimação de irradiância não apenas contribui para o avanço científico, mas também promove a otimização do desempenho de sistemas FV.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e validar um sistema de estimação de irradiância para plantas fotovoltaicas, integrado com comunicação IoT, visando otimizar a supervisão e o monitoramento da performance do sistema fotovoltaico.

Como objetivos específicos deste trabalho, podem ser listados:

- Avaliar e determinar uma técnica de estimação de irradiância adequada, considerando critérios como custo, precisão e eficiência operacional;
- Desenvolver um sistema de sensoriamento preciso para aquisição das medições de corrente, tensão e temperatura do módulo fotovoltaico;
- Implementar a comunicação IoT no sistema por meio do protocolo MQTT;
- Desenvolver uma Interface Homem-Máquina (IHM) para supervisão do sistema de estimativa de irradiância;
- Validar experimentalmente o desempenho do estimador de irradiância em diferentes condições ambientais.

1.2 ORGANIZAÇÃO TEXTUAL

Este trabalho de conclusão de curso é organizado nos seguintes capítulos:

- **Capítulo 2:** Apresenta uma revisão da literatura sobre estimadores de irradiância, com o objetivo de avaliar a técnica mais adequada para a implementação de um estimador. Além disso, introduz os sistemas supervisórios, abordando suas funcionalidades e a importância da interação entre o operador e o sistema;
- **Capítulo 3:** Descreve em detalhes a técnica de estimação utilizada como base para este trabalho, destacando seus fundamentos e limitações. Em seguida, são listados os principais pontos de aprimoramento identificados. Com base nisso, apresenta-se a engenharia de requisitos do sistema proposto, detalhando os aspectos do projeto do sistema embarcado e a implementação do algoritmo desenvolvido;
- **Capítulo 4:** Aborda as boas práticas no projeto de Interfaces Homem-Máquina (IHM), descrevendo princípios e diretrizes voltados ao design de interfaces industriais. Em seguida, apresenta a IHM desenvolvida para o estimador de irradiância, destacando sua estrutura e funcionalidades conforme os princípios estabelecidos;

- **Capítulo 5:** Apresenta a validação e análise dos principais componentes do sistema desenvolvido. São detalhadas as validações dos circuitos de sensoriamento, considerando ganho e linearidade, bem como os resultados simulados, evidenciando a precisão da estimação de irradiância para diferentes tamanhos da tabela 3-D de soluções. Também são descritos os testes experimentais, incluindo a verificação da comunicação MQTT entre os dispositivos do sistema e os resultados obtidos em laboratório, demonstrando a operação do sistema supervisorio;
- **Capítulo 6:** Neste capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas através dos principais resultados como também as possibilidades de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os módulos fotovoltaicos possuem características extremamente não-lineares, o que eleva a complexidade e torna a modelagem desses sistemas um grande desafio para os pesquisadores. A dificuldade em obter o modelo adequado deve-se às variações na potência e na tensão de saída, resultantes de múltiplas condições ambientais possíveis, como diferentes níveis de irradiância solar e temperatura nos módulos (EBRAHIMI et al., 2019).

Para avaliar o desempenho elétrico dos módulos fotovoltaicos, os fabricantes de painéis solares disponibilizam suas características com base nas chamadas *Standard Test Conditions* (STC - condições de teste padrão). Essas condições são definidas por uma irradiância (G) de 1000 W/m^2 , uma temperatura (T) de 25°C e um espectro solar médio com massa de ar (AM - Air Mass) de 1,5. Porém, durante as condições normais de operação, os módulos fotovoltaicos estão sujeitos a variações de irradiância e mudanças de temperatura ao longo do dia, o que compromete a precisão das informações fornecidas pelo manual do fabricante (PIMENTEL, 2020).

2.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE MÓDULOS FV

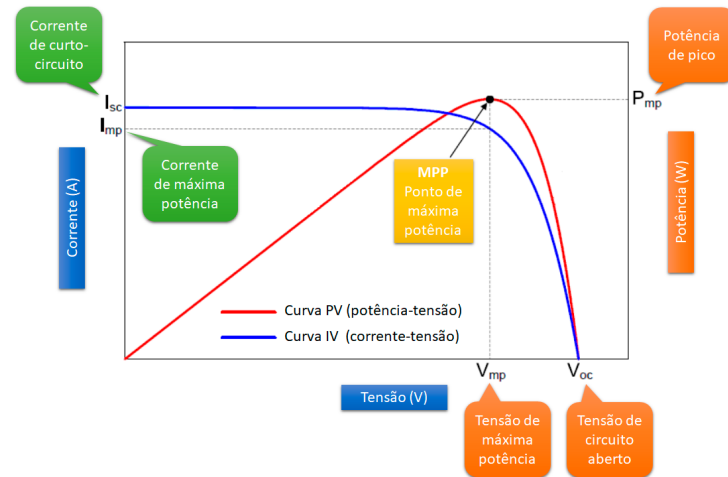
Embora os módulos FV sejam fontes de energia, seu comportamento difere das fontes elétricas convencionais. Esses dispositivos são caracterizados por uma interdependência entre a tensão e a corrente do dispositivo (VILLALVA, 2015).

Sob condições constantes de irradiância e temperatura, todos os módulos fotovoltaicos apresentam uma relação característica entre a tensão e a corrente. A partir dessa relação, define-se a curva I-V, que representa as características elétricas dos dispositivos solares. Para cada curva I-V, existe uma curva P-V correspondente, que descreve a variação da potência do módulo em função de sua tensão, sendo essa última importante para avaliar o desempenho energético do sistema FV (FOSTER; GHASSEMI; COTA, 2009; VILLALVA, 2015). Ambas as curvas estão ilustradas na Figura 1.

Conforme discutido anteriormente e evidenciando na Figura 1, ao submeter o módulo FV a condições constantes de irradiância e temperatura, a curva I-V apresenta esse comportamento característico: uma corrente quase constante para baixos níveis de tensão, seguida por um ponto de inflexão (joelho da curva) e uma queda abrupta até atingir a tensão máxima. Como resultado desse comportamento, a curva P-V evidencia o ponto de máxima potência (*Maximum Power Point* - MPP), juntamente com os valores de tensão e corrente correspondentes a essa condição, V_{mp} e I_{mp} .

De modo a esclarecer o comportamento dos módulos diante de variações nas condições ambientais, os fabricantes ilustram as variações da curva I-V em função da temperatura e da irradiância, a fim de destacar como essas condições impactam o desempenho dos

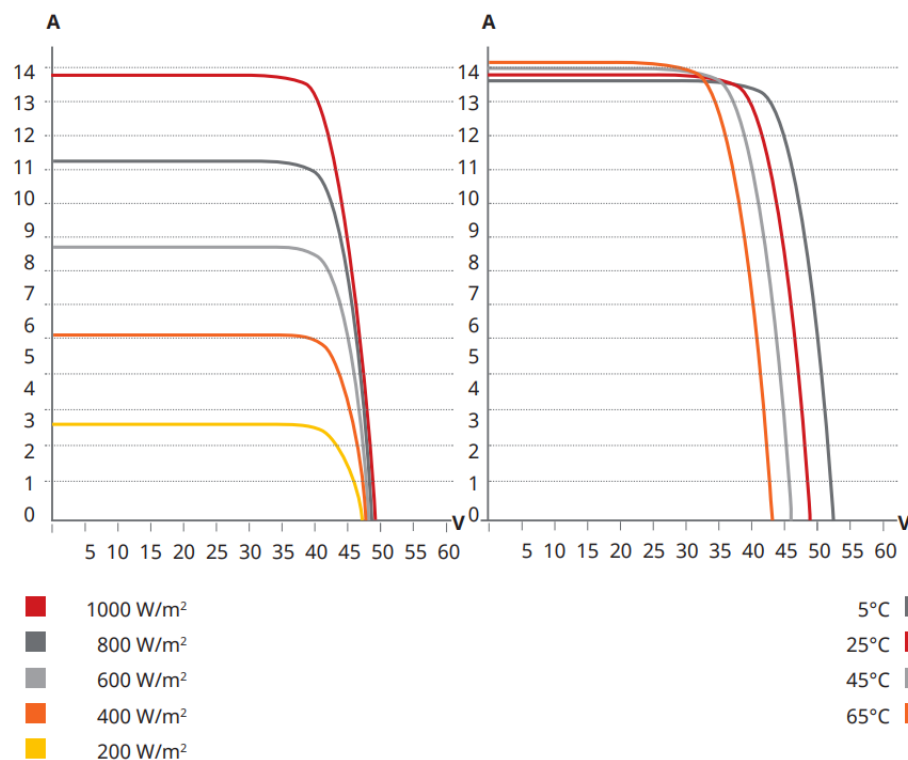
Figura 1 – Curvas I-V (em azul) e P-V (em vermelho).



Fonte: Retirado de (VILLALVA, 2019).

módulos FV. Na Figura 2 são apresentadas as variações da curva I-V para diferentes níveis de G , mantendo T constante, e para diferentes valores de T , mantendo G constante.

Figura 2 – Variações na curva I-V em função da temperatura e da irradiância - módulo FV CS6W-530MS da Canadian Solar.



Fonte: Retirado de (CANADIAN SOLAR, 2023).

No gráfico à esquerda, onde a curva I-V varia com a irradiância, observa-se a proporcionalidade quase linear entre a I_{sc} e G , enquanto a V_{oc} permanece praticamente inalterada. Já no gráfico à direita, que mostra a variação da curva I-V em função da temperatura,

evidencia-se a relação inversa entre V_{oc} e T , ou seja, a tensão de circuito aberto diminui à medida que a temperatura aumenta. Além disso, nesse caso, as variações em I_{sc} são consideravelmente menores.

A curva I-V pode ser obtida através de abordagens empíricas ou analíticas. Para obter empiricamente a curva I-V, é necessário expor o módulo FV a cenários de irradiância e temperatura constante. Nessas condições, mede-se a tensão e a corrente do dispositivo em diferentes pontos de operação, variando a resistência da carga da condição de curto-circuito (*Short Circuit Current* - I_{sc}), onde a resistência é nula, até a condição de circuito aberto (*Open-Circuit Voltage* - V_{oc}), onde a resistência é infinita (FOSTER; GHASSEMI; COTA, 2009).

O método empírico fornece uma curva real e precisa. No entanto, a curva I-V também pode ser obtida analiticamente a partir de modelos matemáticos dos painéis FV. Essa abordagem evita as dificuldades e limitações associadas à implementação prática. A relevância do método analítico está associada a diversas aplicações, como a simulação de sistemas FV, a obtenção de informações sobre as propriedades físicas dos módulos, o controle de qualidade e, principalmente, o desenvolvimento de algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT) (JUNIOR, 2018b).

2.2 MODELAGEM DE PAINÉIS FV

Existem diversos métodos para simular módulos fotovoltaicos, como, por exemplo, através de redes neurais artificiais no campo da inteligência artificial. No entanto, o método mais comumente adotado por pesquisadores na modelagem de células fotovoltaicas é através de uma representação de circuitos elétricos. Dentre esses modelos, os mais estabelecidos, no quesito de representação do comportamento dos módulos FV, são (JUNIOR, 2018b; EBRAHIMI et al., 2019; SILVA, 2019; CARVALHO, 2019): o modelo de um diodo; o modelo de dois diodos; e o modelo de três diodos. Esses modelos são classificados com base em circuitos elétricos equivalentes, que são capazes de representar as características dos módulos FV em conjuntos de parâmetros do circuito, bem como suas condições operacionais.

O modelo de um diodo (*Single Diode Model* - SDM), apresentado na Figura 3a, é composto por um circuito equivalente com cinco parâmetros, que inclui um diodo, uma fonte de corrente, uma resistência em série (R_s) e uma resistência *shunt* (R_{sh}). Nessa representação do módulo FV, a resistência em série representa as perdas associadas aos contatos metálicos e às interconexões entre os semicondutores, enquanto a resistência *shunt* expressa os defeitos de cristal e impurezas na região de junção dos semicondutores. Esse modelo é amplamente utilizado na literatura devido à sua simplicidade e praticidade (JUNIOR, 2018b; EBRAHIMI et al., 2019; SILVA, 2019).

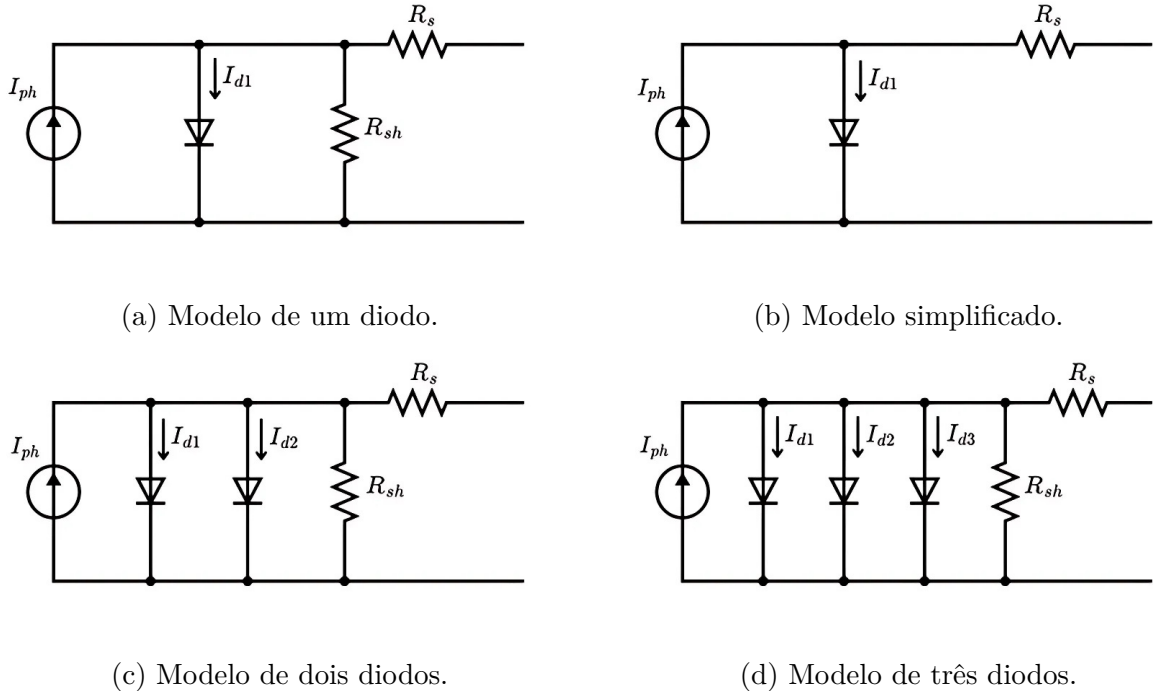
Como alternativa ao modelo de um diodo, existe o modelo simplificado, exibido na Figura 3b. Este, é uma variação do modelo de um diodo e consiste em um circuito com

apenas quatro parâmetros, na qual a resistência de derivação (*shunt*) é ignorada (JUNIOR, 2018b). Este modelo é pouco aderido pelos autores da área, pois o efeito da resistência *shunt* é geralmente considerado relevante.

O modelo de dois diodos (*Double Diode Model* - DDM), apresentado na Figura 3c, corresponde a um circuito equivalente com sete parâmetros. Esse modelo oferece alta precisão, mas também apresenta maior complexidade, o que torna mais difícil determinar todos os seus parâmetros e realizar simulações computacionais. A principal diferença desse modelo em relação ao modelo de um diodo é a adição de um segundo diodo reverso, que representa o efeito de recombinação na região de depleção (JUNIOR, 2018b; EBRAHIMI et al., 2019; SILVA, 2019).

Por fim, o modelo de três diodos (*Triple Diode Model* - TDM), exibido na Figura 3d, é resultado da inclusão de um terceiro diodo no circuito, representando as perdas associadas aos defeitos do cristal de superfície. Essa adição resulta em um circuito de nove parâmetros, com precisão e complexidade ainda maiores que as do modelo de dois diodos. Sua relevância acadêmica está associada à representação de módulos FV em condições de baixa irradiância e à modelagem de tecnologias com estruturas cristalinas mais complexas (GHOLAMI et al., 2022; JUNIOR, 2023).

Figura 3 – Modelos de painéis FV baseados em circuitos elétricos equivalentes.



Fonte: (Próprio autor, 2024).

2.2.1 Modelos Globais Não Lineares

Em todo caso, determinar os parâmetros de um modelo de circuito é, em geral, uma tarefa complexa. Diversas técnicas foram propostas por pesquisadores, entretanto, a maioria

delas calcula os parâmetros do modelo considerando apenas uma única condição ambiental, ou seja, válida apenas para uma combinação específica de irradiância e temperatura. Além disso, essas técnicas geralmente assumem que alguns parâmetros permanecem constantes em condições climáticas variadas. Essa abordagem é fisicamente irrealista e pode resultar em parâmetros imprecisos (JUNIOR, 2018b; SILVA, 2019).

Para superar esses problemas, Silva (2019) propôs um modelo global não-linear (MGNL) para módulos fotovoltaicos. Esse modelo introduziu novos parâmetros para melhorar a correspondência com o comportamento físico do módulo. Apesar dos novos parâmetros aumentar a complexidade do modelo, ele demonstrou maior precisão e flexibilidade, sendo capaz de obter as curvas P-V e I-V sob diferentes condições ambientais (PIMENTEL, 2020).

2.2.1.1 MGNL Proposto por Silva (2019)

O modelo proposto por Silva (2019) é uma técnica global não-linear para o SDM baseada no comportamento físico dos módulos FV. A partir da análise dos nós do circuito do SDM, considerando as Leis de Kirchhoff e a equação de corrente do diodo, obtém-se a seguinte equação:

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{\frac{V + IR_s}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}. \quad (2.1)$$

Essa equação é transcendental e, portanto, não pode ser expressa por funções elementares. Sua solução pode ser obtida por métodos numéricos, como pelos métodos da bissecção e de Newton-Raphson. Além disso, a tensão térmica do módulo (V_t), considerando um painel com N_s células em série, é definida por:

$$V_t = \frac{N_s \cdot n \cdot k \cdot T}{q}. \quad (2.2)$$

Onde n é o fator de idealidade do diodo, k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura (em K) e q é a carga do elétron (em C).

Na técnica de Silva (2019), cada parâmetro do SDM é reajustado por equações de transposição, elevando a quantidade de parâmetros do modelo de cinco para oito, sendo sete relacionados às resistências e um ao fator de idealidade do diodo. Em seguida, grandezas complementares ao funcionamento do módulo FV (I_{sc} , V_{oc} , I_{ph} e I_{sat}) são calculadas por equações explícitas dependentes dos oito parâmetros do modelo. A aplicação desse modelo pode ser estruturada em três etapas: determinação dos parâmetros de referência, treinamento com curvas P-V e obtenção dos parâmetros finais do SDM (SILVA, 2019; JUNIOR, 2023).

Na primeira etapa do modelo, cujo objetivo é determinar os parâmetros de referência, é necessário definir as constantes físicas fundamentais, os parâmetros do módulo e uma curva I-V como referência. Através da curva de referência, são calculados os limites de busca do algoritmo de otimização. A busca deve ser limitada de modo a manter o significado físico

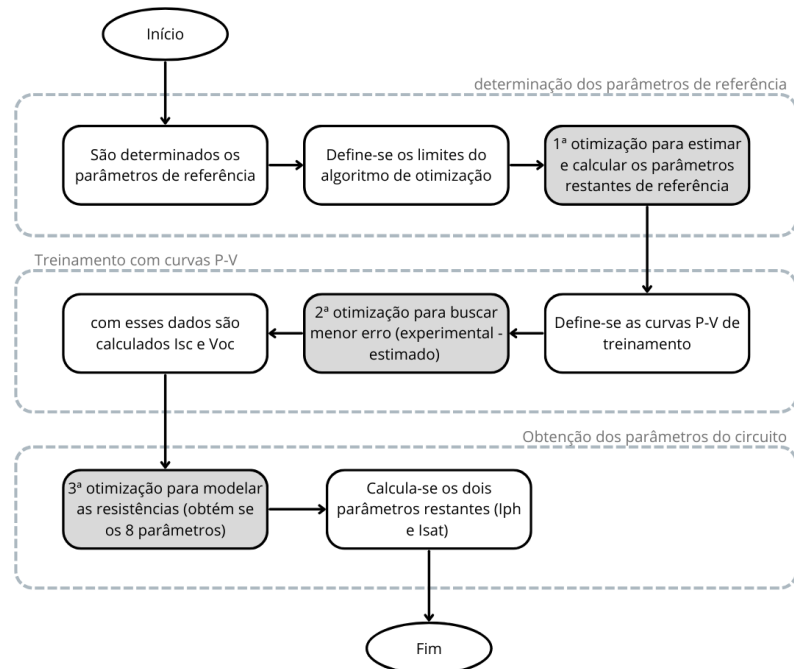
dos parâmetros. Por fim, o algoritmo de otimização é aplicado para estimar os parâmetros restantes de referência.

Na segunda etapa, é definido um conjunto de curvas P-V, denominadas curvas de treinamento, com valores distintos de irradiância e temperatura. Em seguida, aplica-se o mesmo método de otimização da etapa anterior, buscando a melhor correspondência entre as curvas experimentais e estimadas. Com base nesses resultados, são calculados os valores de I_{sc} e V_{oc} .

Na última etapa, inicia-se outro processo de otimização, cujo objetivo é determinar os coeficientes responsáveis pela modelagem das resistências R_s e R_{sh} , considerando variações de G e T . Dessa forma, o modelo completo apresenta oito parâmetros efetivamente estimados, enquanto os dois parâmetros restantes do modelo de um diodo (I_{ph} e I_{sat}) são calculados explicitamente a partir dos demais parâmetros.

Assim, obtém-se um modelo de um diodo com parâmetros dinâmicos capazes de representar com precisão os módulos fotovoltaicos em uma ampla gama de condições ambientais. O fluxograma simplificado do MGNL proposto por Silva (2019) está representado na Figura 4. Detalhes adicionais sobre sua implementação podem ser encontrados no trabalho de Silva (2019).

Figura 4 – Fluxograma simplificado do MGNL proposto por Silva (2019).



Fonte: (Próprio autor, 2024).

2.2.1.2 Outros MGNL

Além da solução de Silva (2019), outros modelos globais não-lineares foram propostos na literatura, como os modelos apresentados por Lang e Zhang (2020), Zhang et al.

(2022) e Lu et al. (2022). Nessas soluções, cada parâmetro do modelo de um diodo pode ser ajustado utilizando equações de transposição fundamentadas no comportamento físico dos módulos fotovoltaicos (BARBOSA et al., 2024).

É importante esclarecer que, antes da concepção de um algoritmo de estimação, a modelagem dos módulos FV constitui uma etapa fundamental no processo de estimação de irradiância. Apenas a partir de um modelo preciso é possível desenvolver um algoritmo eficiente.

2.3 MÉTODOS TRADICIONAIS DE MEDIÇÃO DE IRRADIÂNCIA

A conversão da energia solar em eletricidade ocorre a partir da incidência da radiação solar nas células FV. A irradiância solar, definida como a potência da radiação por unidade de área (W/m^2), é relativa à energia solar efetivamente aproveitável pelos sistemas FV (SHIBUYA; LEI, 2022).

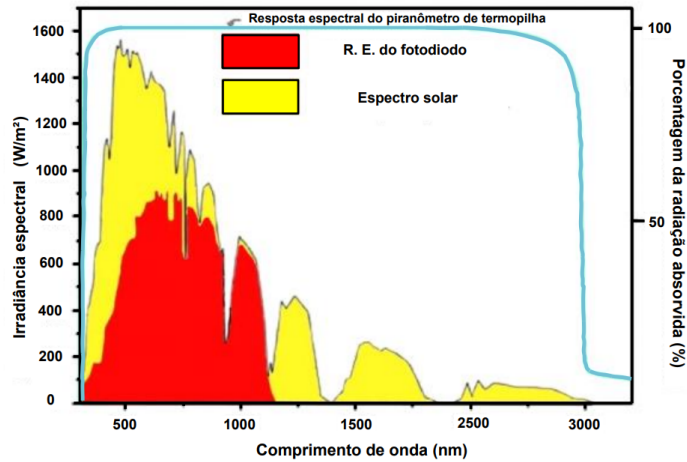
A medição de irradiância solar pode ser realizada através de instrumentos conhecidos como piranômetros. Os principais tipos desses sensores, que operam segundo diferentes princípios de funcionamento, são:

- **Piranômetro de termopilha:** A medição da irradiância se dá por meio da diferença de temperatura entre uma superfície preta exposta ao sol e uma superfície branca protegida da luz solar (OYELAMI et al., 2020);
- **Piranômetro de fotodiodo:** Utiliza um fotodiodo de junção PN que, devido ao efeito fotoelétrico, gera uma corrente proporcional à radiação incidente (MEIRA et al., 2018);
- **Piranômetro fotovoltaico:** Emprega uma célula FV operando em condições próximas a I_{sc} , onde a corrente gerada é diretamente proporcional à irradiância solar (SHIBUYA; LEI, 2022).

A principal diferença entre esses sensores, além de suas características construtivas, está na resposta espectral. A luz solar que atinge a superfície terrestre, com $AM = 1,5$, apresenta um espectro de radiação dentro do intervalo de comprimento de onda de 300 nm a 2800 nm. Nesse contexto, o piranômetro de termopilha cobre um intervalo de 100 nm a 3000 nm, enquanto os fotoelétricos (fotodiodo e fotovoltaico) operam entre 350 nm e 1150 nm, conforme indicado na Figura 5 (MEIRA et al., 2018; OYELAMI et al., 2020).

Piranômetros de termopilha oferecem medições mais precisas devido à sua ampla resposta espectral. Em contrapartida, os piranômetros fotoelétricos exigem menos manutenção e têm menor custo em comparação com os de termopilha (OYELAMI et al., 2020). Apesar dessas diferenças, o uso desses sensores em usinas fotovoltaicas é limitado pelo alto custo e pela necessidade de calibração periódica (BARBOSA et al., 2024).

Figura 5 – Resposta espectral do sol e dos piranômetros de termopilha e fotoelétricos.



Fonte: Retirado de (MEIRA et al., 2018).

2.4 ESTIMADORES DE IRRADIÂNCIA NA LITERATURA

De modo a justificar as escolhas feitas neste trabalho, foram analisados e comparados artigos da área estudada, onde apenas um não é recente (dos últimos 2 anos). A seguir, os estudos de técnicas de estimação de irradiância onde foram desenvolvidos protótipos dos estimadores são brevemente descritos.

2.4.1 Regressão Não Linear com Mudança no SDM (CARRASCO; MANCILLA-DAVID; ORTEGA, 2014)

O artigo de Carrasco, Mancilla-David e Ortega (2014) propõe um estimador de irradiância solar baseado na reparametrização da característica I-V do sistema. O modelo adotado no artigo é fundamentado no modelo de diodo único, porém, o diodo é substituído por uma fonte de corrente controlada.

A técnica de estimação desenvolvida é baseada na suposição de que G é constante e que I , V e T são medidos em tempo real. O trabalho menciona que, ao reparametrizar a curva I-V do sistema, é possível associar um único valor de irradiância para o conjunto I , V e T medidos. Com isso, o artigo idealizou um modelo de regressão não linear.

Para o protótipo, Carrasco, Mancilla-David e Ortega (2014) utilizaram uma carga resistiva e dois sensores, um de tensão e outro de temperatura, com a corrente sendo calculada pela lei de Ohm. Nessa aplicação, os sinais medidos foram enviados para um microcontrolador Arduino Uno, onde o algoritmo de estimação era executado em tempo real.

O modelo de regressão não linear de Carrasco, Mancilla-David e Ortega (2014) foi validado experimentalmente ao ser comparado com os dados de um piranômetro. Os experimentos mostraram que, sob condições de irradiância quase constante, o erro quadrático médio normalizado (*Normalized Root Mean Square Error* - nRMSE) do estimador

foi de 0,87%, enquanto, sob rápidas variações de irradiância, o nRMSE subiu para 6,65%. Ambos resultados foram registrados para períodos de dois minutos.

Este trabalho evidencia o potencial dos microcontroladores como uma solução prática e de baixo custo para aplicações de estimação de irradiância. No entanto, algumas limitações são observadas no modelo proposto. Ao assumir irradiância constante, o estimador enfrenta uma restrição significativa, pois cenários reais apresentam flutuações e variações em G . Isso é evidente nos resultados, onde o desempenho do estimador é inferior sob condições de irradiância variável. Além disso, os resultados apresentados abrangem um período de apenas dois minutos, sendo insuficiente para formular um julgamento a respeito do desempenho do estimador em um cenário real.

2.4.2 Regressão Linear com Corrente de Curto-circuito (ALARCON-MAZA et al., 2023)

O trabalho de Alarcon-Maza et al. (2023) apresenta o desenvolvimento de um instrumento para estimar a irradiância em células FV com comunicação via IoT. Nesse artigo, foi criado um modelo de correlação estatística entre a corrente de curto-circuito (I_{sc}) do módulo solar e a irradiância medida por um piranômetro. As correntes de curto-circuito do módulo, obtidas por sensores de silício, foram medidas em diferentes intervalos de temperatura, juntamente com as irradiâncias fornecidas pelo piranômetro, para assim, aplicar a regressão linear entre os dados experimentais.

O sistema embarcado apresentado no artigo é dividido em três blocos principais: dispositivos sensores; uma unidade de microcontrolador; e um módulo de comunicação sem fio. O artigo detalha a construção de um dispositivo de coleta de dados em tempo real, com comunicação Wi-Fi, utilizando o protocolo MQTT para IoT e um servidor SQL para o armazenamento dos dados. Com relação ao estimador em questão, ele apresentou um erro percentual absoluto médio (*Mean Absolute Percentage Error* - MAPE) de 6,97% em um intervalo de 24 horas, e um erro quadrático médio relativo (*Relative Root Mean Square Error* - rRMSE) de 10,74% no mesmo período.

A abordagem apresentada no trabalho para a modelagem do sistema apresenta limitações importantes. Visto que a relação entre corrente e irradiância é intrinsecamente não linear, e que a correlação encontrada está restrita ao intervalo de temperaturas aplicado no processo, a aplicabilidade do modelo a diferentes condições ambientais acaba sendo limitada. A ausência de testes fora do intervalo de temperatura levanta questionamentos sobre a validade da solução em cenários reais, especialmente quando, mesmo em condições favoráveis, seu desempenho foi inferior ao de outras soluções encontradas na literatura. Além disso, o uso da corrente de curto-circuito como parâmetro para a estimação de irradiância é problemático, pois a coleta desse dado interrompe a produção de energia, que é o principal objetivo do sistema.

Apesar das limitações na estimação, a implementação de comunicação sem fio e coleta

de dados em tempo real, utilizando *softwares* bem documentados e *open source*, representa uma contribuição relevante para a formulação de um sistema supervisorio prático e de baixo custo.

2.4.3 Interpolação Polinomial de Newton (RISDIYANTO et al., 2023)

O artigo de Risdiyanto et al. (2023) apresentou como objetivo principal construir uma alternativa de baixo custo para substituir os piranômetros em sistemas FV. A técnica de estimacão de irradiância proposta no estudo é baseada na leitura da potência gerada pela célula FV e sua temperatura. Essa técnica consiste na aplicacão do Método de Interpolação Polinomial de Newton (IPN) para estimar a irradiância, a partir da entrada não linear de potência, com a temperatura atuando como um fator de correção. O método inclui uma fase de calibração em ambiente de simulacão, visando determinar a equacão IPN que caracteriza a célula e lineariza a irradiância.

O medidor proposto no artigo utiliza uma carga resistiva para extrair a tensão e a corrente da célula, permitindo o cálculo da potência. Além disso, são empregados um sensor de temperatura e uma placa de desenvolvimento Arduino Uno, que aplica a fórmula IPN para estimar a irradiância. Em suma, são utilizados três sensores (I , V e T) e um microcontrolador como *hardware* para a estimacão. A precisão do protótipo apresentado por Risdiyanto et al. (2023) foi validada ao comparar seus resultados com medições feitas por um piranômetro, onde o estimador apresentou MAPE de 2,72% ao longo de um dia, com um erro máximo de 4,65% entre 13:00 e 15:00.

Essa soluçao possui vantagens, como o baixo custo de *hardware* e a baixa necessidade de processamento computacional. Apesar do desempenho apresentado ser satisfatório, os resultados são baseados em um único dia de dados. Portanto, seria interessante apresentar uma variedade de testes para fortalecer a validacão do estimador em diferentes condições ambientais.

2.4.4 Rede Neural (CHOUAY; OUASSAID, 2024)

O artigo de Chouay e Ouassaid (2024) propoe um estimador de condições climáticas desenvolvido para sistemas FV, baseado em rede neural (*Neural Network* - NN) e *hardware* com microcontrolador. O diferencial dessa pesquisa é que, além da estimacão de irradiância, também é estimada a temperatura de operacão. Na arquitetura da NN, as medições de corrente de curto-circuito (I_{sc}) e tensão de circuito aberto (V_{oc}) do módulo FV são utilizados como entradas, enquanto a irradiância (G) e a temperatura (T) são as saídas previstas. Essa escolha é fundamentada na forte dependência da I_{sc} em relacão à G e da V_{oc} com T .

No treinamento da NN, os autores do trabalho optaram por uma abordagem em duas etapas, incorporando tanto simulacões quanto medições reais. Na primeira etapa, o sistema fotovoltaico foi simulado utilizando o modelo de diodo único sob diferentes condições

climáticas. Na segunda, os dados de entrada e saída foram coletados em condições climáticas reais, diretamente na unidade FV, com o uso de um piranômetro para medir a irradiância e um sensor LM35 para registrar a temperatura de operação. Assim, foi gerado um conjunto de dados abrangente, com cenários variados que apresentam comportamentos ambientais reais.

Para a formulação do protótipo, o artigo resolveu a limitação de que um módulo não pode operar simultaneamente nas condições de circuito aberto e fechado. Para isso, foi inserido um chaveamento físico para alternar entre as condições de I_{sc} e V_{oc} . Dessa forma, os sensores de corrente e tensão enviam seus dados para o microcontrolador, onde o algoritmo de estimação foi implementado. O microcontrolador utilizado foi o LAUNCHXL-F28379D C2000, da Texas Instruments.

Na validação do estimador proposto, o artigo apresentou dois testes experimentais, nos quais o piranômetro foi utilizado como referência. O primeiro teste foi realizado em um dia de céu limpo, das 14h às 18:30, obtendo MAPE de 0,84% e nRMSE de 0,93% para a irradiância. O segundo teste foi conduzido em um dia parcialmente nublado, com rápidas mudanças de sombreamento, no mesmo horário do primeiro, apresentando MAPE de 1,55% e nRMSE de 1,51% para a irradiância. Assim, os valores gerais de MAPE e NRMSE obtidos para a irradiância foram, respectivamente, 1,19% e 1,22%.

As seguintes considerações podem ser extraídas do artigo: embora o estimador não dependa da medição de temperatura e ainda seja capaz de estimá-la, essa característica, apesar de interessante, não representa uma necessidade real. Isso se deve ao fato de que, diferentemente dos piranômetros, cujo custo elevado é o principal argumento contra seu uso, sensores de temperatura, como o LM35, são acessíveis, custando cerca de US\$ 3.

Além disso, as redes neurais se mostram como uma abordagem eficaz para contextos de sensoriamento virtual, o que é evidenciado pela performance do modelo. No entanto, essa complexidade pode exigir maior poder computacional do *hardware*, um recurso restrito em microcontroladores. Essa limitação pode ter refletido na escolha de um microcontrolador mais caro (~US\$ 50) no artigo, que custa cerca de 5 vezes mais que uma ESP32 (~US\$ 8-10), escolhida para a pesquisa desenvolvida neste TCC. Os valores foram consultados no site da *Mouser Electronics (US)* em novembro de 2024.

Por fim, apesar das considerações anteriores, a maior crítica ao artigo refere-se às medições de I_{sc} e V_{oc} . Isso ocorre porque, em um sistema fotovoltaico real, alternar o ponto de operação do módulo entre circuito aberto e curto-circuito resulta na desconexão com o inversor, ocasionando perdas na produção de energia elétrica.

2.4.5 Estimador de Irradiância Proposto por (BARBOSA et al., 2024)

Por fim, o trabalho de Barbosa et al. (2024), desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco por professores do Departamento de Engenharia Elétrica, propôs um estimador de irradiância baseado nas medições de I , V e T do módulo FV. Além de apresentar

a técnica de estimação, o estudo também desenvolveu um protótipo, implementando o algoritmo em um microcontrolador equipado com módulo Wi-Fi para aplicações IoT.

Nesse trabalho, os autores afirmam que um módulo FV, submetido a uma irradiância G e uma temperatura T , possui uma curva característica $I - V$ única. Logo, a partir de valores de I e V medidos simultaneamente, juntamente com a medição de T , é possível estimar a irradiância instantânea do módulo.

A partir desse princípio, foi desenvolvido um algoritmo de estimação baseado na construção de uma tabela 3-D de soluções. Essa tabela relaciona diversas condições ambientais (G, T) com as respectivas características elétricas do módulo (I, V). Na pesquisa em questão, a relação entre esses parâmetros foi obtida através do MGNL proposto por Silva et al. (2017). Após a confecção da tabela, o algoritmo consiste em dois passos principais: capturar as grandezas instantâneas de I, V, T e, através de uma abordagem de consulta (*Lookup Table* - LUT) na tabela 3-D de soluções, estimar o valor da irradiância.

Para a implementação do *hardware* proposto, o artigo definiu primeiramente o sensoramento das entradas I, V e T . Nas medições de I e V , foram utilizados amplificadores operacionais para condicionar os sinais para o pino de conversão analógico-digital (*Analog-to-Digital Converter* - ADC) do microcontrolador. No caso da corrente, foi empregado um resistor *shunt* conectado em série com o módulo, permitindo a medição de I através da tensão no resistor. Para a medição de temperatura, optou-se por um sensor LM35, devido à sua fácil interface com o ADC do microcontrolador e ao seu baixo custo. Por fim, o microcontrolador escolhido foi o ESP8266, principalmente em razão do módulo Wi-Fi, especificações de processamento e memória, tamanho compacto e preço acessível.

Para validar o estimador de irradiância proposto, o artigo realizou uma comparação entre o protótipo desenvolvido e o piranômetro incluído no dispositivo comercial *PVA-1000S PV Analyzer Kit* da Solmetric. Neste experimento, o módulo FV YL265C-30b foi conectado a uma carga resistiva, mantida constante no decorrer do experimento. As medições foram realizadas por quase três horas, das 12:09 às 15:07, obtendo-se um MAPE de 3,53%.

Nesse ponto, algumas conclusões e críticas podem ser levantadas acerca do artigo. Em relação ao *hardware* do projeto, foram selecionados componentes amplamente utilizados e de baixo custo, como o ESP8266 e o LM35. Além disso, o sistema dispõe de comunicação Wi-Fi, o que elimina a dependência de cabos de comunicação, viabilizando aplicações em IoT, como a criação de *dashboards* de monitoramento complexas onde são obtidas informações individuais dos módulos.

Contudo, os resultados foram avaliados por apenas três horas, diferentemente de outros trabalhos recentes, como em (ALARCON-MAZA et al., 2023; RISDIYANTO et al., 2023), onde a tendência foi realizar testes durante um dia completo. Isso não apenas estabelece a mesma métrica de comparação entre artigos, quanto submete o estimador à maior gama de variações climáticas que ocorrem no ciclo de um dia.

2.4.6 Comparativo entre Métodos

Um dos principais efeitos a ser monitorado em sistemas FV é o sombreamento parcial e seu impacto na produção de energia. Especialmente em plantas de grande escala, esse efeito gera uma distribuição não uniforme de G sobre os módulos, dificultando a identificação dos pontos de máxima potência globais (GMPP) por meio de técnicas clássicas, como Perturba e Observa e Condutância Incremental (BARBOSA et al., 2024).

Ao integrar estimadores de irradiância em vários locais da planta FV, é possível obter informações detalhadas de G para todos os módulos, permitindo uma identificação mais rápida e precisa de potenciais problemas, como sombreamento parcial ou ineficiências operacionais. Além disso, outras condições críticas, como envelhecimento desigual entre módulos ou acúmulo de sujeira, podem ser analisadas de forma segmentada. Dessa forma, com a possibilidade de detecção de falhas e geração de alertas, protege-se a eficiência da produção de energia do sistema (BARBOSA, 2023).

Além do monitoramento, há também a parte responsiva do supervisor do sistema. Especialmente em relação ao algoritmo do inversor FV, possuir múltiplos pontos de medição de G não apenas acelera a detecção do GMPP, quanto facilita a integração entre algoritmos de operação e de manutenção. Assim, é possível obter um sistema mais eficiente, com estratégias individualizadas (BARBOSA et al., 2024).

Visando atender os requisitos de um sistema supervisor eficiente em sistemas FV, o estimador de irradiância utilizado deve ser, prioritariamente, de baixo custo e alta precisão. Essas características são essenciais para viabilizar a utilização de múltiplos estimadores em um *array* de módulos e para assegurar a confiabilidade das informações. Além disso, outros fatores secundários devem ser avaliados no algoritmo de estimação, como o esforço computacional e as medições necessárias. O esforço computacional influencia diretamente o tempo de resposta e o custo do produto, visto que um *hardware* mais robusto demanda um maior investimento. Quanto aos sensores utilizados, as preocupações principais são evitar medições que comprometam a produção de energia ou depender de periféricos custosos.

A partir da avaliação individual dos métodos, torna-se necessário estabelecer um comparativo entre eles para determinar o estimador mais eficiente e adequado para a supervisão de sistemas FV. Para isso, foi elaborada a Tabela 1, onde são apresentadas as principais informações dos estimadores de irradiância discutidos nesta seção, permitindo a comparação dos métodos nos parâmetros estabelecidos.

Para complementar a análise, foi montada a Tabela 2, que apresenta uma comparação dos preços dos microcontroladores utilizados nas pesquisas analisadas anteriormente. Os valores foram extraídos dos sites da *Mouser Electronics (US)*, da *Amazon (US)* e da *DigiKey (US)* em novembro de 2024, sendo esses domínios adequados para a aquisição de dispositivos eletrônicos.

Ao avaliar os parâmetros principais apresentados na Tabela 1, nota-se que o melhor

Tabela 1 – Comparação entre métodos de estimação de irradiância apresentados no Capítulo 2.

Referência	Algoritmo de Estimação	Microcontrolador	Sensores	MAPE (%)	nRMSE (%)
(CARRASCO; MANCILLA-DAVID; ORTEGA, 2014)	Regressão não linear	Arduino Uno	V e T	—	3,76%
(ALARCON-MAZA et al., 2023)	Regressão Linear	STM32F1	I_{sc}	6,97%	—
(RISDIYANTO et al., 2023)	Interpolação Polinomial de Newton	Arduino Uno	V , I e T	2,72%	—
(CHOUAY; OUASSAID, 2024)	Rede Neural	C2000 F28379D	I_{sc} e V_{oc}	1,19%	1,22%
(BARBOSA et al., 2024)	Tabela 3-D de Soluções (MGNL)	ESP8266	V , I e T	3,53%	—

Fonte: (Próprio autor, 2024).

Tabela 2 – Comparação de microcontroladores e seus preços médios (Novembro, 2024).

Microcontrolador	Preço Médio (US\$)
LAUNCHXL-F28379D (C2000)	US\$ 47 - 52
Arduino Uno	US\$ 20 - 30
ESP32	US\$ 8 - 10
ESP8266	US\$ 8
STM32F103C8T6	US\$ 4 - 9

Fonte: (Próprio autor, 2024).

desempenho na estimação foi obtido por Chouay e Ouassaid (2024). Contudo, essa abordagem depende das medições de I_{sc} e V_{oc} , e para obter essas informações, é necessário um circuito de chaveamento que força o módulo a operar, metade do tempo, em curto-circuito (onde a tensão no módulo é nula) e, na outra metade, em circuito aberto (onde a corrente é nula). Dessa forma, não há geração de potência, impedindo que o módulo contribua para a produção de energia. Além disso, essa técnica é a única entre as avaliadas que exige um alto esforço computacional, o que implica na necessidade de um *hardware* significativamente mais caro, podendo custar até dez vezes mais que as alternativas analisadas.

Em um segundo nível de performance estão os trabalhos de Carrasco, Mancilla-David e Ortega (2014), Risdiyanto et al. (2023) e Barbosa et al. (2024), os 3 métodos vão utilizar medições instantâneas, sem gerar perdas na produção de energia. O maior diferencial entre eles reside no microcontrolador empregado, o Arduino Uno, utilizado por Carrasco, Mancilla-David e Ortega (2014) e por Risdiyanto et al. (2023), custa pelo menos duas vezes mais que o ESP8266, adotado por Barbosa et al. (2024). Apesar da diferença de preço parecer pequena, deve-se considerar que esse fator será multiplicado pela quantidade de medições na planta FV, tornando-o ainda mais significativo. Além disso, dos três métodos, apenas o artigo de Barbosa et al. (2024) aborda a viabilidade da comunicação IoT, eliminando a necessidade de cabos para transmitir os dados a um dispositivo central.

Por fim, o estimador proposto por Alarcon-Maza et al. (2023), apesar de implementar a comunicação IoT no dispositivo, não se destaca em nenhum outro critério, apresentando a menor precisão e um sensoriamento ineficiente, baseado em I_{sc} .

2.5 SISTEMAS SUPERVISÓRIOS

Sistemas supervisórios são plataformas de *software* projetadas para realizar a aquisição e o armazenamento dos dados provenientes de um processo qualquer, viabilizando a supervisão em tempo real e um controle eficiente. Devido a essa característica, esses sistemas podem ser denominados como Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados, ou simplesmente como sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) (ZANGHI, 2019). Em aplicações embarcadas, como os estimadores de irradiância apresentados anteriormente, a visualização dos dados permite monitorar o desempenho do sistema e assegurar sua operação adequada, tornando fundamental a integração do dispositivo com um sistema supervisório adequado.

2.5.1 Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA)

Os sistemas SCADA fornecem informações confiáveis em tempo real sobre o estado do sistema monitorado e são capazes de emitir alertas imediatos. Essas funcionalidades são possíveis por meio de tecnologias avançadas de comunicação e sensores modernos, aumentando a eficiência dos processos e aprimorando o nível de proteção dos equipamentos envolvidos (YADAV; PAUL, 2021).

2.5.1.1 Vantagens da Aplicação de Sistemas SCADA

A ampla aplicação de sistemas supervisórios está diretamente relacionada às diversas funcionalidades que esses sistemas oferecem. A seguir, são destacadas algumas de suas vantagens (ANDERSON, 2021):

- **Análise de tendências:** A partir dos dados coletados, é possível identificar padrões e comportamentos nas variáveis de interesse. Essa análise possibilita a tomada de decisões estratégicas e ações antecipadas, otimizando o desempenho da planta;
- **Alarmes:** Sinaliza falhas no processo em tempo real, permitindo a execução de ações corretivas de forma ágil. Além disso, essas ocorrências podem ser registradas para consultas e análises futuras;
- **Geração de relatórios e gráficos:** A partir das informações armazenadas, é viabilizada a criação de relatórios e gráficos que destacam aspectos relevantes, como eventos de alarme e tendências da planta;
- **Operação remota:** Viabiliza a supervisão e a intervenção nos processos à distância, garantindo maior flexibilidade, eficiência e segurança operacional.

Todas as funcionalidades descritas acima criam um sistema adequado para a tomada de decisões assertivas e para o monitoramento contínuo da planta. Isso contribui diretamente

para evitar interrupções na operação e garantir que os processos sejam realizados com máxima eficiência.

2.5.1.2 Características de *Softwares* SCADA

Os sistemas SCADA operam por meio da integração entre elementos de *hardware* e o *software* supervisor. Enquanto a coleta de dados é realizada por dispositivos de aquisição, o *software* é responsável pelo tratamento, análise e armazenamento dessas informações. Assim, os dados são apresentados ao usuário de maneira amigável e intuitiva, utilizando recursos gráficos avançados, como imagens, gráficos, alertas sonoros, animações, entre outros (ELIPSE SOFTWARE, 2019; ZANGHI, 2019).

Além dessa atenção à apresentação visual ao usuário, os sistemas supervisórios precisam ser altamente customizáveis, uma vez que são empregados em diversos setores e aplicações. Cada aplicação demanda uma configuração diferente, na qual as interfaces são projetadas para atender às particularidades de cada projeto. Essa necessidade levou os fabricantes a desenvolverem soluções flexíveis e adaptáveis, capazes de representar uma ampla gama de processos (ZANGHI, 2019).

As telas para as quais as interfaces são desenvolvidas são comumente referidas como Interfaces Homem-Máquina (IHM). É nesse ambiente que as informações são centralizadas e apresentadas por meio dos recursos gráficos. O principal objetivo das IHMs é tornar a interação entre o operador e o sistema mais eficiente e acessível.

2.6 CONCLUSÕES PARCIAIS

Considerando a análise realizada acerca de estimadores de irradiância, é possível concluir que a técnica que melhor se adequa aos critérios estabelecidos como ideais para um dispositivo estimador de irradiância é a apresentada por Barbosa et al. (2024). Esse estimador apresenta boas características de custo, precisão e eficiência, quando comparado às demais soluções avaliadas. Além de viabilizar a aplicação de diversos dispositivos em diferentes módulos da planta FV, a técnica, ao facilitar a integração IoT entre os estimadores, torna possível a formulação de um sistema supervisor funcional. Adicionalmente, o trabalho de Barbosa et al. (2024) adota uma abordagem para identificar e avaliar as limitações do dispositivo, permitindo identificar pontos de aperfeiçoamento do protótipo, o que contribui para a melhoria de sua eficiência. Esses aprimoramentos são discutidos no Capítulo 3.

3 ESTIMADOR DE IRRADIÂNCIA COM SUPORTE A IOT

A partir da revisão bibliográfica, definiu-se utilizar a técnica de estimação de irradiância proposta por Barbosa et al. (2024) como base para o estimador desenvolvido neste TCC. Após uma análise detalhada do método, apresentada na Seção 3.1, foram identificados os pontos de melhoria do projeto em relação à técnica original, conforme descrito na Seção 3.1.1. Com essas informações, foi possível desenvolver um estimador de irradiância de maior robustez e aplicabilidade, fundamentado na técnica de Barbosa et al. (2024), com melhorias no hardware e implementação de comunicação IoT.

3.1 FUNCIONAMENTO DO ESTIMADOR DE IRRADIÂNCIA PROPOSTO POR (BARBOSA et al., 2024)

Conforme discutido no Capítulo 2, sabe-se que um módulo FV submetido a condições específicas de irradiância (G) e temperatura (T) vai possuir uma curva característica $I - V$ única. Portanto, ao medir os valores instantâneos de I , V e T , é possível estimar a irradiância do módulo nesse instante de tempo. Esse comportamento pode ser interpretado como uma função não linear $\mathbf{f}$, como mostrado a seguir (BARBOSA et al., 2024):

$$G = \mathbf{f}(I, V, T). \quad (3.1)$$

Essa função $\mathbf{f}$ é obtida a partir de um modelo fotovoltaico que descreva com precisão o comportamento de um módulo sujeito a variações de temperatura e irradiância. Felizmente, a relação entre G , I , V e T pode ser obtida diretamente por um MGNL. Para o estimador proposto por Barbosa et al. (2024), por exemplo, o modelo global escolhido foi o de Silva et al. (2017).

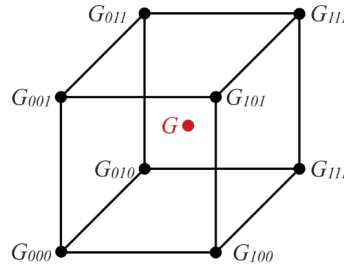
Visto que a curva $I - V$ gerada para cada par de grandezas (G , T) é única, é possível associar um par específico (G , T) a múltiplos pares (I , V) extraídos da curva gerada pelo modelo. Reorganizando a associação em relação a T , é possível correlacionar um único valor de G com diversos trios (I , V , T). Ao repetir esse procedimento múltiplas vezes para diferentes pares (G , T), é possível construir uma tabela 3-D de soluções para $\mathbf{f}$ (Equação 3.1) sem a necessidade de avaliar diretamente a função não linear (BARBOSA et al., 2024).

Com base nessa estratégia, o algoritmo estimador de irradiância proposto por Barbosa et al. (2024) é composto por duas etapas principais. Primeiro, são medidas as grandezas instantâneas de I , V , T . Em seguida, a irradiância é estimada através de um procedimento de *Lookup Table* na tabela 3-D de soluções.

A etapa de estimação consiste em encontrar, na tabela 3-D, os 2 valores mais próximos em torno dos dados medidos de I , V , T , resultando em oito trios (2^3), que correspondem a oito valores de G , interpretados como vértices de um cubo, conforme ilustrado na Figura 6.

Com intuito de melhorar a precisão da estimativa, aplica-se, em seguida, uma interpolação trilinear nesses oito valores de G . O resultado dessa interpolação é o ponto central do cubo (Figura 6), que representa a aproximação do valor da função em um ponto médio (BARBOSA, 2023).

Figura 6 – Interpolação trilinear aplicada para estimar G .



Fonte: Retirado de (BARBOSA et al., 2024).

Ao analisar o algoritmo de estimação, nota-se que a construção da tabela 3-D vai depender das características do módulo FV utilizado, ou seja, diferentes módulos requerem diferentes tabelas de soluções. Porém, como destacado por Barbosa et al. (2024), a etapa de construção da tabela é um procedimento único e não impacta a complexidade do algoritmo. Além disso, o algoritmo consiste em um número reduzido de instruções para o microcontrolador, garantindo uma alta taxa de execução, na ordem de microssegundos.

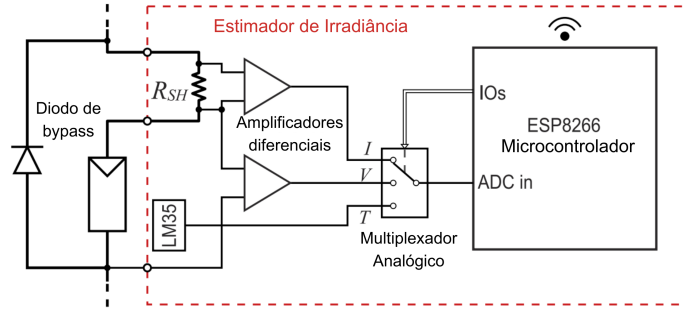
O *hardware* do estimador de irradiância de Barbosa et al. (2024) é composto por sensores de corrente (I), tensão (V) e temperatura (T), juntamente com o microcontrolador, que implementa o algoritmo de estimação. Para realizar as medições I e V , foram projetados circuitos de condicionamento de sinais utilizando amplificadores operacionais, garantindo a adequação dos sinais para o ADC do microcontrolador. No caso da medição de corrente, foi necessário inserir um resistor *shunt* em série com o módulo FV, permitindo que a corrente fosse calculada aplicando a Lei de Ohm, a partir da tensão medida nos terminais do resistor. Finalmente, para a medição da temperatura, foi adotado o sensor LM35, e o microcontrolador selecionado foi o ESP8266.

Contudo, o microcontrolador utilizado apresenta a restrição de possuir apenas uma entrada ADC. Para contornar essa limitação, Barbosa et al. (2024) adotaram um multiplexador analógico, permitindo a leitura sequencial dos sinais de I , V e T . A Figura 7 ilustra as conexões do *hardware* descrito, integrado ao módulo fotovoltaico.

Com o *hardware* definido, algumas preocupações em relação ao método foram levantadas. Barbosa et al. (2024) avaliaram o impacto do tamanho da tabela 3-D no erro de estimativa de G , bem como o efeito do envelhecimento do módulo na precisão do protótipo. Essas análises foram realizadas considerando um módulo fotovoltaico real, o YL285D-30b da Yngli Solar.

Avaliar o tamanho da tabela de soluções é fundamental, pois a memória do microcontrolador impõe limites às suas dimensões. Para investigar esse impacto, a pesquisa contou

Figura 7 – Esquemático do estimador de irradiância e suas conexões com o módulo FV.



Fonte: Retirado de (BARBOSA et al., 2024).

com simulações no *software* MATLAB considerando diferentes conjuntos de dimensões: $(16 \times 16 \times 16)$, $(32 \times 32 \times 32)$, $(64 \times 64 \times 64)$ e uma condição adicional de $(128 \times 64 \times 64)$, permitindo avaliar a influência de um conjunto maior que o suportado pelo ESP8266, cujo limite é $(64 \times 64 \times 64)$.

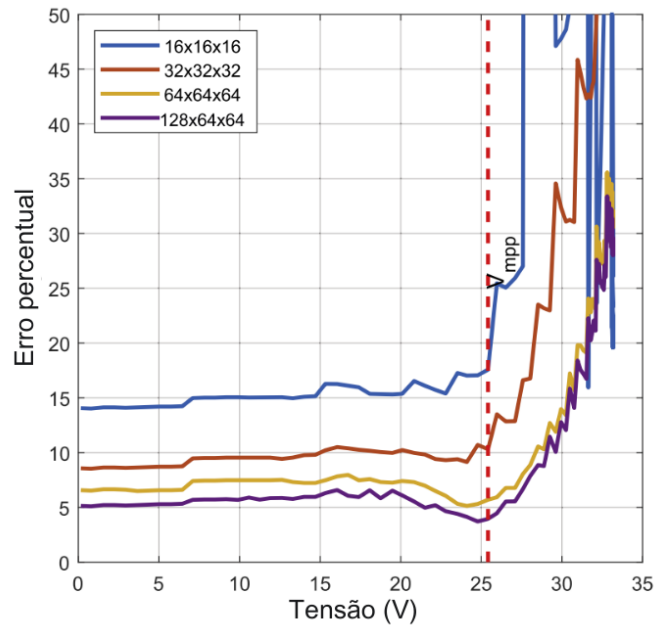
Os resultados indicaram que, quanto menor a tabela, maior o erro em todos os níveis de G . Assim, a configuração de $(64 \times 64 \times 64)$ foi escolhida por apresentar os menores erros e estar dentro dos limites da memória do microcontrolador utilizado. No entanto, caso fossem viáveis dimensões maiores, o erro médio poderia ser ainda mais reduzido, pois, para o conjunto $(64 \times 64 \times 64)$, o erro médio foi de 2,83%, enquanto para o conjunto $(128 \times 64 \times 64)$, o erro médio caiu para 1,81%. A Figura 8 ilustra o impacto do tamanho da tabela de soluções na estimação de irradiância, apresentando o comportamento do erro percentual para uma condição ambiental específica de G e T .

Ao observar a Figura 8, alguns aspectos relevantes podem ser destacados. Independentemente das dimensões da tabela, o erro de estimação mantém-se reduzido até a tensão V_{mpp} . No entanto, à medida que a tensão se aproxima do valor de circuito aberto (V_{oc}), os erros percentuais tornam-se mais acentuados. Para compreender melhor esse comportamento, Barbosa et al. (2024) realizaram uma análise comparativa entre a potência real do módulo fotovoltaico e a potência estimada pelo MGNL. Os resultados dessa comparação são apresentados na Figura 9.

Novamente, observa-se que a estimativa de G mantém elevada precisão até a região do MPP, mas apresenta maiores erros percentuais após o ponto de inflexão da curva P-V. Esse comportamento está relacionado à aplicação da interpolação trilinear em uma região altamente não linear da curva I-V, localizada após o ponto de inflexão. Nessa região, a precisão do método é reduzida devido a essas características não lineares da curva.

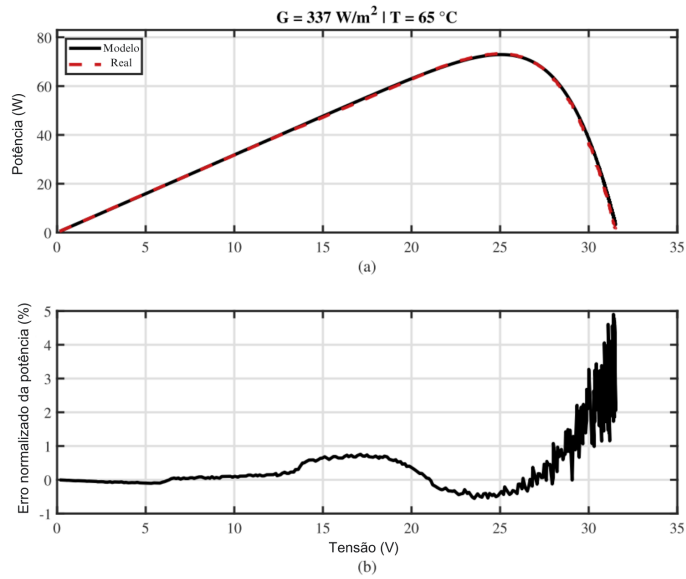
Além disso, os parâmetros do MGNL podem variar à medida que os módulos PV sofrem degradação ao longo do tempo. Por isso, é fundamental avaliar o desempenho da técnica em módulos envelhecidos, uma vez que a tabela 3-D não é auto-adaptável. A partir de pesquisas na literatura, Barbosa et al. (2024) concluíram que o envelhecimento

Figura 8 – Erro percentual da estimacão para diferentes dimensões de tabelas ($G = 605W/m^2$ e $T = 60^\circ C$).



Fonte: Retirado de (BARBOSA et al., 2024).

Figura 9 – Curva P-V real vs Curva P-V do MGNL ($G = 337W/m^2$ e $T = 65^\circ C$).

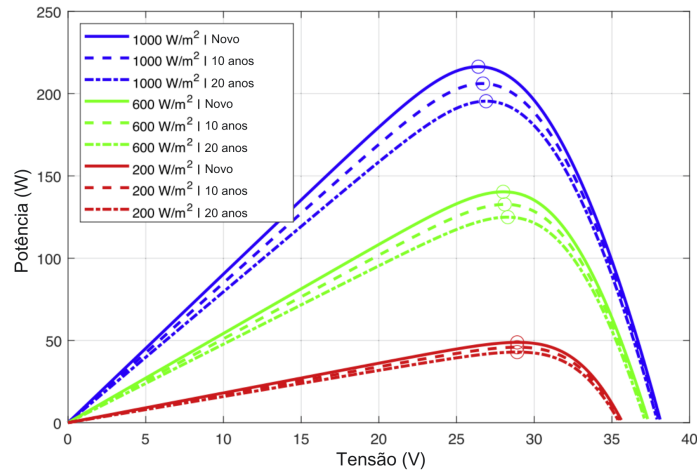


Fonte: Retirado de (BARBOSA et al., 2024).

do módulo tem impacto mínimo na posicão do MPP. A Figura 10 apresenta os resultados das simulaes realizadas, onde, para diferentes irradiâncias, o MPP apresentou desvio irrisório em relao às posices esperadas em módulos não envelhecidos.

Para reforçar essa análise, o artigo apresentou uma simulao comparativa entre um módulo YL285D-30b com 20 anos de uso e um módulo novo de mesmo modelo. A partir de uma tabela 3-D construída sem considerar o envelhecimento do módulo, foi possível obter

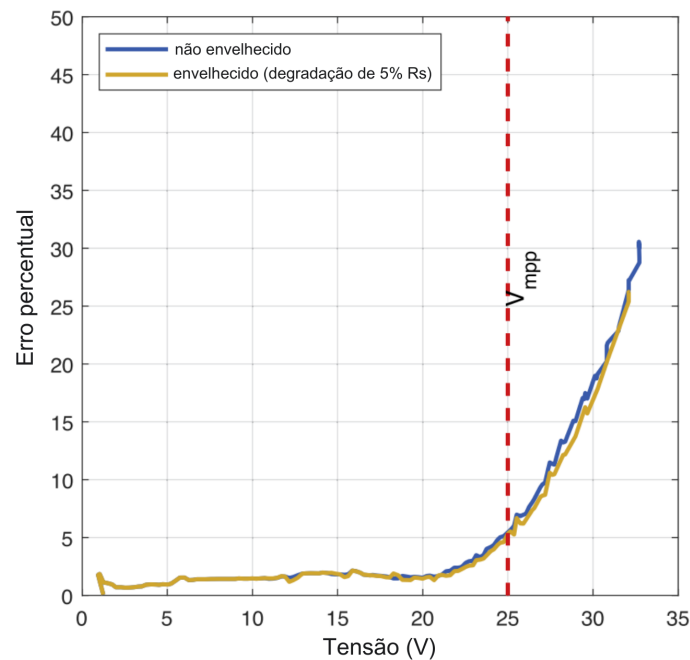
Figura 10 – Impacto do envelhecimento em módulos FV ao longo de 10 e 20 anos de uso.



Fonte: Retirado de (BARBOSA et al., 2024).

o erro na estimativa de G para ambos os módulos, conforme exibido na Figura 11. Ou seja, mesmo com uma tabela desatualizada, as estimativas de irradiância são satisfatórias, com o erro de estimação permanecendo praticamente inalterado.

Figura 11 – Erros percentuais na estimativa de irradiância comparando módulo novo e módulo envelhecido (20 anos).



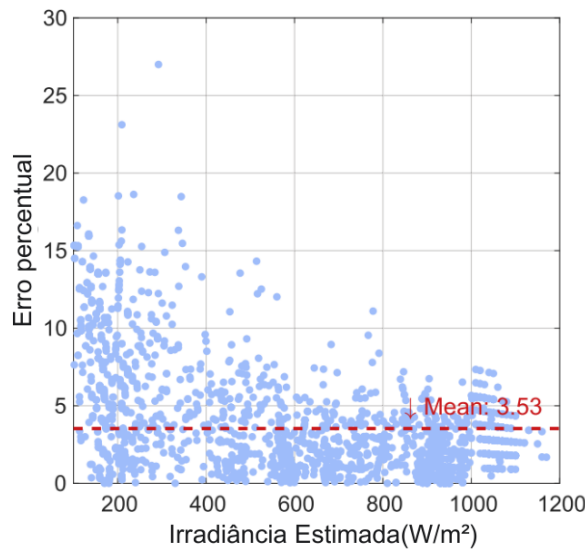
Fonte: Retirado de (BARBOSA et al., 2024).

O teste de validação experimental realizado por Barbosa et al. (2024) comparou o estimador desenvolvido com o piranômetro disponível no dispositivo comercial *PVA-1000S PV Analyzer Kit* da Solmetric. O experimento foi realizado com o módulo FV YL265C-

30b conectado a uma carga resistiva mantida constante ao longo de quase três horas de medição, realizadas das 12:09 às 15:07. O erro médio percentual absoluto obtido foi de 3,53%.

De modo a destrinchar e analisar o MAPE obtido, o erro percentual foi segmentado com base nos níveis de G , conforme exibido na Figura 12. Essa visualização aponta que os erros mais expressivos ocorrem nos menores níveis de G , uma vez que o modelo de um diodo não contempla com precisão o comportamento nessas condições. Isto é, em condições favoráveis à maior produção de energia (maiores irradiâncias), o estimador apresenta um melhor desempenho.

Figura 12 – Erro percentual por irradiância estimada.



Fonte: Retirado de (BARBOSA et al., 2024).

3.1.1 Críticas e Aperfeiçoamentos

Após a análise detalhada da técnica de estimação de irradiância proposta por Barbosa et al. (2024), foram identificadas limitações no protótipo apresentado, bem como possíveis estratégias para seu aprimoramento. Essas estratégias incluem soluções diretas para as limitações observadas e ações para mitigar seus impactos. Essa etapa inicial do planejamento possibilitou a proposição de um estimador de irradiância mais adequado para plantas FV, com maior robustez e desempenho aprimorado. Os principais pontos levantados estão apresentados a seguir:

- **Multiplexador:** No protótipo avaliado, foi necessário o uso de um multiplexador para a aquisição dos sinais dos sensores. Embora essa seja uma solução comum em dispositivos eletrônicos, o multiplexador apresenta desvantagens que podem comprometer a precisão das medições. Além de diminuir a taxa de amostragem disponível

para cada entrada, ele está sujeito a perdas de sincronismo, especialmente em situações de mudanças abruptas em uma das entradas. Além disso, a operação de comutação do multiplexador impacta a eficiência energética do protótipo, aumentando o consumo de energia.

Portanto, visando minimizar possíveis fontes de erro, torna-se fundamental adotar uma solução mais eficiente e precisa, onde as três entradas (I , V e T) são medidas simultaneamente.

- **ADC não linear:** Outra limitação identificada no *hardware* é a entrada ADC do microcontrolador ESP8266. Nesse caso, duas características se destacam, a resolução de 10 bits e a não linearidade do conversor. A resolução do ADC é consideravelmente inferior à de outros dispositivos disponíveis no mercado. Além disso, o fator crítico é não linearidade apresentada principalmente nas extremidades de sua faixa de operação. Essa característica introduz erros nas medições, frequentemente exigindo que programadores desenvolvam correções via *software*.

Especialmente em sistemas que demandam alta confiabilidade e exatidão nas medições, como sistemas fotovoltaicos, torna-se indispensável dispor de um ADC confiável e com alta resolução.

- **Tamanho da Tabela:** O tamanho da tabela 3-D de soluções está diretamente relacionado à capacidade do MGNL em representar, com maior resolução, a variedade de condições ambientais às quais o módulo FV pode ser submetido. Assim, pode-se inferir que o tamanho da tabela 3-D impacta diretamente na precisão da estimativa de irradiância. No trabalho de Barbosa et al. (2024), verificou-se que, para os tamanhos avaliados, tabelas maiores resultam em erros menores. No entanto, a capacidade de armazenamento do ESP8266 limitou o tamanho da tabela utilizada.

Dessa forma, a conclusão óbvia é viabilizar a aplicação de uma tabela maior. Para isso, duas abordagens principais podem ser sugeridas. A primeira consiste em substituir o microcontrolador por um dispositivo de maior memória. Já a segunda é baseada no armazenamento da tabela 3-D de soluções em um dispositivo remoto, exigindo a conexão do microcontrolador com esse sistema de armazenamento. Ambas abordagens tornam viável a utilização de tabelas maiores, melhorando a precisão da estimativa.

- **Imprecisão após o V_{mpp} :** Outra questão associada ao MGNL é a imprecisão na estimativa da potência após o ponto de V_{mpp} . Observa-se que os erros percentuais são mais acentuados na região da curva $I-V$ após o ponto de inflexão. Isso ocorre porque essa região apresenta um comportamento altamente não linear, o que dificulta a precisão da interpolação trilinear aplicada no método.

Uma forma de mitigar esse problema é aumentar a resolução da dimensão correspondente à corrente na tabela 3-D de soluções. Com isso, seria possível capturar melhor as variações sutis da curva nessa região, reduzindo os erros associados à interpolação.

- **Viabilizar comunicação IoT:** Barbosa et al. (2024) discorre sobre as vantagens e benefícios da aplicação IoT, destacando o módulo Wi-Fi do microcontrolador como um dos principais recursos para viabilizar a comunicação entre dispositivos. No entanto, não foi apresentada uma proposta concreta para a implementação dessa conectividade no estimador de irradiância. Sem uma metodologia definida, a funcionalidade IoT e as praticidades de um sistema de supervisão remoto permanecem apenas como um potencial não explorado.

Para garantir a integração eficaz do estimador em um sistema supervisão funcional, é necessário definir um método de comunicação adequado. Preferencialmente, isso deve ser feito por meio de protocolos amplamente utilizados, como MQTT e HTTP, possibilitando a troca de dados entre microcontrolador e servidores, sejam esses locais ou plataformas em nuvem. A adoção de soluções consolidadas garante maior compatibilidade com diferentes dispositivos e *softwares*, tornando o sistema mais flexível e escalável. Dessa forma, a implementação da conectividade IoT fortalece a aplicação do estimador de irradiância em um cenário real.

3.2 ENGENHARIA DE REQUISITOS

A engenharia de requisitos é um processo fundamental no desenvolvimento de sistemas. Ela é responsável por identificar, documentar e gerenciar as necessidades e restrições de um projeto. Seu objetivo é garantir que o sistema projetado atenda às expectativas dos usuários e às especificações técnicas, promovendo um desenvolvimento eficiente e reduzindo riscos relacionados a falhas ou retrabalho (CIRIUS QUALITY, 2023).

No contexto do presente trabalho, a avaliação de engenharia de requisitos tem como foco definir as diretrizes e especificações do estimador de irradiância, garantindo que ele atenda aos objetivos estabelecidos. Nesse sentido, o *hardware* mínimo do sistema proposto deve ser composto por: três sensores (corrente, tensão e temperatura); circuitos de condicionamento de sinais; conversor analógico-digital externo; microcontrolador; e *broker* MQTT.

Quanto à aplicação desses componentes, os sensores deverão ser utilizados para fazer medições simultâneas, o ADC deverá garantir alta precisão na digitalização dos sinais, que por sua vez serão processados pelo microcontrolador e transmitidos via protocolo MQTT. Para viabilizar essa comunicação, um *broker* MQTT é necessário para gerenciar a troca de mensagens entre os dispositivos dentro da mesma rede Wi-Fi.

Além disso, para processar os dados recebidos e calcular a estimativa de irradiância, faz-se necessário desenvolver um *script* preferencialmente em Python, para facilitar melhorias futuras. Esse *script* deverá atuar como *host* da tabela 3-D de soluções e responder com a estimativa correspondente. Para maior eficiência e integração, ele deve ser executado no mesmo dispositivo utilizado como *broker* MQTT.

Assim, com base nas necessidades da aplicação, define-se, nas subseções a seguir, o conjunto de diretrizes que os componentes do estimador de irradiância proposto neste trabalho deverão apresentar.

3.2.1 Sensoriamento dos Sinais

Conforme discutido anteriormente, o sensoriamento dos sinais no estimador de irradiância envolve a medição de três grandezas do módulo FV: corrente, tensão e temperatura. Cada uma dessas grandezas é adquirida por meio de sensores específicos e circuitos de condicionamento de sinais, garantindo compatibilidade com o ADC externo. Para isso, foi definida a utilização do periférico ADS1115, esse ADC com resolução de 16 bits, comunicação I2C e capacidade de conversão de tensões na faixa de $\pm 6,144V$.

A corrente do módulo FV é medida por um resistor *shunt* conectado em série ao circuito. A tensão gerada no resistor *shunt* é então processada por um amplificador operacional (AmpOp) configurado como subtrator, de modo a condicionar o sinal para a entrada do ADC. Considerando a aplicação fotovoltaica, o circuito foi projetado para uma faixa de corrente de $[0, 20]A$, resultando em uma saída condicionada na faixa de $[0, 2]V$.

A medição da tensão do módulo é realizada por um circuito de amplificador operacional do tipo subtrator, cujas entradas estão em paralelo com os terminais do módulo fotovoltaico. O circuito é projetado para medir tensões entre $[0, 60]V$, fornecendo uma saída ajustada para a faixa de $[0, 1]V$.

Por fim, a temperatura do módulo é aferida por um sensor LM35, localizado no dispositivo estimador de irradiância. Esse sensor apresenta um ganho de $10mV/^{\circ}C$, cobrindo uma faixa de medição de $[0, 100]^{\circ}C$. Assim, sua saída fica na faixa de $[0, 1]V$, não havendo a necessidade de um circuito de condicionamento adicional.

Visto que a dinâmica do sistema é lenta e as condições ambientais variam de forma gradual, não há necessidade da inclusão de filtros *anti-aliasing* nos circuitos de condicionamento de sinais. Como a frequência das variações dificilmente irá exceder a taxa de amostragem do sistema, a adição desses filtros resultaria apenas em maior complexidade e custo, sem trazer ganhos práticos significativos.

Da forma descrita, as faixas de tensão de saída dos sensores não aproveitam plenamente a resolução do ADS1115. No entanto, assim como a taxa de amostragem, o intervalo de tensão de entrada do ADC pode ser configurado para melhor se adaptar às características do sinal adquirido. Logo, seguindo esses requisitos, o circuito de sensoriamento garante que

os sinais adquiridos sejam compatíveis com as entradas do ADC do estimador, assegurando medições precisas e confiáveis.

3.2.2 Conversão Analógica-Digital

A conversão dos sinais analógicos dos sensores para o domínio digital é realizada por um ADC externo de 16 bits, assegurando alta precisão na aquisição dos dados. O conversor ADS1115 possui quatro canais, dos quais três são utilizados para a aquisição simultânea das medições do sistema FV. Além disso, o ADC permite ajustes, via código, tanto na taxa de amostragem quanto na faixa de entrada analógica, facilitando sua adaptação às características do sistema. Esse conversor é capaz de capturar até 860 amostras por segundo e pode diminuir sua faixa de entrada até $\pm 0,256V$.

Para garantir que a resolução de 16 bits seja melhor aproveitada dentro dessa aplicação, a faixa de entrada analógica foi configurada para $\pm 2,048V$, de modo a otimizar a resolução do conversor para o sinal medido. Além disso, considerando a dinâmica lenta da planta FV, definiu-se um período de amostragem de $0,5s$, esse tempo é suficiente para representar as variações de irradiância ao longo do tempo sem perda significativa de informações. Esse intervalo também é compatível com a comunicação via MQTT, pois permite que o microcontrolador envie os dados e receba a resposta dentro da latência das mensagens.

3.2.3 Processamento e Gerenciamento de Dados pelo Microcontrolador

O microcontrolador atua como a unidade central de processamento do estimador de irradiância, sendo responsável pela aquisição, conversão e transmissão dos dados obtidos pelos sensores. Para isso, ele deve gerenciar simultaneamente a comunicação com o ADC externo, a conexão com a rede Wi-Fi e a interação com o *broker* MQTT.

O *script* embarcado no microcontrolador deve ser capaz de:

- Estabelecer comunicação com o ADC externo através do protocolo serial I2C, visando a aquisição dos sinais digitais;
- Converter os sinais digitais adquiridos do ADC para valores de tensão;
- Traduzir os valores de tensão para as grandezas físicas correspondentes: corrente (I), tensão (V) e temperatura (T);
- Estabelecer conexão com a rede Wi-Fi, possibilitando a comunicação com o *broker* via protocolo MQTT;
- Conectar-se ao *broker* MQTT localmente, dentro da mesma rede Wi-Fi;
- Publicar os valores de I , V e T no tópico de consulta;

- Assinar o tópico de resposta, monitorando o recebimento da estimacão de irradiância.

Diante dessas condições, foi necessário selecionar o microcontrolador que melhor atende aos requisitos do sistema e as suas funções específicas. Inicialmente, foram consideradas opções de baixo custo e amplamente utilizadas, incluindo os microcontroladores ESP8266 e ESP32 da Espressif, além das placas de desenvolvimento da família Arduino, como o Uno e o Mega. No entanto, essas placas de desenvolvimento não oferecem alguns periféricos e funcionalidades essenciais para aplicações modernas, como um módulo Wi-Fi integrado, recurso essencial para aplicações IoT (ROCHA, 2024).

Dessa forma, a escolha foi restringida aos microcontroladores ESP8266 e ESP32, que apresentam modo Wi-Fi integrado e possuem bibliotecas disponiveis para comunicação I2C e MQTT. A Tabela 3 apresenta uma comparação detalhada entre esses microcontroladores, a qual destaca as características mais relevantes para a aplicação e permite a definição da opção mais adequada ao projeto.

Tabela 3 – Comparação entre as placas de desenvolvimento ESP8266 e ESP32

Característica	ESP32	ESP8266
Núcleo(s)	2	1
Arquitetura	32 bits	32 bits
Clock (Típico)	160 MHz	80 MHz
WiFi	HT40	HT20
RAM	520 Kb	160 Kb
FLASH	16 Mb	16 Mb

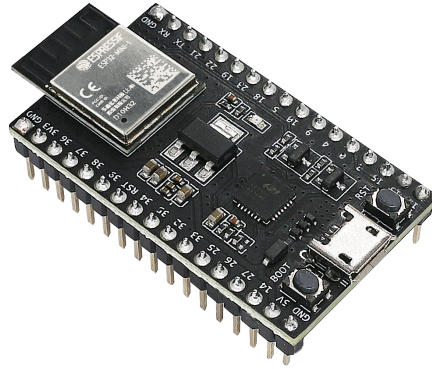
Fonte: Adaptado de (AUFRANC, 2016).

O microcontrolador ESP32 foi desenvolvido pela Espressif como sucessor do ESP8266, trazendo melhorias significativas ao dispositivo. Observando a Tabela 3, destacam-se o núcleo extra de processamento, o maior clock e a memória RAM superior em relação ao ESP8266 (SANTOS, 2021). Esses fatores proporcionam maior poder computacional ao ESP32, facilitando o processamento de múltiplas tarefas pelo microcontrolador, como a aquisição e conversão de dados, a comunicação com o ADC e a transmissão via MQTT, sem comprometer o desempenho do sistema. Além disso, quanto à conectividade, o ESP32 suporta o padrão Wi-Fi HT40, enquanto o ESP8266 opera em HT20 (AUFRANC, 2016). Isso permite ao ESP32 estabelecer uma comunicação sem fio mais eficiente, com maior largura de banda, reduzindo o risco de latência elevada na transmissão dos dados e garantindo uma comunicação mais estável com o *broker* MQTT.

Essas vantagens vêm acompanhadas de um custo maior para o ESP32 em relação ao seu antecessor. No entanto, a diferença de preço entre os dois não é tão significativa atualmente, como indicado anteriormente na Tabela 2. Dessa forma, os benefícios de maior estabilidade, poder computacional e estabilidade na comunicação justificam a escolha do ESP32 para a implementação do estimador de irradiância. A Figura 13 apresenta a

placa de desenvolvimento ESP32-DevKitM-1, selecionada para este trabalho devido à sua compatibilidade com os requisitos do sistema e ao suporte para os periféricos necessários.

Figura 13 – Placa de desenvolvimento ESP32-DevKitM-1, escolhida como central de processamento para o estimador de irradiância proposto.



Fonte: Retirado de (ROCHA, 2024).

3.2.4 Viabilização da Transmissão de Dados via MQTT

Para garantir a comunicação eficiente entre os dispositivos do sistema, utiliza-se o protocolo MQTT, que opera sobre um modelo de publicação e assinatura (*publish/subscribe*). Esse protocolo permite a troca de mensagens de forma leve e eficiente, sendo ideal para aplicações embarcadas com conectividade Wi-Fi.

O *broker* MQTT é o responsável pelo gerenciamento dessas mensagens, recebendo publicações de dispositivos e encaminhando-as para os respectivos assinantes. No contexto deste trabalho, o *broker* centraliza a comunicação entre o microcontrolador e o *script* em Python, *host* da tabela 3-D de soluções. A troca de mensagens segue o seguinte fluxo:

- O microcontrolador publica os valores de corrente (I), tensão (V) e temperatura (T) em um tópico específico;
- O servidor MQTT recebe essa publicação e a encaminha ao(s) assinante(s) do tópico;
- Um *script* em Python processa os dados, realiza a estimacão de irradiância e publica a resposta em outro tópico;
- O servidor MQTT recebe essa publicação e disponibiliza a estimacão de irradiância ao(s) assinante(s) do tópico.

A utilização do protocolo MQTT garante uma comunicação flexível e escalável, permitindo que o sistema seja facilmente adaptado a diferentes configurações de rede, arquiteturas e sistemas supervisórios. Contudo, para viabilizar essa comunicação, é necessário

definir um *broker* MQTT, podendo ser implementado localmente ou hospedado em servidores na nuvem. Mantendo a proposta de um sistema de baixo custo e flexível, optou-se por utilizar o *software* Mosquitto Broker, uma solução *open-source* compatível com diversos dispositivos e que possibilita a configuração do *broker* diretamente na rede local.

Além disso, as mensagens enviadas pelo protocolo MQTT são associadas a um nível de qualidade de serviço (*Quality of Service* - QoS), que define a garantia de entrega das mensagens entre o remetente e o destinatário. O MQTT possui três níveis de QoS:

- **QoS 0:** A mensagem é enviada apenas uma vez, sem confirmação de recebimento. Se houver perda no caminho, a mensagem não será retransmitida.
- **QoS 1:** A mensagem é enviada pelo menos uma vez e o remetente aguarda uma confirmação. Se a confirmação não for recebida, a mensagem é reenviada, podendo gerar duplicações.
- **QoS 2:** Garante que a mensagem seja entregue e processada exatamente uma vez, usando um protocolo mais complexo de confirmação em duas etapas.

Nesse caso, como o fluxo de mensagens é constante e pequenas perdas não comprometem o monitoramento geral do sistema, optou-se pelo nível QoS 0, garantindo menor latência e menor consumo de recursos na comunicação.

3.2.5 Realização da Estimação de Irradiância

O processo de estimacão de irradiância é realizado por meio de um *script* em Python executado na mesma máquina que hospeda o *broker* MQTT. Esse *script* tem como função principal processar os dados enviados pelo microcontrolador e calcular a irradiância estimada utilizando a tabela 3-D de soluções.

Para fechar o processo de estimacão de irradiância, o *script* em Python deve ser capaz de:

- Hospedar a tabela 3-D de soluções do MGNL;
- Estabelecer comunicacão com o *broker* MQTT;
- Assinar o tópic de consulta para monitorar as mensagens enviadas pelo microcontrolador;
- Utilizar os valores de I , V e T publicados pelo microcontrolador para aplicar o algoritmo de estimacão com a *Lookup Table* e interpolacão trilinear, a fim de estimar a irradiância;
- Publicar o valor estimado de irradiância no tópic de resposta.

Essa separação no processamento dos dados, entre microcontrolador e *script* em Python, viabiliza o uso de uma tabela 3-D de soluções que excede a capacidade de armazenamento do microcontrolador, possibilitando melhores resultados na estimação e estudos mais aprofundados sobre o tema.

Além disso, para avaliar o desempenho da estimação, foi necessário definir uma métrica quantitativa. Para isso, calculou-se a média dos MAPEs dos estimadores de irradiância avaliados, com exceção do protótipo proposto por Carrasco, Mancilla-David e Ortega (2014), que não apresentou resultados em longos períodos de tempo. O valor médio obtido foi de 3,60%, servindo como referência para o desempenho do sistema proposto. Dessa forma, estabelece-se que o estimador desenvolvido deve apresentar um MAPE inferior a 3,60%, garantindo uma precisão comparável ou superior ao estado da arte.

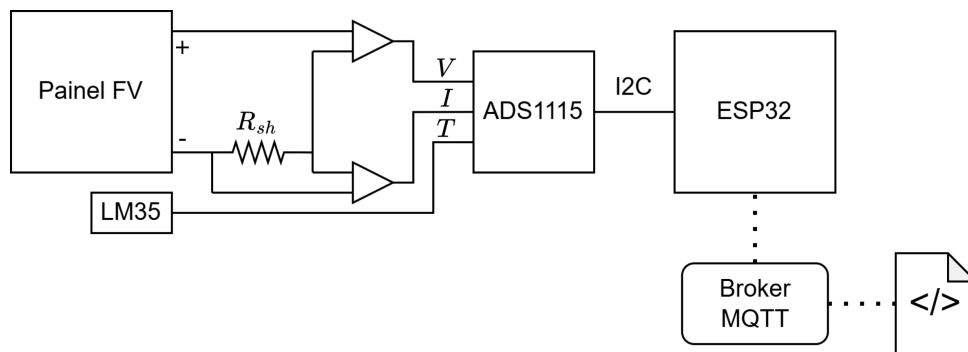
3.3 PROJETO DO SISTEMA EMBARCADO

3.3.1 Diagrama Eletrônico Proposto para Estimador de Irradiância

O estimador de irradiância desenvolvido neste trabalho baseia-se na medição das grandezas elétricas do módulo fotovoltaico, especificamente corrente, tensão e temperatura. Os sinais analógicos provenientes dos sensores passam por circuitos de condicionamento antes de serem adquiridos por um conversor analógico-digital (ADC) externo, o ADS1115, configurado com uma faixa de entrada de $\pm 2,048V$ e resolução de 16 bits.

O microcontrolador ESP32 realiza a leitura dos valores convertidos, processa os dados para obter as grandezas elétricas correspondentes e os envia para um broker MQTT. O broker, por sua vez, encaminha os dados para um script Python, responsável por aplicar o algoritmo de estimação e calcular a irradiância. O resultado estimado é então retornado ao broker, permitindo sua posterior utilização ou análise.

Figura 14 – Diagrama eletrônico proposto para estimador de irradiância com comunicação IoT através do protocolo MQTT.



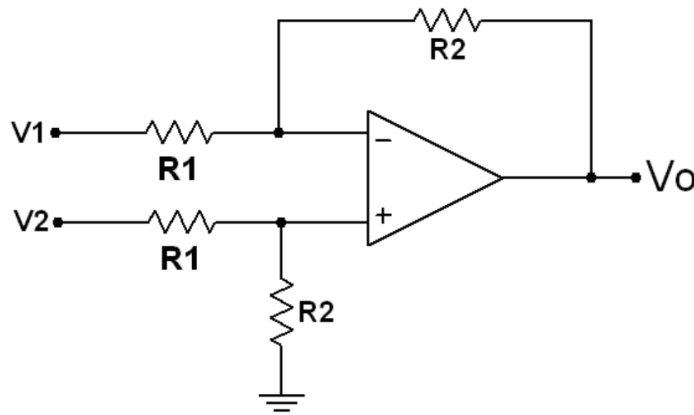
Fonte: (Próprio autor, 2025).

3.3.2 Projeto dos Circuitos de Condicionamento

Conforme especificado na engenharia de requisitos, o estimador de irradiância necessita de três sensores para medir tensão, corrente e temperatura. Desses, dois necessitam de circuitos de condicionamento para ajustar os sinais às faixas definidas: a tensão deve ser convertida de $[0, 60]V$ para $[0, 1]V$, e a corrente de $[0, 20]A$ para $[0, 2]V$. Para isso, é necessário utilizar amplificadores operacionais para alcançar aos níveis de tensão desejados.

Neste trabalho, os dois circuitos de condicionamento de sinais tem como objetivo medir a diferença de tensão entre dois terminais. Dessa forma, os AmpOps podem ser utilizadas na configuração subtrator em ambos os casos, conforme ilustrado na Figura 15. Essa configuração permite obter uma tensão de saída proporcional à diferença entre os sinais de entrada, conforme um fator de ganho (WENDLING, 2010).

Figura 15 – Amplificador operacional na configuração subtrator.



Fonte: Retirado de (WENDLING, 2010).

Assim, para o circuito apresentado na Figura 15 a equação que define a tensão de saída V_0 é dada por:

$$V_0 = \frac{R_2}{R_1}(V_2 - V_1). \quad (3.2)$$

Dessa forma, o dimensionamento dos resistores R_1 e R_2 deve considerar valores entre $1k\Omega$ e $1M\Omega$, levando em conta as limitações de potência do amplificador. Além disso, os valores devem ser escolhidos entre aqueles comercialmente disponíveis, de modo a evitar associações desnecessárias entre resistores e simplificar a aquisição dos componentes.

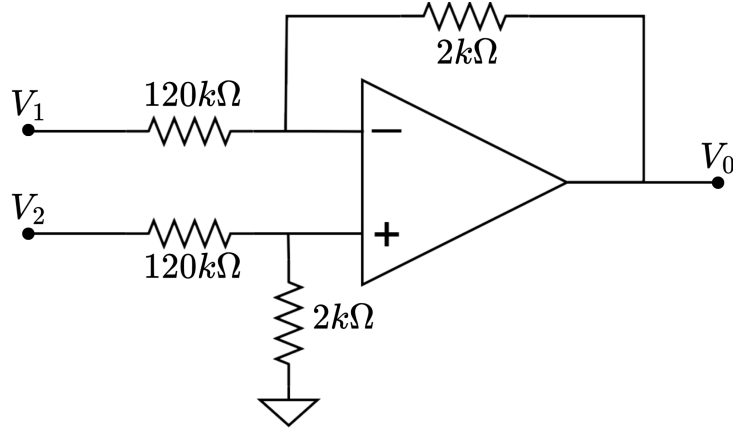
Para as condições especificadas, o ganho do circuito de condicionamento de V é definido como:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{1}{60}. \quad (3.3)$$

Seguindo as recomendações do dimensionamento de resistores, foram definidos $R_2 = 2k\Omega$ e $R_1 = 120k\Omega$. Com essa configuração, a tensão do módulo FV, variando na faixa

de $[0, 60]V$, é convertida para um sinal na faixa de $[0, 1]V$. A Figura 16 apresenta o esquemático do circuito de condicionamento de tensão do módulo FV.

Figura 16 – Circuito de condicionamento de sinais da tensão V do módulo FV.



Fonte: (Próprio autor, 2025).

Para a medição de corrente do módulo FV, adota-se o mesmo princípio, porém considerando a inclusão de um resistor *shunt* em série com o circuito. Esse componente permite a determinação da corrente a partir da diferença de potencial entre seus terminais. Como a resistência R_{sh} é inserida entre os terminais V_1 e V_2 do AmpOp, a aplicação da Lei de Ohm à Equação 3.2 permite determinar a relação entre a corrente do módulo FV e a tensão de saída V_0 , dada por:

$$V_0 = \frac{R_2}{R_1} R_{sh} \cdot I_{\text{módulo}}. \quad (3.4)$$

Dessa forma, o ganho projetado para o circuito é descrito como:

$$\frac{R_2}{R_1} \cdot R_{sh} = \frac{1}{10}. \quad (3.5)$$

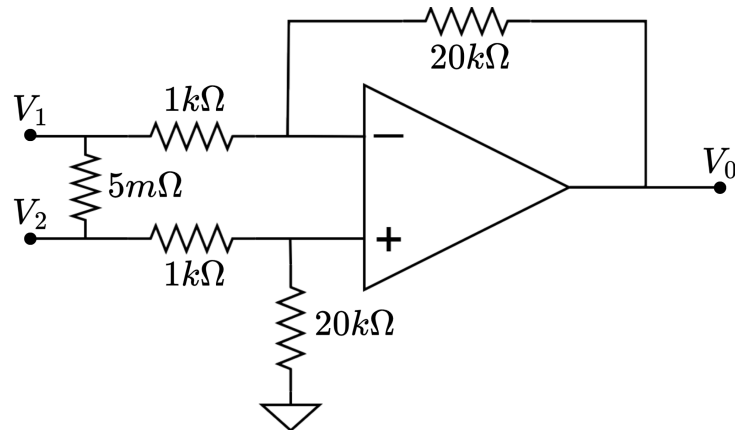
Além dos critérios de dimensionamento dos resistores do AmpOp, a escolha da resistência *shunt* deve considerar valores suficientemente baixos para que a queda de tensão causada por ela seja insignificante. Assim, com base nesses critérios, foram definidos $R_2 = 20k\Omega$, $R_1 = 1k\Omega$ e $R_{sh} = 5m\Omega$. A Figura 17 apresenta o esquemático do circuito de condicionamento de corrente do módulo FV.

3.3.3 Descrição do *Firmware* (Fluxograma)

O funcionamento do estimador de irradiância inicia-se com a fase de inicialização, na qual o *broker* MQTT é ativado. Em seguida, tanto o microcontrolador ESP32 quanto o *script* em Python estabelecem conexão com o *broker*, permitindo a comunicação entre esses dispositivos.

Após essa etapa, o sistema entra no ciclo de estimativa, que se repete com uma frequência de amostragem de 2 Hz e abrange as seguintes etapas:

Figura 17 – Circuito de condicionamento de sinais da corrente I do módulo FV.

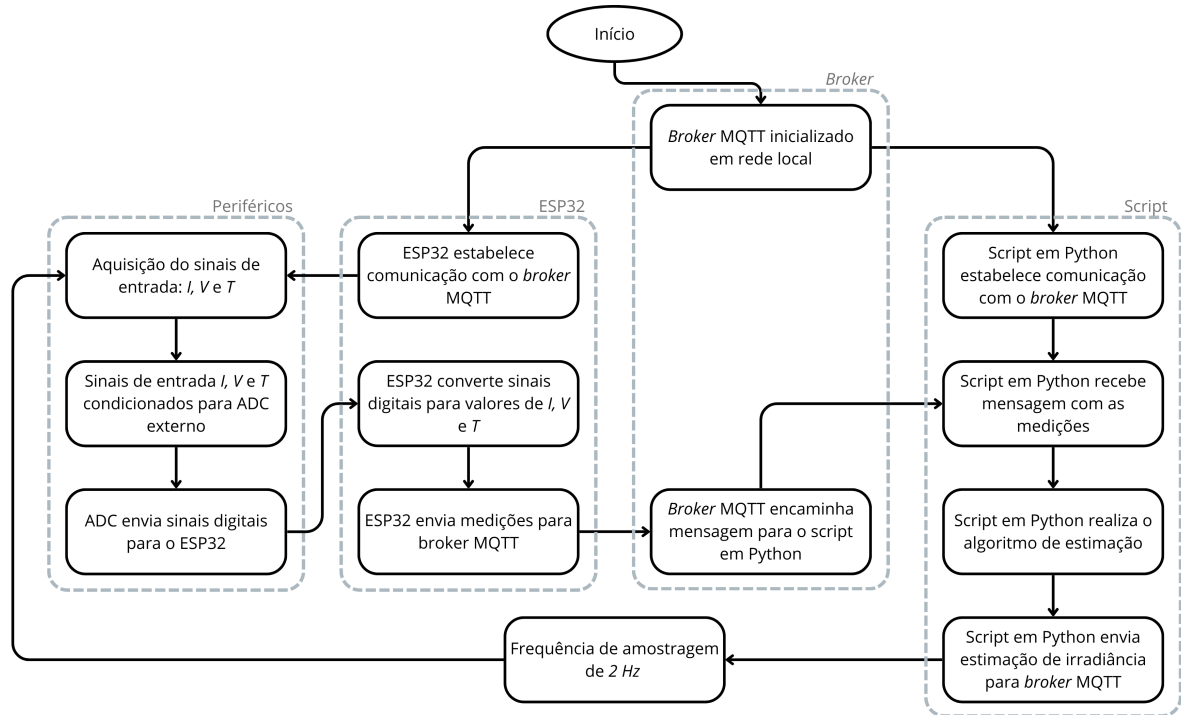


Fonte: (Próprio autor, 2025).

1. **Aquisição dos sinais de entrada:** as grandezas de corrente (I), tensão (V) e temperatura (T) são medidas pelos sensores;
2. **Condicionamento dos sinais:** os sinais analógicos de I , V e T são ajustados para os níveis de tensão projetados;
3. **Conversão analógica-digital:** o ADC externo, converte os sinais analógicos para valores digitais e os transmite ao microcontrolador por meio do protocolo I2C;
4. **Processamento no ESP32:** o ESP32 recebe os valores digitais e os converte para as respectivas grandezas de I , V e T ;
5. **Envio das medições ao *broker*:** o ESP32 publica os valores medidos no *broker* MQTT;
6. **Encaminhamento da mensagem:** o *broker* MQTT repassa os dados ao *script* em Python;
7. **Estimativa de irradiância:** o *script* em Python processa as medições recebidas e executa o algoritmo de estimação de irradiância;
8. **Publicação do resultado:** o *script* em Python envia a estimativa de irradiância ao *broker* MQTT, completando o ciclo.

Esse processo é repetido continuamente conforme a frequência de amostragem definida, garantindo a atualização periódica da estimativa de irradiância. A Figura 18 apresenta o fluxograma simplificado do estimador de irradiância descrito.

Figura 18 – Fluxograma simplificado do estimador de irradiância com comunicação MQTT.



Fonte: (Próprio autor, 2025).

3.4 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO

O algoritmo do sistema estimador de irradiância proposto neste trabalho é composto por dois processos principais: um executado no microcontrolador ESP32 e outro realizado por um *script* em Python. Ambos operam de forma coordenada para realizar a estimação de irradiância, sendo essencial a comunicação entre eles. Para isso, o *broker* MQTT estabelece e gerencia a troca de informações entre o microcontrolador e o *script*, garantindo que cada um execute sua função de maneira sincronizada.

3.4.1 Broker MQTT

O primeiro requisito para o funcionamento do sistema é a inicialização do *broker* MQTT. Conforme estabelecido na engenharia de requisitos, optou-se pelo uso do *software open-source* Mosquitto Broker. Assim, para a execução do *broker*, é necessário acessar o diretório de instalação do *software* e executar o seguinte comando no terminal:

```
net start mosquitto
```

Por padrão, o *broker* é iniciado no *localhost*, que corresponde ao endereço de rede 127.0.0.1. Esse endereço é utilizado para referenciar a própria máquina local, permitindo que programas em execução no mesmo dispositivo se comuniquem entre si sem a

necessidade de uma conexão externa. No entanto, para permitir conexões externas, é necessário modificar sua configuração. Isso pode ser feito editando o arquivo de configuração do Mosquitto e adicionando as seguintes diretivas:

```
listener 1883
allow_anonymous true
```

A diretiva `listener 1883` define que o *broker* aceitará conexões na porta 1883, enquanto `allow_anonymous true` permite que dispositivos externos se conectem sem a necessidade de autenticação. Essa configuração é útil para ambientes de teste e desenvolvimento, mas pode exigir ajustes para garantir segurança em aplicações reais.

Após essas definições, o *broker* foi devidamente configurado, permitindo tanto a comunicação interna, ideal para o *script* em Python, quanto a conexão externa para o ESP32.

3.4.2 ESP32

Para o desenvolvimento do algoritmo dedicado à ESP32, foi utilizada a plataforma Arduino IDE, a qual oferece suporte direto à programação do microcontrolador. Para que o Arduino IDE reconheça a ESP32, foi necessário instalar o pacote de suporte da placa ESP32. Esse pacote pode ser obtido diretamente no gerenciador de placas do Arduino IDE, permitindo que o código seja carregado corretamente no microcontrolador.

O código para a ESP32 foi desenvolvido em linguagem C++, sendo necessário o uso de bibliotecas específicas para implementar algumas funcionalidades. Essas bibliotecas são:

- **Adafruit_ADS1X15.h:** Responsável pela comunicação com o conversor analógico-digital ADS1115. Esta biblioteca permite configurar o ADC, ler os valores digitais de tensão correspondentes aos sinais dos sensores e realizar a conversão dos sinais analógicos para o formato digital;
- **WiFi.h:** Utilizada para a conexão do ESP32 à rede Wi-Fi, garantindo que o microcontrolador tenha acesso à Internet. Através dessa biblioteca, é possível configurar a rede e estabelecer uma comunicação de dados entre o ESP32 e o *broker* MQTT.
- **PubSubClient.h:** Essencial para a comunicação MQTT entre o ESP32 e o *broker* MQTT. Esta biblioteca permite que o microcontrolador envie e receba mensagens via MQTT, garantindo a troca de dados com o *script* Python e possibilitando a execução do algoritmo de estimação de irradiância.

Com essas bibliotecas, a ESP32 é capaz de adquirir as medições dos sensores, processá-las e transmiti-las ao *broker* MQTT, para que os dados sejam posteriormente processados pelo *script* em Python.

3.4.3 Script em Python

O *script* em Python corresponde a última etapa do algoritmo estimador de irradiância. Sua escolha deve-se à facilidade de manipulação de dados e integração com o *broker* MQTT. Sua principal função é operar como *host* da *lookup table* tridimensional, permitindo a estimativa eficiente da irradiância a partir das medições recebidas.

Para sua implementação, foi utilizada a biblioteca **paho.mqtt.client**, responsável por gerenciar a comunicação via protocolo MQTT, incluindo a assinatura de tópicos, o recebimento de mensagens e o envio das respostas ao *broker* MQTT.

O processamento dos dados ocorre em duas etapas principais. Inicialmente, ao receber os valores de corrente (I), tensão (V) e temperatura (T), é necessário convertê-los em índices adequados para a busca na tabela 3-D de soluções, conforme as expressões:

$$x = \frac{255}{20} \cdot I_{med} \quad ; \quad y = \frac{63}{60} \cdot V_{med} \quad ; \quad z = \frac{63}{75} \cdot T_{med}. \quad (3.6)$$

Nesse caso, cada variável é normalizada com base no número de pontos da tabela e na faixa de variação das grandezas medidas. Em seguida, o algoritmo segue a metodologia proposta por Barbosa et al. (2024), localizando os oito pontos mais próximos dentro da *lookup table* e aplicando a interpolação trilinear para estimar a irradiância correspondente.

3.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

A análise detalhada da técnica de estimação de irradiância proposta por Barbosa et al. (2024) possibilitou a identificação de limitações no estimador, principalmente quanto ao *hardware* e à conectividade IoT. A partir dessa avaliação, foi possível estruturar o projeto em pontos de melhoria que aprimorassem a robustez e aplicabilidade do dispositivo. A remoção do multiplexador, aliada à adição de um ADC externo, permitiu realizar medições simultâneas e mais precisas. A escolha do ESP32, em detrimento do ESP8266, garantiu maior capacidade de processamento e estabilidade na comunicação. Além disso, a descentralização do processamento dos dados, viabilizada pela aplicação do protocolo MQTT, possibilitou a aplicação de uma tabela 3-D maior do que a capacidade de armazenamento do microcontrolador. Com essas estratégias, foi possível aprimorar o estimador de irradiância apresentado por Barbosa et al. (2024), propondo melhorias no *hardware* e viabilizando a implementação da comunicação IoT.

4 DESENVOLVIMENTO DE INTERFACE HOMEM-MÁQUINA PARA O ESTIMADOR DE IRRADIÂNCIA

As melhorias propostas para o estimador de irradiância apresentado por Barbosa et al. (2024) viabilizam a comunicação IoT por meio da implementação do protocolo MQTT no sistema. Para validar o conceito e demonstrar sua aplicação, é necessário integrá-lo a um sistema supervisorio, a fim de desenvolver uma IHM para o estimador de irradiância.

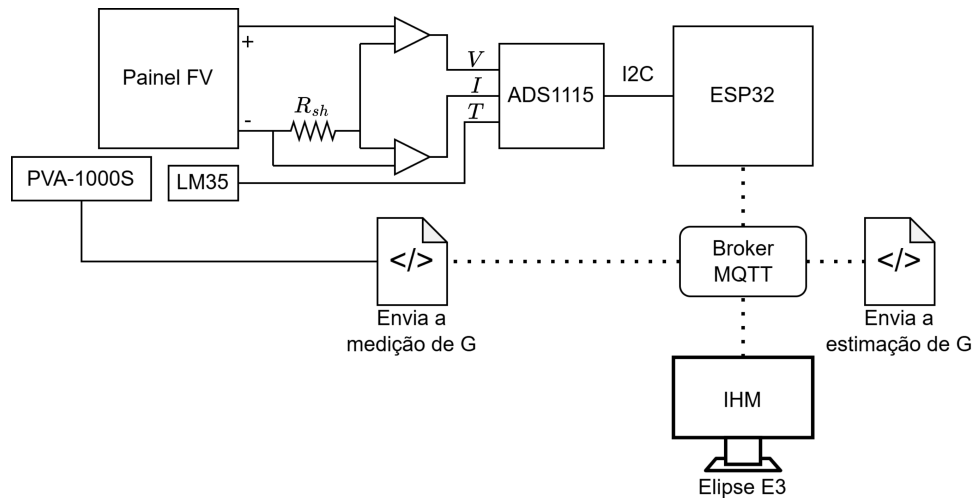
O protocolo MQTT é amplamente aplicado em diferentes sistemas e projetos, possibilitando o desenvolvimento de IHMs em diversas plataformas compatíveis. Dentre as soluções disponíveis, destaca-se o *software* Eclipse E3, que é amplamente documentado e utilizado, o que facilita sua configuração e implementação. No entanto, trata-se de um *software* proprietário, o que não condiz com a proposta de um sistema de baixo custo. Ainda assim, o Departamento de Engenharia Elétrica da UFPE dispõe de licenças do *software*, tornando sua utilização conveniente para a validação do conceito apresentado no capítulo anterior.

4.1 DIAGRAMA COMPLETO DO SISTEMA

O diagrama completo do sistema representa a integração entre o estimador de irradiância e a interface supervisória, considerando que os dados necessários para a operação da IHM no Eclipse E3 são disponibilizados pelo *broker* MQTT. Além do estimador, a implementação prática foi pensada incluindo um piranômetro (PVA-1000S), a fim de validar o valor estimado de irradiância. O valor medido pelo sensor de irradiância deve ser acompanhado de um *script* responsável para enviar suas medições ao *broker*.

A IHM do sistema supervisorio precisa ser projetada. Para isso, é importante que boas práticas no desenvolvimento de interfaces homem-máquina sejam seguidas. A seção a seguir apresenta uma breve revisão da literatura sobre o assunto.

Figura 19 – Diagrama do sistema estimador de irradiância vinculado ao sistema supervi-
sório através de comunicação MQTT.



Fonte: (Próprio autor, 2025).

4.2 BOAS PRÁTICAS NO PROJETO DE INTERFACES HOMEM-MÁQUINA

A IHM desenvolvida não apenas exibe as informações do sistema, mas também auxilia na interação entre o operador e o estimador de irradiância. Para garantir que essa interação ocorra de maneira eficiente e intuitiva, é fundamental adotar princípios e diretrizes voltados ao design de interfaces industriais.

A IHM está inserida em um contexto operacional e, por isso, não deve ser desenvolvida isoladamente. É importante considerar as condições do ambiente em que será utilizada, os operadores envolvidos, os aspectos ergonômicos e demais características relevantes. Sendo o centro de informações e o ponto de tomada de decisões, a gestão adequada da interface é indispensável para garantir desempenho e confiabilidade. Assim, o design da IHM deve ser planejado de modo a aumentar a produtividade do operador, minimizar erros humanos e proporcionar maior conforto durante a execução das tarefas (ISA, 2016; WALTERS, 2018). Dessa forma, é fundamental adotar princípios e diretrizes voltados ao design de interfaces industriais.

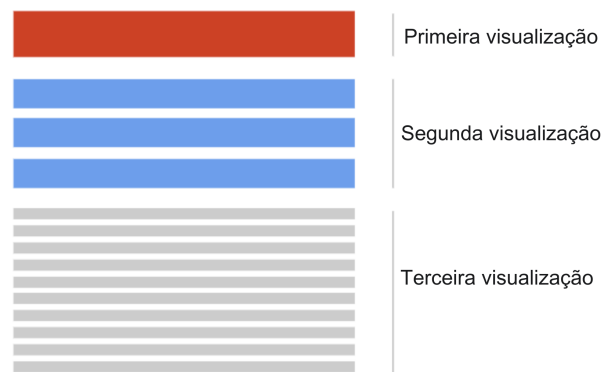
4.2.1 Organização de Layouts

O objetivo principal de uma IHM é organizar e exibir, de forma intuitiva, todas as informações necessárias para o usuário. Para isso, é fundamental concentrar-se no desenvolvimento de uma organização intuitiva dos *layouts*, garantindo que as informações sejam apresentadas de maneira clara e acessível. Portanto, é importante determinar as melhores práticas de organização de *layouts*, que visam otimizar a experiência do usuário (SENSENBACH, 2018).

4.2.1.1 Hierarquia Visual Clara

Essa é uma ferramenta intuitiva utilizada para orientar o usuário dentro de um projeto. Em uma IHM, os elementos mais importantes devem ser destacados de forma proeminente, enquanto informações menos relevantes podem ser exibidas em tamanhos menores ou com cores mais suaves, evitando distrações. A Figura 20 a seguir ilustra bem esse conceito, onde a informação mais importante é posicionada no topo e destacada por meio de tamanho, cor ou fonte.

Figura 20 – Hierarquia visual indicando as informações mais importantes.



Fonte: Retirado de (WALTERS, 2018).

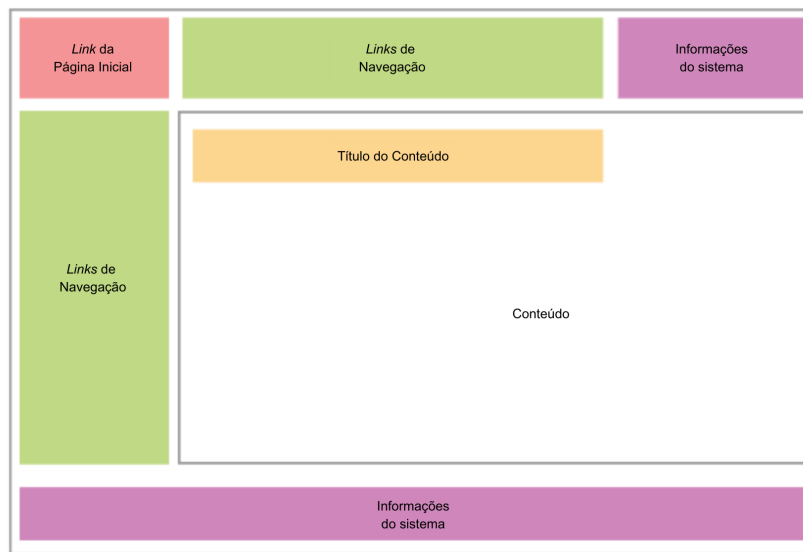
4.2.1.2 Áreas Definidas Claramente

Conteúdos relacionados devem ser agrupados de forma lógica, facilitando a identificação e o acesso rápido às informações pelo usuário. Além disso, a consistência entre as telas garante uma experiência uniforme, minimizando confusões e melhorando a eficiência da interação com o sistema. Adicionalmente, a Figura 21 a seguir apresenta uma tela baseada nas tendências dos usuários. Nos gráficos inferiores dessa figura, os tons mais escuros indicam as áreas de maior expectativa para localizar os conteúdos específicos.

4.2.1.3 Fornecimento (*Affordance*)

O conceito é bastante simples: botões devem ser representados de forma a se assemelhar a botões, e *links* devem ser identificados como *links*. Qualquer elemento clicável no design deve ser claramente identificado como tal. Por exemplo, no conjunto superior de ícones exibido na Figura 22, não há indicação clara de que eles podem ser selecionados como *links*. Já os ícones inferiores apresentam bordas arredondadas, rotulação clara e sombreamento sutil, características que os usuários podem facilmente remeter a botões. Contudo, independentemente do estilo adotado, é fundamental manter a consistência entre botões e *links* em toda a interface.

Figura 21 – Áreas de interface intuitiva baseada nas expectativas visuais dos usuários.



Fonte: Retirado de (SENSENBACH, 2018).

Figura 22 – Contraste entre botões sem e com características de *affordance* para *links*.



Fonte: Retirado de (SENSENBACH, 2018).

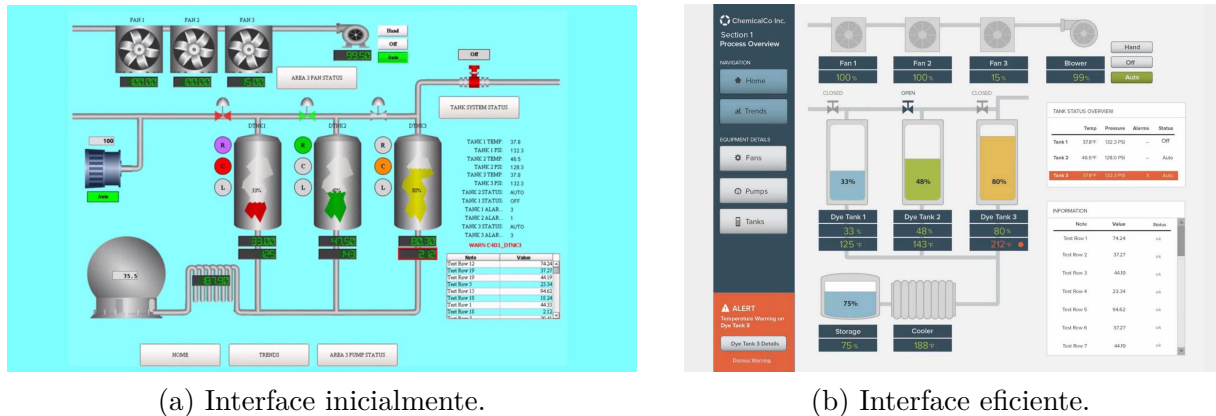
4.2.1.4 Redução de Desordem

A interface pode conter elementos visuais desnecessários que distraem o usuário do foco principal da interface. Isso inclui bordas, sombreamentos, barras de rolagem e botões supérfluos. A remoção desses elementos cria espaços mais amplos, permitindo que o usuário direcione sua atenção para o monitoramento das informações relevantes, sem se perder em detalhes desnecessários do design. A Figura 23 demonstra esse conceito, onde a Figura 23a apresenta uma interface com excesso de detalhes visuais e segmentação inadequada, enquanto a Figura 23b mostra o resultado após o processo de redução de desordem.

4.2.2 Apresentação Eficiente da Informação

Por fim, para finalizar a construção de uma IHM adequada aos contextos operacionais, é necessário considerar métodos de apresentação eficiente da informação, adaptando o sistema às limitações humanas. Visando aumentar a consciência situacional do operador, é necessário estabelecer métricas para características mais específicas da interface, como os elementos visuais e a acessibilidade (ISA, 2016). Dessa forma, a interface permite acesso

Figura 23 – Aplicação do processo de redução de desordem em interface ineficiente.



Fonte: Retirado de (SCRIVEN, 2016).

rápido aos dados críticos e possibilita decisões mais informadas.

4.2.2.1 Cores

Estudos indicam que as cores possuem um impacto que vai além da percepção visual, influenciando diretamente o comportamento e a tomada de decisão dos indivíduos. Por essa razão, diversos cuidados devem ser tomados na definição da paleta de cores de uma IHM (VIEIRA, 2018).

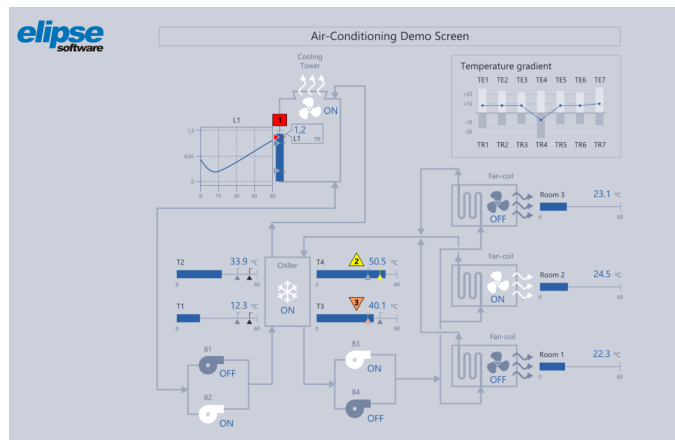
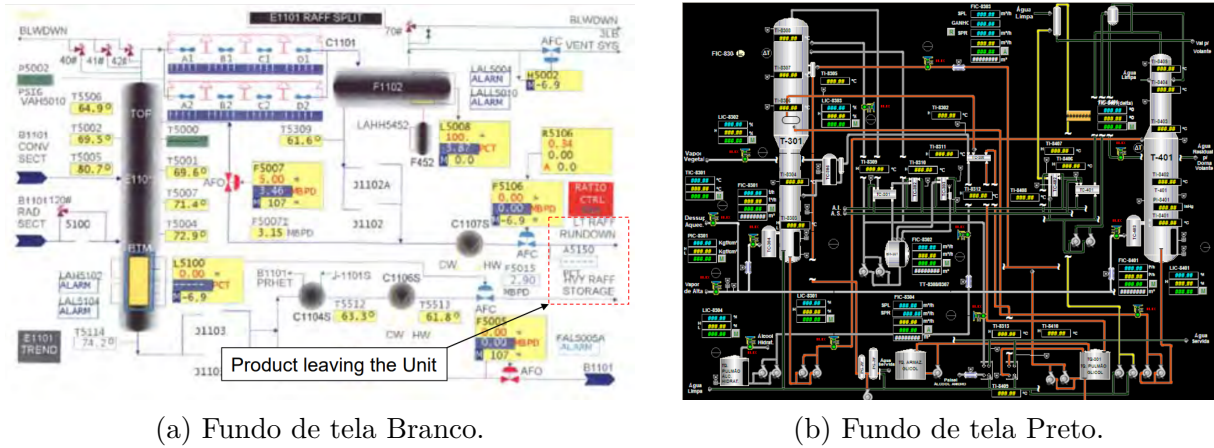
Embora possam parecer escolhas óbvias, não se recomenda o uso das cores branca ou preta como fundo de tela em IHMs de alto desempenho. O branco impede a representação de objetos mais claros e, devido ao elevado nível de luminosidade, pode causar fadiga visual em períodos prolongados. Por outro lado, o fundo preto apresenta desafios, como o contraste excessivo necessário para distinguir elementos visuais, além de impossibilitar a representação de objetos mais escuros que o fundo. O preto também é mais suscetível a reflexos em ambientes bem iluminados, comprometendo a visibilidade do conteúdo (ISA, 2016; GOETZ, 2019).

Como solução intermediária, recomenda-se o uso de uma escala de cinza azulado para o fundo de tela e objetos no geral. Essa tonalidade é capaz de transmitir tranquilidade e atenção com menor esforço, além de mitigar os problemas relacionados à iluminação do ambiente (ISA, 2016; FIGUEIREDO, 2024).

A Figura 24 apresenta três interfaces com fundos de tela distintos. Na Figura 24a, observa-se como o fundo branco causa cansaço visual e dificulta a utilização de contrastes suaves. Já a Figura 24b é possível observar como o preto exige o uso de cores mais vivas, o que distrai o operador. Por fim, a Figura 24c demonstra como a escala de cinza reduz o cansaço e facilita o foco nas informações principais.

Para a escala de cinza recomendada, sugere-se o uso de um tom mais claro para o fundo e tons mais escuros para os objetos, favorecendo o contraste. Tons vibrantes devem ser reservados para destacar condições anormais no processo, como alarmes e falhas, conforme

Figura 24 – Diferentes fundos de tela para IHMs.



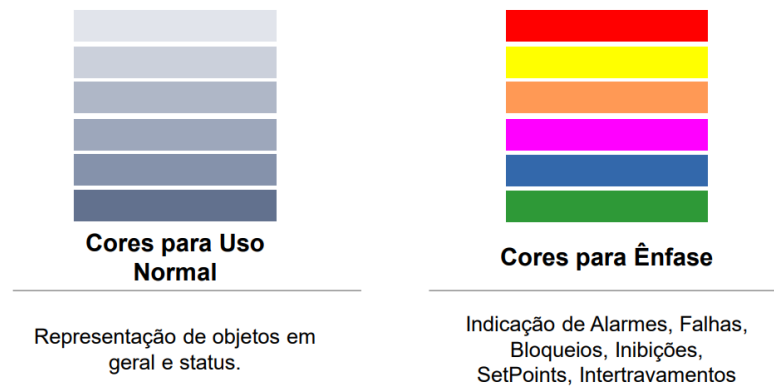
Fonte: Retirado de (ISA, 2016).

Figura 25. As cores das anomalias precisam ser restritas a esse propósito, fortalecendo seu significado cognitivo e reduzindo o tempo de resposta. De modo geral, as cores devem ser utilizadas para enfatizar e esclarecer informações, contudo, o significado de uma ocorrência não deve depender unicamente da cor empregada (ISA, 2016; VIEIRA, 2018; FIGUEIREDO, 2024).

Gradientes de cores devem ser evitados, pois não agregam informações relevantes ao controle das operações e funcionam apenas como elementos decorativos que podem causar distrações. Em uma IHM de alto desempenho, a prioridade é garantir simplicidade e apresentar as informações significativas (ISA, 2016; FIGUEIREDO, 2024). A Figura 26 compara um mesmo elemento: na Figura 26a, observa-se um excesso de *pixels* decorativos, enquanto a Figura 26b demonstra uma abordagem informativa e funcional.

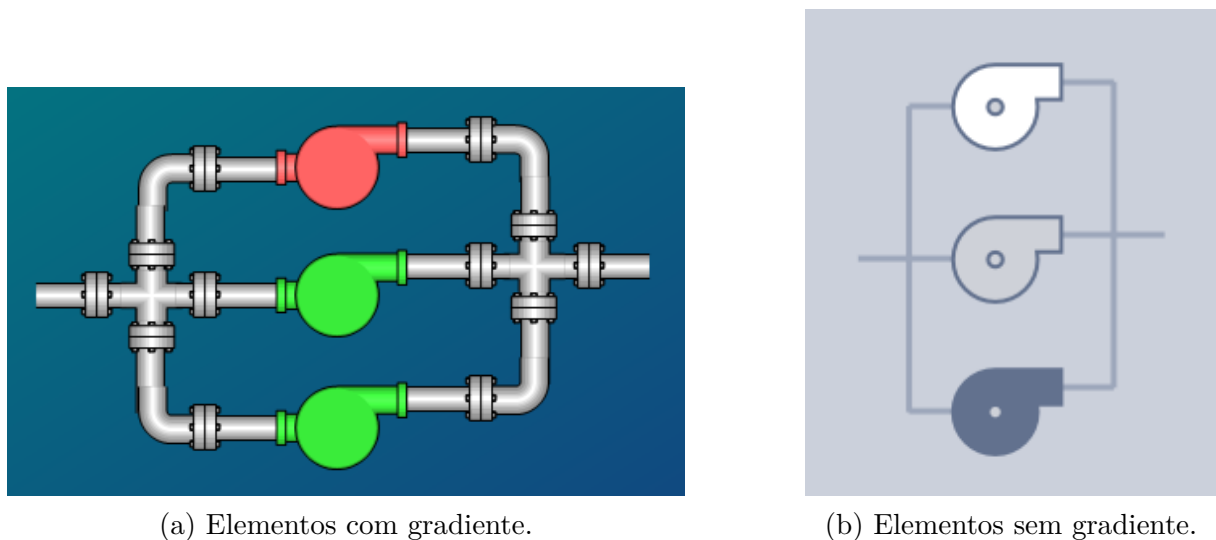
Além de serem inadequados em elementos, gradientes também não são funcionais nos fundos de telas, uma vez que o contexto afeta diretamente a percepção de cor do usuário. Na Figura 27, é possível observar que um dos retângulos é aparentemente mais claro que o outro, embora ambos possuam a mesma cor. Essa falsa percepção é causada pela variação de cor no fundo (GOETZ, 2019).

Figura 25 – Paleta de cores recomendada em IHMs de alto desempenho.



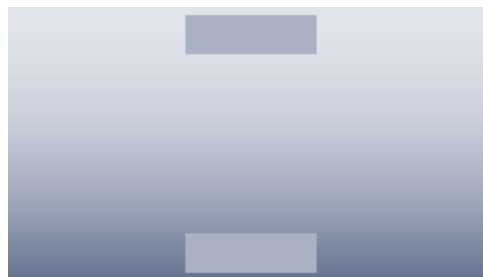
Fonte: Retirado de (ISA, 2016).

Figura 26 – Diferença entre elementos com e sem gradientes de cores.



Fonte: Retirado de (GOETZ, 2019).

Figura 27 – Impacto do gradiente aplicado ao fundo de tela.



Fonte: Retirado de (GOETZ, 2019).

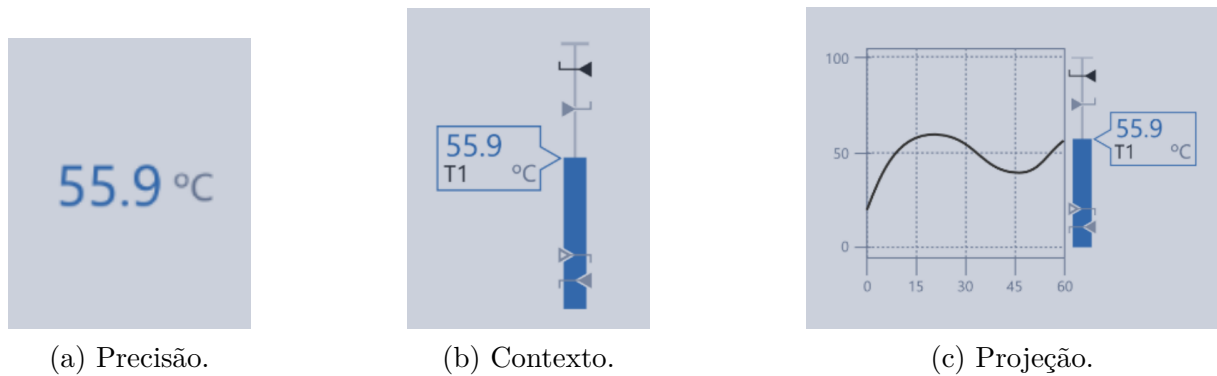
4.2.2.2 Representações de variáveis

As variáveis em uma IHM podem ser apresentadas de forma analógica ou digital. A representação digital é adequada quando a exatidão do valor é mais importante que o contexto, como na Figura 28a, onde é informada a temperatura com precisão. O contexto

diz respeito a identificar se a variável está dentro ou fora de seus limites normais. Ou seja, quando o contexto for mais importante que a exatidão, a representação analógica é mais adequada, permitindo visualizar o estado atual dentro da faixa de operação da variável monitorada (GOETZ, 2019). Assim, somente com a adição da representação analógica na Figura 28b é possível estabelecer o contexto da temperatura.

No entanto, o contexto não fornece informações sobre a tendência da variável, o que impede a estimativa de seu comportamento ao longo do tempo. Essa estimativa é essencial para antecipar as possíveis consequências desse comportamento, a fim de determinar a resposta necessária e o grau de urgência (GOETZ, 2019). Portanto, ao incorporar o gráfico na Figura 28c, foi possível representar de forma intuitiva a tendência da temperatura.

Figura 28 – Diferentes representações de uma variável e seus aspectos.



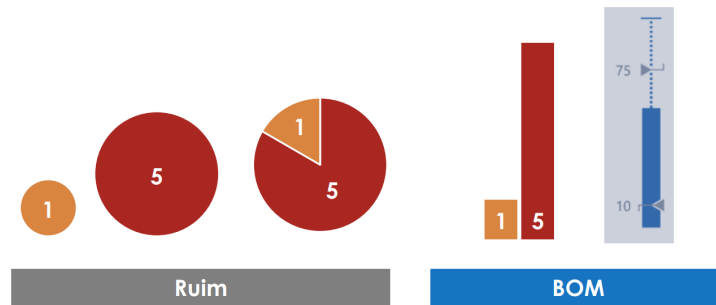
Fonte: Retirado de (ISA, 2016).

4.2.2.3 Forma

Formas geométricas estabelecem uma importante funcionalidade na comunicação visual de uma interface gráfica, sendo capazes de transmitir informação de diferentes maneiras. Para representar "quantidade", é preferível utilizar gráficos baseados em comprimento, como barras ou colunas, pois é mais intuitivo para o usuário compreender a variação de valor linearmente, ao contrário dos gráficos de pizza, onde o valor expresso em área dificulta a percepção das proporções (ISA, 2016). Essa distinção na representação de quantidade pode ser observada na Figura 29 a seguir.

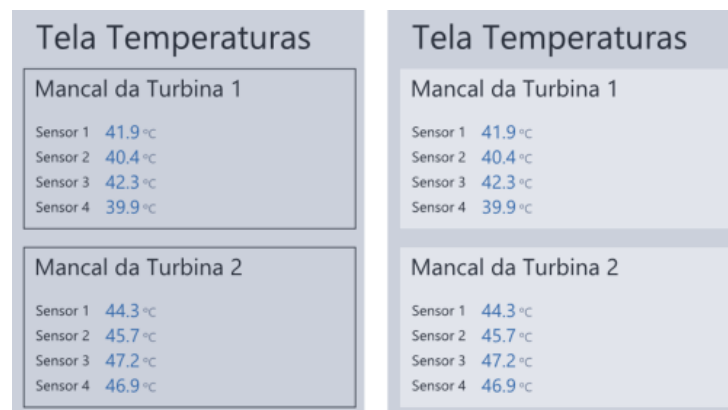
Além disso, formas geométricas também podem ser empregadas para representar "agrupamento", utilizando contornos ou preenchimentos ao redor de objetos para delimitar um grupo. Essa técnica facilita a compreensão das informações por meio da organização visual (ISA, 2016). A Figura 30 exemplifica como as variáveis do sistema podem ser agrupadas utilizando essas técnicas.

Figura 29 – Comparação na representação de quantidade através de linha ou área.



Fonte: Retirado de (ISA, 2016).

Figura 30 – Variáveis agrupadas através de contornos ou preenchimentos.



Fonte: Retirado de (GOETZ, 2019).

4.2.2.4 Acessibilidade

Mesmo com esses conceitos de forma e cor, é essencial considerar cuidados adicionais voltados à acessibilidade. Isso porque nem todos os usuários possuem a mesma percepção visual, como pessoas com daltonismo ou outras deficiências visuais.

Uma das estratégias para aprimorar a acessibilidade é alterar a forma dos objetos como indicação de diferentes estados ou status. Assim, a distinção entre os elementos não fica limitada à cor, tornando a interface mais inclusiva e compreensível para todos os operadores (ISA, 2016). A Figura 31 a seguir exemplifica essa estratégia, mostrando como ela pode ser aplicada para indicar o grau de severidade de alarmes.

Por outro lado, alguns objetos podem manter a mesma forma, mas ainda assim necessitar de diferenciação de status por meio de cores. Nesse caso, o fator mais relevante é garantir um alto contraste luminoso, já que o uso exclusivo de tons pode enfrentar limitações relacionadas à acessibilidade. A Figura 32a ilustra como contrastes luminosos são mais facilmente percebidos, mesmo em uma escala de cinza. Em contrapartida, a Figura 32b mostra que o alto contraste de tom pode apresentar baixo contraste na escala de cinza (ISA, 2016).

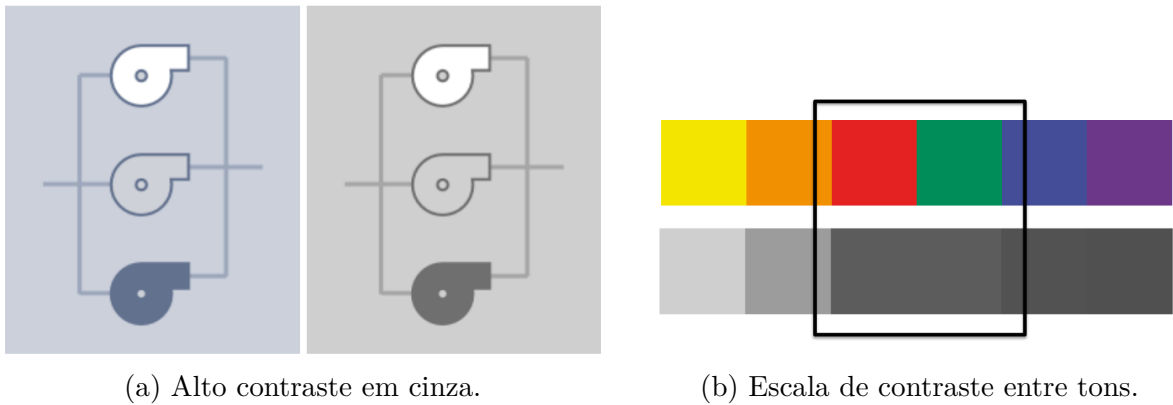
Assim, pode-se estabelecer uma convenção geral de contrastes de objetos em relação

Figura 31 – Níveis de severidade de alarmes distintos por forma e cor.



Fonte: Retirado de (GOETZ, 2019).

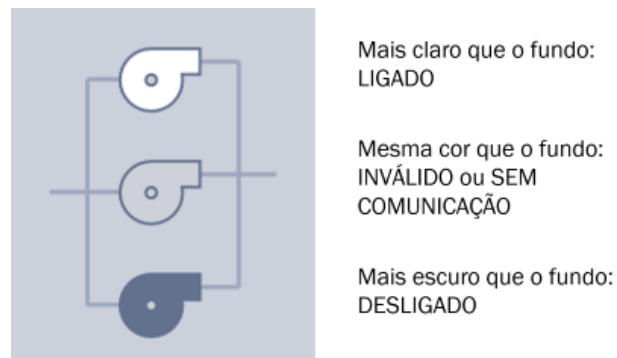
Figura 32 – Percepção das cores em uma escala de cinza.



Fonte: Retirado de (ISA, 2016).

ao fundo. Cores mais claras indicam objetos ligados, cores mais escuras representam objetos desligados, e o uso da mesma cor do fundo permite determinar um terceiro estado predeterminado, como evidenciado pela Figura 33 abaixo (GOETZ, 2019).

Figura 33 – Convenção de estados de objetos definidos pelo contraste com o fundo de tela.



Fonte: Retirado de (GOETZ, 2019).

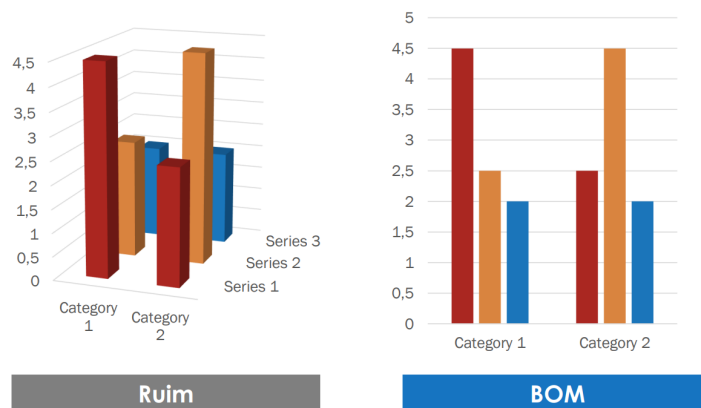
4.2.2.5 Movimento

O movimento é um forte atrativo visual, amplamente utilizado para fins de entretenimento. No entanto, em IHMs de alto desempenho, seu uso deve ser restrito a contextos de maior urgência, como sinalizações piscantes para alarmes críticos. De modo geral, a movimentação de objetos deve ser evitada, pois pode causar distração e desviar a atenção das informações essenciais (ISA, 2016).

4.2.2.6 2D vs 3D

É preferível utilizar elementos em 2D ao invés de 3D, especialmente em componentes dinâmicos, como gráficos. O excesso de detalhes no formato 3D causa uma sobrecarga cognitiva, afetando questões de visibilidade e legibilidade no usuário. A Figura 34 ilustra como a visualização 3D de um gráfico de colunas dificulta a interpretação, enquanto a versão plana facilita o entendimento (ISA, 2016).

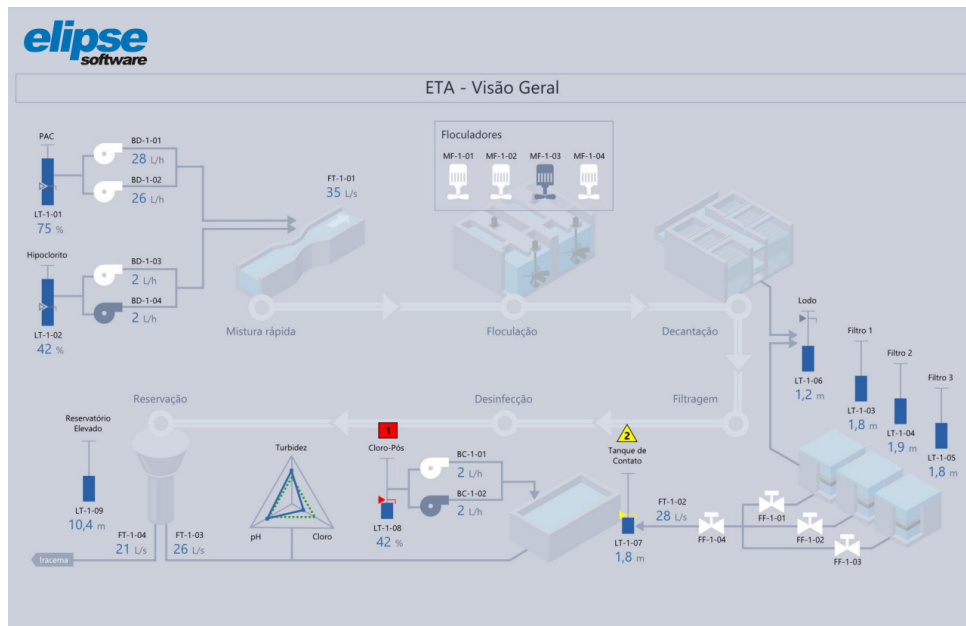
Figura 34 – Gráficos de colunas representados em 2D e 3D.



Fonte: Retirado de (ISA, 2016).

Apesar disso, objetos ou visualizações 3D possuem grande apelo estético e podem ser úteis em contextos específicos, como em telas de navegação ou telas de visão geral, onde não há necessidade de status ou controle (ISA, 2016), como exemplificado na interface da Figura 35. Nessa Figura, cada desenho representa uma parte do processo, utilizando cores suaves que não conflitam com as demais e sendo feitos em uma perspectiva axonométrica (sem pontos de fuga), a representação se torna esteticamente funcional e discreta (GOETZ, 2019).

Figura 35 – Tela de visão geral com elementos 3D.



Fonte: Retirado de (ISA, 2016).

4.3 IHM DESENVOLVIDA PARA O ESTIMADOR DE IRRADIÂNCIA

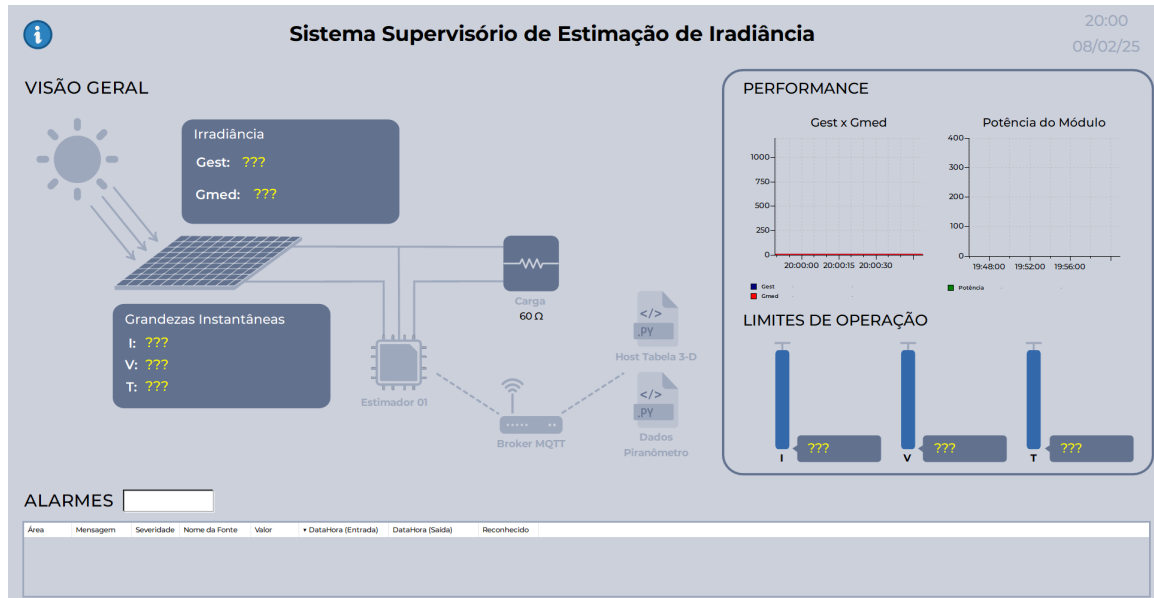
Seguindo os princípios definidos para projetos de IHMs de alto desempenho, a interface foi concebida com foco nas funcionalidades essenciais para a operação do sistema, sendo estruturada de acordo com a aplicação e as necessidades do usuário.

Para isso, foram definidas as seguintes áreas na interface:

- **Descrição do projeto:** incluindo título, data, hora e um botão de informações adicionais;
- **Visão geral do sistema:** exibindo um diagrama e seus componentes, assim como as grandezas instantâneas relevantes ao operador;
- **Performance do sistema:** apresentando as irradiâncias estimada e medida, assim como a tendência da potência gerada;
- **Limites de operação:** apresentando os limites dos sensores (I , V e T);
- **Alarmes:** indicando as ocorrências e um filtro para facilitar a busca por eventos específicos.

Os alarmes implementados na interface estão relacionados ao monitoramento das grandezas (I , V , T e G). Valores de I , V e T fora de suas faixas de operação podem indicar condições indesejadas de funcionamento ou erros de medição. No caso da irradiância, valores negativos são fisicamente irreais e indicam falhas na estimativa, assim como valores superiores a 2000 W/m^2 , podem ser oriundos de falhas do algoritmo.

Figura 36 – Interface homem-máquina desenvolvida no Eclipse E3, em concordância com as boas práticas no projeto de IHM.



Fonte: (Próprio autor, 2025).

No que se refere aos elementos visuais e à acessibilidade, adotou-se uma paleta de cores adequada, utilizando principalmente tons de cinza e azul. Com isso, os objetos foram projetados para garantir simplicidade, ao mesmo tempo em que são facilmente identificáveis, conforme os princípios de apresentação eficiente da informação. A Figura 36 ilustra a IHM desenvolvida no Eclipse E3, estando em concordância com as boas práticas descritas anteriormente.

4.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

A integração do sistema estimador de irradiância ao sistema supervisório viabilizou o desenvolvimento de uma IHM no *software* Eclipse E3, alinhada com diretrizes para interfaces industriais. A interface foi projetada para atender às necessidades do usuário dentro do seu contexto operacional, assegurando acesso rápido às grandezas elétricas e ambientais do sistema FV. Além disso, a disposição dos elementos gráficos priorizou a clareza das informações, apresentando tendências, limites operacionais e alarmes, sem sobrecarregar o operador com estímulos visuais desnecessários. Dessa forma, demonstrou-se a aplicabilidade e viabilidade da solução proposta.

5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta a validação e análise dos principais componentes do sistema desenvolvido. Primeiramente, a Seção 5.1 discute a validação dos circuitos de sensoriamento, abordando o funcionamento dos circuitos de condicionamento de sinais e a linearidade do conversor analógico-digital. Em seguida, a Seção 5.2 apresenta os resultados simulados, incluindo a obtenção do Modelo Global Não Linear do módulo FV e a construção da tabela 3-D de soluções para a estimativa de irradiância. Posteriormente, a Seção 5.3 apresenta os resultados experimentais, com a Subseção 5.3.1 verificando a implementação da comunicação MQTT entre os dispositivos do sistema e a Subseção 5.3.2 expondo os resultados experimentais obtidos em laboratório, validando o estimador de irradiância e demonstrando a operação do sistema supervisor.

5.1 VALIDAÇÃO DOS CIRCUITOS DE SENSORIAMENTO

Para garantir o correto funcionamento dos circuitos de condicionamento de sinais e do ADC externo, foram realizados testes experimentais em três etapas. Inicialmente, validou-se o circuito de condicionamento de tensão, seguido pela validação do circuito de condicionamento de corrente e, por fim, pela validação do ADC.

Os testes consistiram na aplicação de sinais de entrada em degrau nos respectivos circuitos e na análise das respostas obtidas na saída. Com os dados coletados, foi aplicada uma regressão linear para determinar a relação matemática entre entrada e saída, analisando a correspondência com a relação projetada e a linearidade de cada etapa.

5.1.1 Validação do Circuito de Condicionamento de Tensão

Neste teste, foram aplicados degraus de tensão na entrada do circuito e analisadas as respectivas saídas. A Tabela 4 apresenta os valores aplicados e os valores medidos na saída.

Com os valores obtidos, foi aplicada uma regressão linear para determinar a relação entre a tensão de entrada e a tensão de saída do circuito. A equação obtida foi:

$$V_0 = 0,016689 \cdot V_{\text{módulo}} - 0,0044. \quad (5.1)$$

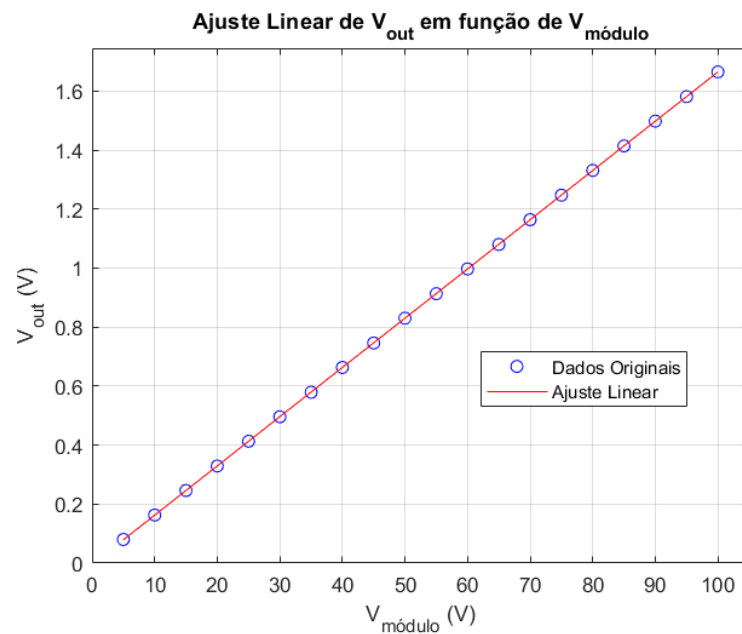
A equação obtida apresenta um comportamento muito próximo ao esperado ($V_0 = V_{\text{módulo}}/60$), com um coeficiente de determinação (R^2) igual a 1, indicando uma resposta perfeitamente linear. A Figura 37 ilustra a relação entre os valores de entrada e saída, onde os pontos representam os dados experimentais, e a linha corresponde à reta ajustada pela regressão linear.

Tabela 4 – Valores de entrada e saída para o circuito de condicionamento de tensão.

Tensão de Entrada (V)	Tensão de Saída (mV)
5	80
10	163
15	246
20	329
25	413
30	496
35	579
40	663
45	746
50	830
55	913
60	997
65	1080
70	1164
75	1247
80	1331
85	1414
90	1498
95	1581
100	1665

Fonte: (Próprio autor, 2025).

Figura 37 – Validação do circuito de condicionamento de tensão.



Fonte: (Próprio autor, 2025).

5.1.2 Validação do Circuito de Condicionamento de Corrente

Neste teste, foram aplicados degraus de corrente na entrada do circuito e analisadas as respectivas saídas. A Tabela 5 apresenta os valores aplicados e os valores medidos na saída.

Tabela 5 – Valores de entrada e saída para o circuito de condicionamento de corrente.

Corrente de Entrada (A)	Tensão de Saída (mV)
0.5	43
1.0	93
1.5	143
2.0	194
2.5	243
3.0	294
3.5	345
4.0	395
4.5	445
5.0	495
5.5	545
6.0	595
6.5	645
7.0	695
7.5	745
8.0	795

Fonte: (Próprio autor, 2025).

Com os valores obtidos, foi aplicada uma regressão linear para determinar a relação entre a corrente de entrada e a tensão de saída do circuito. A equação ajustada foi:

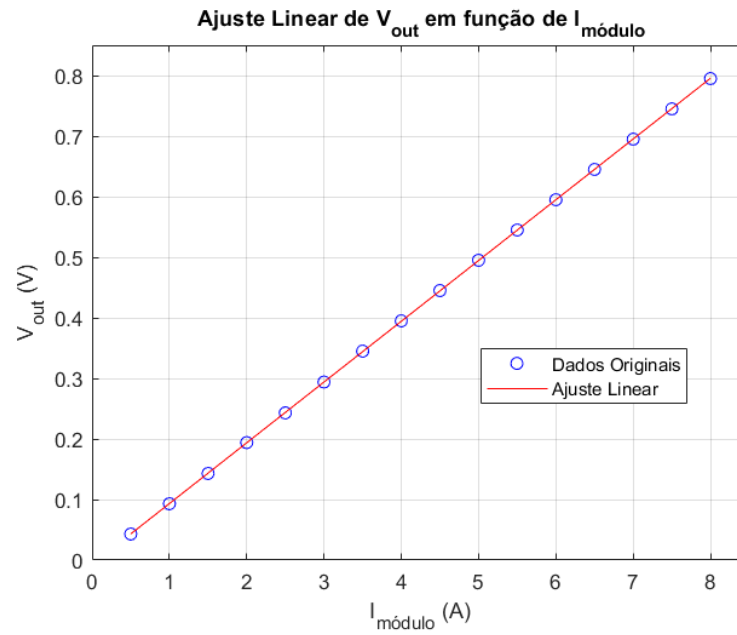
$$V_0 = 0,10031 \cdot I_{\text{módulo}} - 0,00695. \quad (5.2)$$

A equação obtida apresenta um comportamento muito próximo ao esperado ($V_0 = I_{\text{módulo}}/10$), com um coeficiente de determinação (R^2) igual a 1, indicando uma resposta perfeitamente linear. A Figura 38 ilustra a relação entre os valores de entrada e saída, onde os pontos representam os dados experimentais, e a linha corresponde à reta ajustada pela regressão linear.

5.1.3 Validação do Conversor Analógico-Digital (ADC)

Neste teste, considerando a faixa de tensão de saída dos circuitos de condicionamento, foram aplicados degraus de tensão na entrada do ADC, a fim de analisar as respectivas respostas digitais obtidas via código embarcado no microcontrolador. A Tabela 6 apresenta os valores de entrada e os valores medidos na saída.

Figura 38 – Validação do circuito de condicionamento de corrente.



Fonte: (Próprio autor, 2025).

Tabela 6 – Valores de entrada analógica e saída digital do ADC.

Tensão Analógica (V)	Valor Digital Convertido (V)
0.10	0.10
0.20	0.20
0.30	0.30
0.40	0.40
0.50	0.50
0.60	0.60
0.70	0.70
0.80	0.80
0.90	0.90
1.00	1.00
1.10	1.10
1.20	1.20
1.30	1.30
1.40	1.40
1.50	1.50
1.60	1.60
1.70	1.70
1.80	1.80
1.90	1.90
2.00	2.00

Fonte: (Próprio autor, 2025).

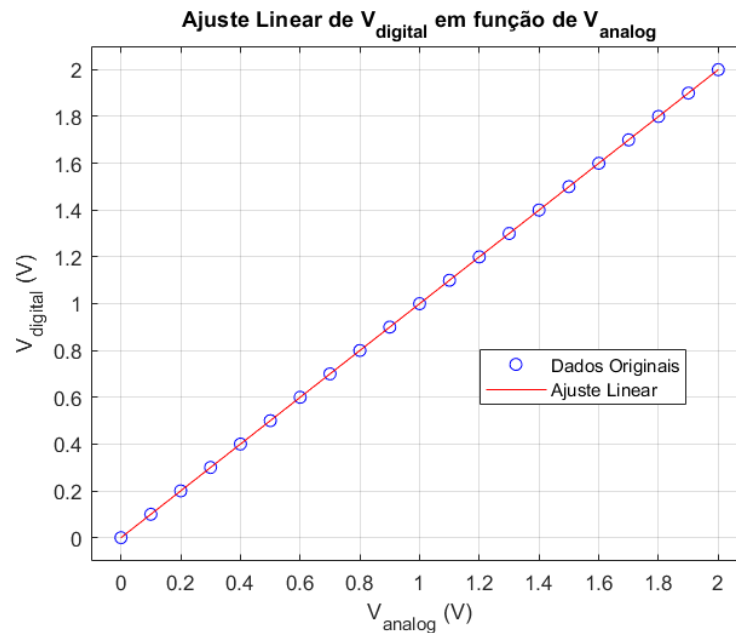
Com os valores obtidos, foi aplicada uma regressão linear para determinar a relação

entre a tensão de entrada e o valor digital de saída do ADC. A equação ajustada foi:

$$V_{\text{digital}} = 1 \cdot V_{\text{analogico}} + 0. \quad (5.3)$$

A equação obtida apresenta o comportamento esperado ($V_{\text{digital}} = V_{\text{analogico}}$), com um coeficiente de determinação (R^2) igual a 1, indicando que a conversão ocorre corretamente na razão de 1 para 1, considerando as casas decimais avaliadas. A Figura 39 ilustra a relação entre os valores analógicos de entrada e os valores digitais de saída, onde os pontos representam os dados experimentais, e a linha corresponde à reta ajustada pela regressão linear.

Figura 39 – Validação do Conversor Analógico-Digital (ADC).



Fonte: (Próprio autor, 2025).

A partir dessas análises, foi possível verificar a linearidade e a precisão dos circuitos de condicionamento e do ADC, garantindo seu funcionamento adequado dentro do sistema estimador de irradiância.

5.2 RESULTADOS SIMULADOS

Nesta etapa, foi realizada a obtenção do MGNL para o módulo FV CS6W-555MS da Canadian Solar, com o objetivo de gerar a tabela 3-D de soluções utilizada para aplicação da técnica de *lookup table*.

O MGNL foi obtido seguindo o método proposto por Silva et al. (2017), no qual foram utilizadas curvas experimentais em diferentes níveis de irradiância para o treinamento do modelo. Essas curvas foram obtidas com o traçador de curva PVA-1000S, utilizando curvas sem sombreamento e representação de até 500 pontos.

Para avaliar a precisão do modelo gerado, foram calculadas as seguintes métricas de precisão: MAPE e média dos desvios quadráticos médios normalizados (*Normalized Root Mean Squared Deviation* - nRMSD), cujas expressões matemáticas são apresentadas a seguir:

$$\text{MAPE} = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|; \quad (5.4)$$

$$\text{nRMSD} = \frac{100\%}{y_{\max} - y_{\min}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}. \quad (5.5)$$

Onde y_i representa os valores medidos experimentalmente, $\hat{y}_i$ os valores calculados pelo modelo, N o número total de pontos avaliados, e $y_{\max}$ e $y_{\min}$ os valores máximo e mínimo da variável analisada.

Com base nessas equações, foram organizadas as métricas obtidas para cada curva de treinamento, comparando a curva P-V real com a gerada pelo MGNL, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Condições ambientais e métricas de erro para o estimador de irradiância.

G (W/m ²)	T (°C)	MAPE (%)	nRMSD (%)
1017	57	0.86	1.4
952	60	0.67	0.9
707	38	1.8	2.0
578	41	0.34	0.47
443	39	2.9	3.5
257	47	2.2	3.9

Fonte: (Próprio autor, 2025).

A partir desses resultados, calcularam-se as métricas globais do modelo para todo o conjunto de treinamento:

- **MAPE:** 1,47%;
- **nRMSD:** 2,02%.

Esses valores refletem a precisão do MGNL nas condições ambientais utilizadas na etapa de treinamento.

A partir do modelo gerado, foi realizada a obtenção da tabela 3-D, a qual foi utilizada na técnica de *lookup table*. Para a geração dessa tabela, é necessário definir as faixas de valores de I , V e T consideradas na LUT. Nesse sentido, foram utilizadas as seguintes faixas:

- **Corrente:** [0, 20] A;
- **Tensão:** [0, 60] V;

- **Temperatura:** $[0, 75]$ °C.

Esses valores foram definidos com base na engenharia de requisitos e são adequados às condições reais do módulo FV em campo. Dessa forma, garante-se que não haja situações sem registros na tabela, visto que os valores de I e V do módulo avaliado permanecem dentro de suas faixas e a temperatura dificilmente se aproxima dos limites definidos.

Através do MGNL obtido anteriormente é possível calcular a irradiância correspondente aos índices (I , V , T) da tabela 3-D. Com base nesse princípio, diferentes dimensões de tabela foram avaliadas, considerando ($I \times V \times T$), com o objetivo de definir o tamanho ideal para a estimação. Conforme discutido na Seção 3.1.1, a corrente apresenta um comportamento não linear na curva I-V, o que, no trabalho de Barbosa et al. (2024), resultou em erros percentuais mais acentuados após o V_{mpp} . Dessa forma, nas duas últimas dimensões avaliadas, os aumentos foram aplicados exclusivamente na variável I , buscando mitigar esse comportamento. A Tabela 8 apresenta os tamanhos avaliados e os resultados obtidos para a estimação no MPP em diferentes condições de irradiância e temperatura.

Tabela 8 – Resultados de irradiância estimada no MPP para diferentes condições de irradiância e temperatura, com tabelas 3-D de diferentes dimensões.

Medição			32x32x32		64x64x64		128x64x64		256x64x64	
V_{mpp} (V)	T (°C)	G (W/m²)	Gest (W/m²)	E(%)	Gest (W/m²)	E(%)	Gest (W/m²)	E(%)	Gest (W/m²)	E(%)
37,17	49	280	229,72	17,96	268,33	4,17	281,36	0,49	287,03	2,51
37,83	48	349	289,70	16,99	327,90	6,04	344,17	1,38	346,13	0,82
38,19	46	479	413,94	13,58	449,33	6,19	463,61	3,21	467,01	2,50
37,19	47	538	476,27	11,47	514,60	4,35	520,55	3,24	531,60	1,19
38,73	42	576	499,06	13,36	540,24	6,21	552,91	4,01	562,51	2,34
38,78	45	679	590,15	13,08	653,39	3,77	665,59	1,97	671,26	1,14
37,46	51	798	720,68	9,69	796,30	0,21	808,99	1,38	814,15	2,02
37,46	50	818	734,01	10,27	793,57	2,99	806,72	1,38	812,29	0,70
37,30	53	927	817,91	11,77	913,74	1,43	925,72	0,14	933,74	0,73
35,76	50	1001	958,09	4,29	1002,07	0,11	1011,29	1,03	1017,71	1,67

Fonte: (Próprio autor, 2025).

A partir desses resultados, foi calculado o erro médio, considerando todos os cenários no MPP, para as diferentes dimensões de tabelas 3-D. Os valores obtidos são apresentados a seguir:

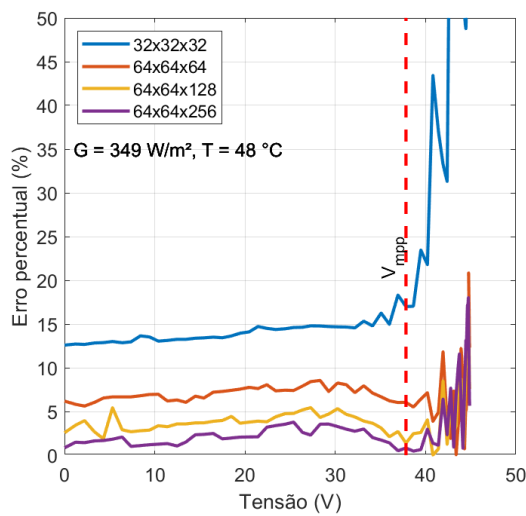
- (32x32x32): 12,25%;
- (64x64x64): 3,55%;
- (128x64x64): 1,82%;
- (256x64x64): 1,56%.

Visto que o MAPE obtido para a dimensão (256x64x64) está muito próximo do MAPE do MGNL, não foram avaliadas dimensões adicionais. Esse valor pode ser interpretado

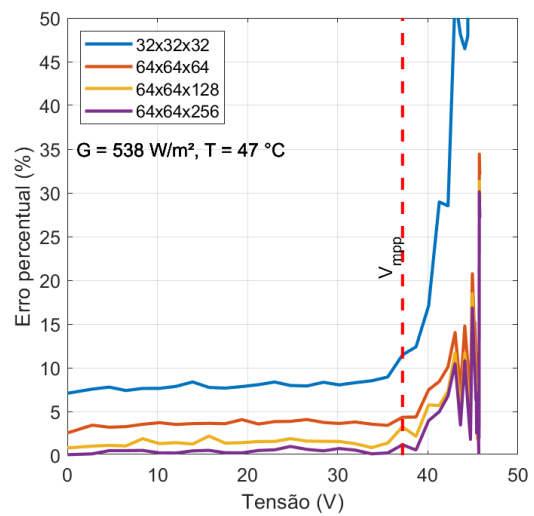
como um platô, representando o erro intrínseco do modelo, ou seja, um limite abaixo do qual a redução do erro se torna insignificante em relação ao custo computacional adicional.

Para complementar a análise, a Figura 40 apresenta a avaliação do erro de estimativa da irradiância em função da tensão do módulo FV para quatro condições distintas de irradiância e temperatura. Cada subfigura ilustra um cenário com condições ambientais distintas a fim de ilustrar melhor a performance de diferentes dimensões da tabela 3-D de soluções.

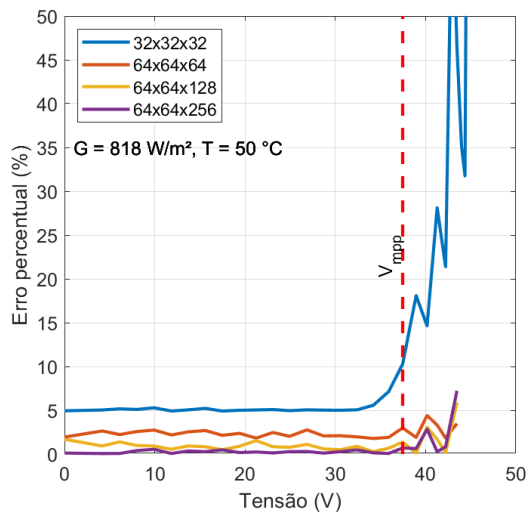
Figura 40 – Avaliação do erro de estimativa G em função da tensão do módulo FV para diferentes condições de irradiância e temperatura.



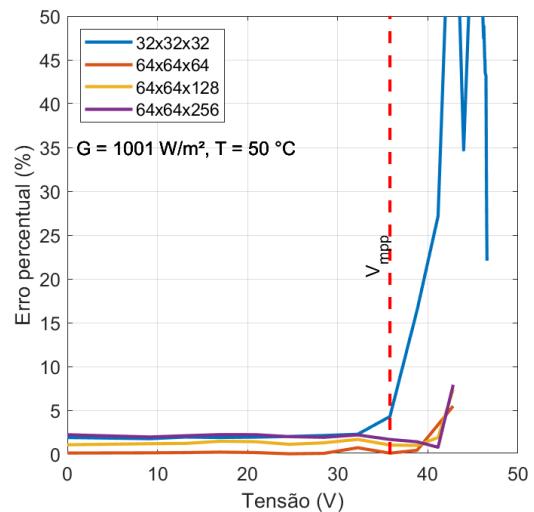
(a) $G = 349 \text{ W/m}^2$ e $T = 48^\circ \text{C}$.



(b) $G = 538 \text{ W/m}^2$ e $T = 47^\circ \text{C}$.



(c) $G = 818 \text{ W/m}^2$ e $T = 50^\circ \text{C}$.



(d) $G = 1001 \text{ W/m}^2$ e $T = 50^\circ \text{C}$.

Fonte: (Próprio autor, 2025).

A dimensão (256x64x64) apresentou o melhor MAPE nas condições de MPP, que são as mais relevantes do ponto de vista energético. Além disso, a análise do erro de estimativa em diferentes condições ambientais revelou que, de maneira geral, a maior dimensão da

tabela 3-D resulta nos menores erros de estimativa para diferentes níveis de tensão. Dessa forma, a escolha da tabela (256x64x64) se justifica como a mais adequada para o sistema proposto.

5.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta etapa, inicialmente foi realizada a validação experimental da comunicação do sistema, com o módulo fotovoltaico CS6W-555MS instalado em campo, e o estimador de irradiância conectado, enviando informações ao sistema supervisor, montado no Eclipse E3. Em seguida, emulou-se o comportamento do módulo fotovoltaico estudado, utilizando a fonte de laboratório Regatron, para conectar o protótipo e avaliar a precisão da estimação e o comportamento do sistema supervisor.

5.3.1 Validação da Comunicação

No protótipo desenvolvido (Figura 41), o *broker* foi instalado em um computador pessoal, proporcionando praticidade na validação do sistema. O *script* em Python foi configurado para rodar em *loop* no mesmo computador, realizando a conexão com o *broker* internamente. O microcontrolador, por sua vez, foi conectado à mesma rede Wi-Fi do computador, estabelecendo a comunicação com o *broker* através do IP atribuído a ele na rede.

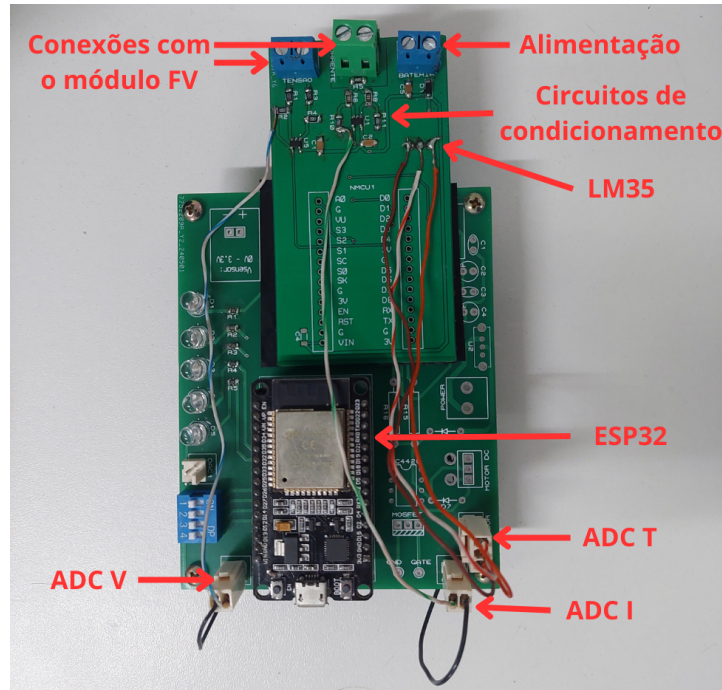
O piranômetro presente no dispositivo PVA-1000S foi colocado em operação juntamente com o módulo FV (Figura 42), instalados em campo, onde a informação de irradiância medida foi obtida pelo *software* Solmetric PV Analyzer. Esses dados foram transmitidos por meio de um *script* adicional em Python, responsável por capturar a tela do *software* e enviar as informações de irradiância para o *broker* MQTT.

O *setup* experimental dessa etapa está apresentado na Figura 43, ilustrando o módulo FV, a carga resistiva em paralelo com o módulo, o microcontrolador conectado para aquisição das medições de corrente, tensão e temperatura (conforme Figura 14), além de um computador atuando como fonte de alimentação para o protótipo.

Dessa forma, foi possível estabelecer a comunicação da forma entendida e com a IHM funcionando conforme esperado, conforme evidencia a Figura 44. No experimento, ao utilizar uma carga resistiva de 12Ω , o módulo permaneceu na condição de V_{oc} , sem circulação de corrente e sem geração de potência. Para permitir a operação em um ponto de potência útil, seria necessário reduzir a resistência da carga, deslocando o ponto de operação para a esquerda na curva I-V.

No laboratório do GEPAE, do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPE, as cargas resistivas com valores inferiores a 12Ω e potência de pelo menos 550 W (compatível com o módulo avaliado) apresentam estruturas robustas e pesadas, o que impõe dificuldades no deslocamento desses componentes. Dessa forma, a ausência de um inversor

Figura 41 – Protótipo estimador de irradiância.



Fonte: (Próprio autor, 2025).

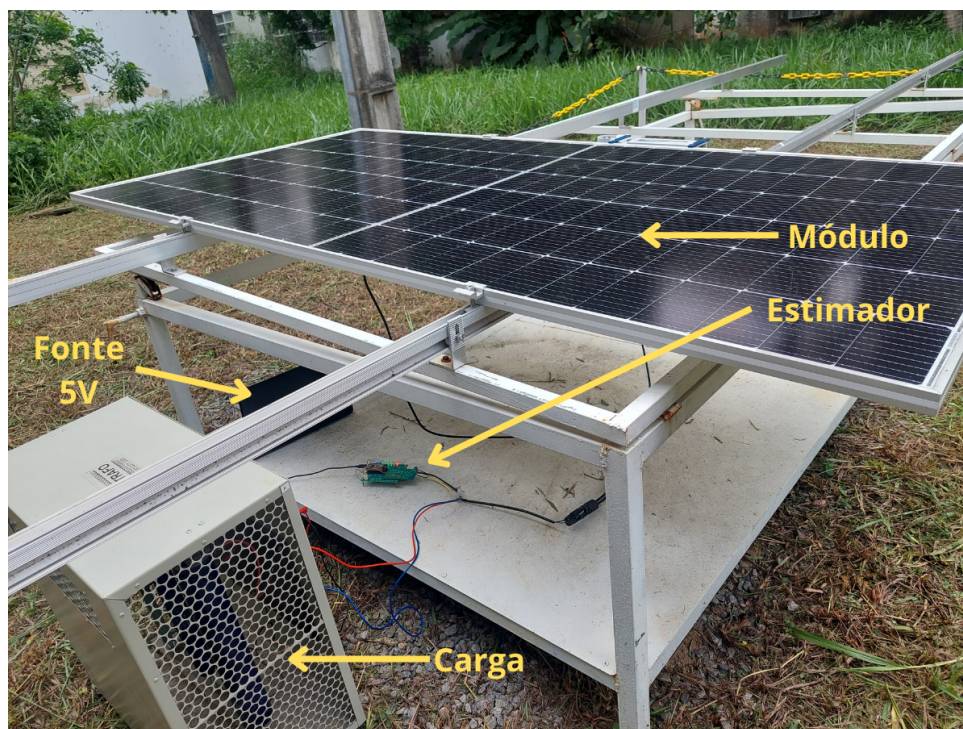
Figura 42 – Piranômetro (PVA-1000S) em operação com o módulo FV (CS6W-555MS).



Fonte: (Próprio autor, 2025).

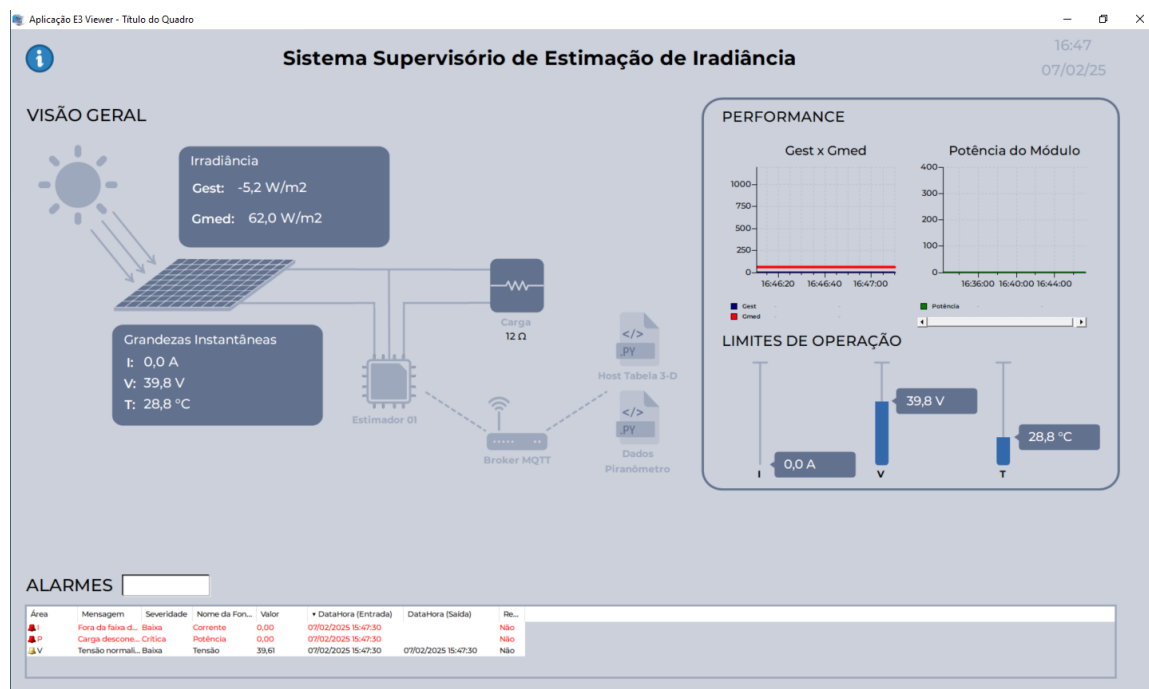
FV para controle do ponto de operação do módulo, aliada às limitações das cargas disponíveis, inviabilizaram a obtenção de resultados experimentais em condições de geração de energia. Por essas razões, optou-se pela emulação do módulo em laboratório, a fim de obter resultados experimentais coerentes com as condições reais de operação.

Figura 43 – Configuração experimental do estimador conectado ao módulo FV e à carga resistiva.



Fonte: (Próprio autor, 2025).

Figura 44 – Interface homem-máquina do sistema estimador de irradiância operando em campo.

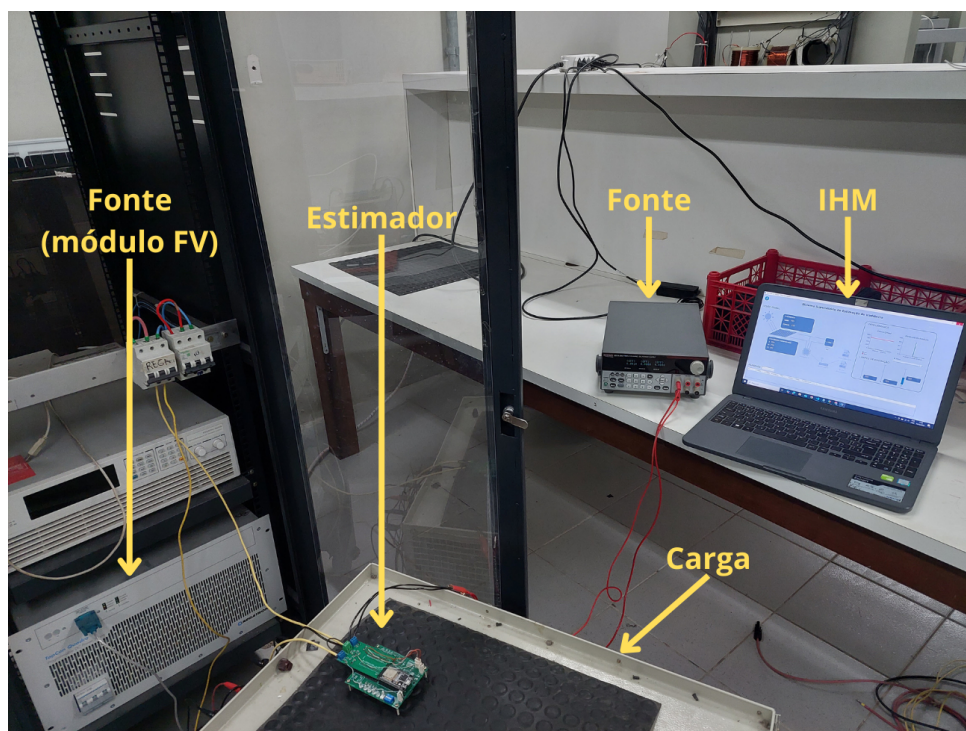


Fonte: (Próprio autor, 2025).

5.3.2 Emulação de Módulo FV em Fonte

Utilizando a fonte programável Regatron, capaz de emular o comportamento de módulos FV, foi simulada a operação do mesmo módulo (CS6W-555MS) sob quatro condições ambientais distintas. Para isso, uma carga resistiva foi conectada em paralelo com a fonte, enquanto o estimador de irradiância foi inserido conforme as conexões apresentadas na Figura 14 de modo a realizar a aquisição da corrente e da tensão do módulo. A Figura 45 apresenta a configuração desse experimento.

Figura 45 – Configuração experimental do estimador conectado à fonte, emulando o módulo FV, e à carga resistiva.



Fonte: (Próprio autor, 2025).

Após a montagem, a fonte programável foi configurada para reproduzir as condições ambientais definidas. Como não há variação natural de temperatura do módulo durante o experimento, e o uso do piranômetro não se aplica nesse contexto, os valores de irradiância e temperatura foram diretamente inseridos nos códigos correspondentes. A Tabela 9 apresenta as condições ambientais consideradas, os valores da resistência da carga, os resultados da estimação e os respectivos erros percentuais.

Os resultados obtidos para as quatro condições ambientais avaliadas apresentaram MAPE de 3,45%. Apesar do teste ser insuficiente para comparar com os outros estimadores avaliados, visto que estes foram submetidos a testes em campo por horas de operação, esse resultado é um indicativo da correta operação do algoritmo e está de acordo com os requisitos do projeto, MAPE abaixo de 3,60%.

Para complementar a análise dos resultados, as Figuras 46 a 49 apresentam as telas da

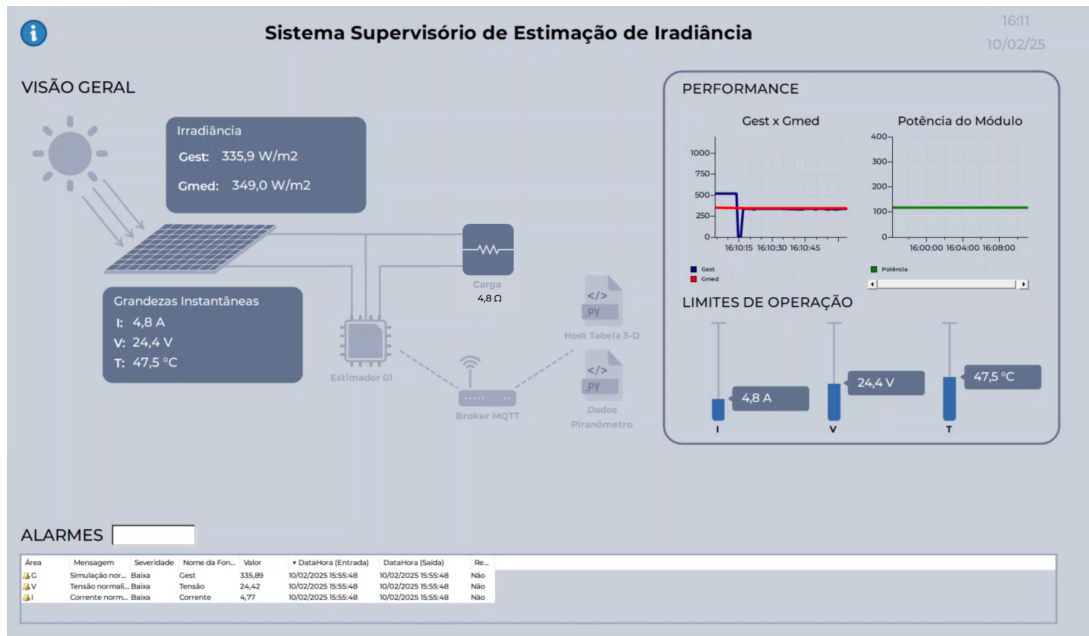
Tabela 9 – Resultados da emulação do módulo FV em fonte programável.

G (W/m^2)	T ($^{\circ}C$)	Resistência da carga	G_{est} (W/m^2)	Erro (%)
349	48	$4,8\Omega$	335,9	3,75
479	46	$4,8\Omega$	468,7	2,15
538	47	$4,8\Omega$	520,1	3,33
818	50	$3,0\Omega$	780,7	4,56

Fonte: (Próprio autor, 2025).

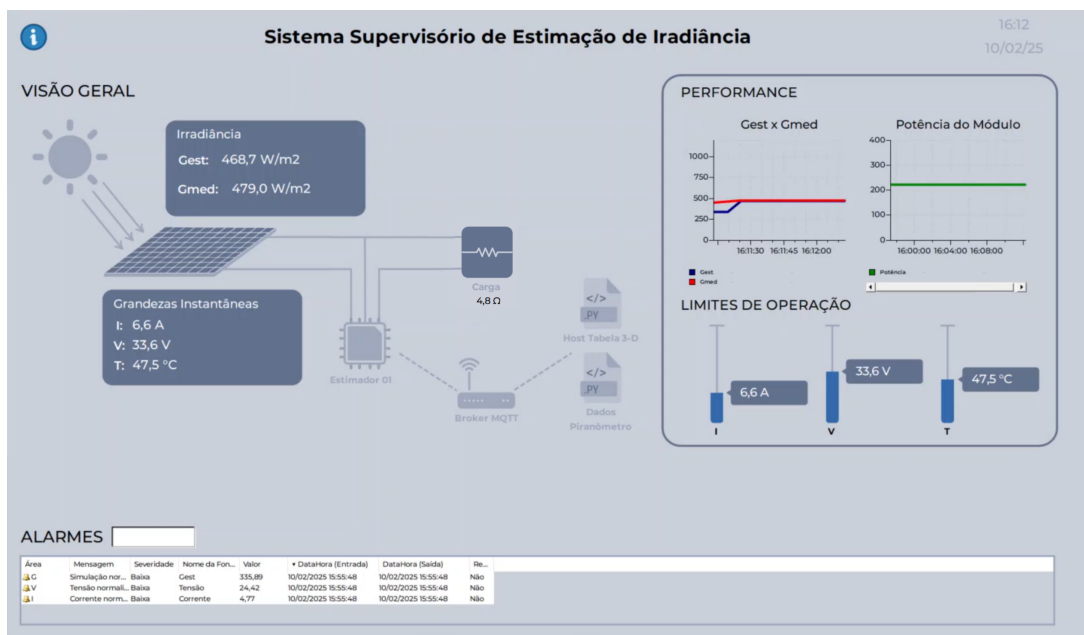
IHM desenvolvida, exibindo os valores estimados de irradiância sob as diferentes condições do teste experimental.

Figura 46 – IHM no teste experimental de condições ambientais ($G = 349W/m^2$ e $T = 48^{\circ}C$).



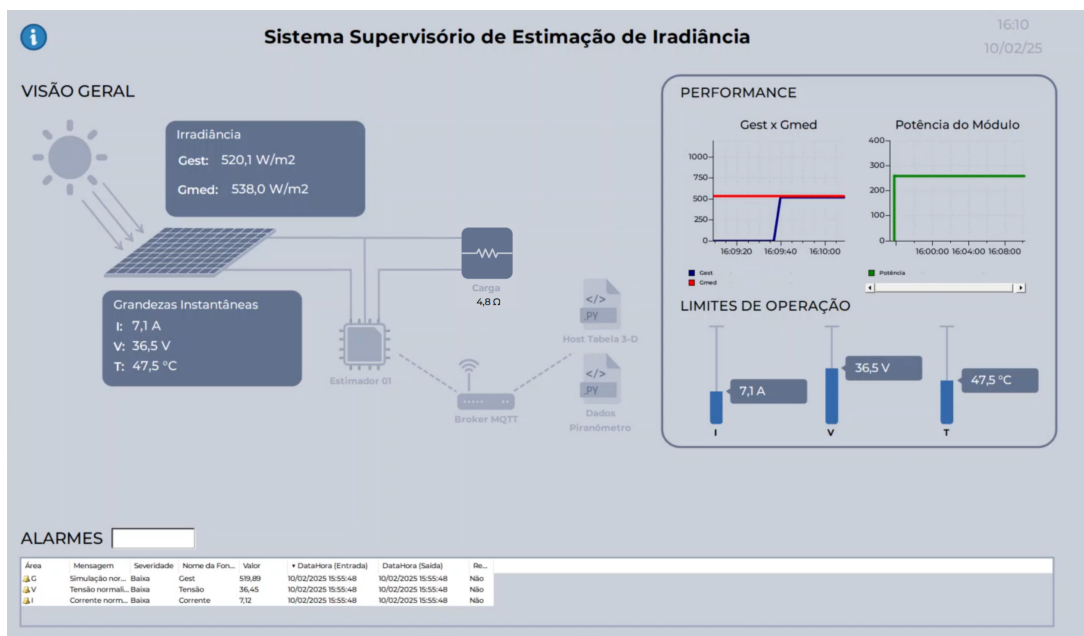
Fonte: (Próprio autor, 2025).

Figura 47 – IHM no teste experimental de condições ambientais ($G = 479\text{W}/\text{m}^2$ e $T = 46^\circ\text{C}$).



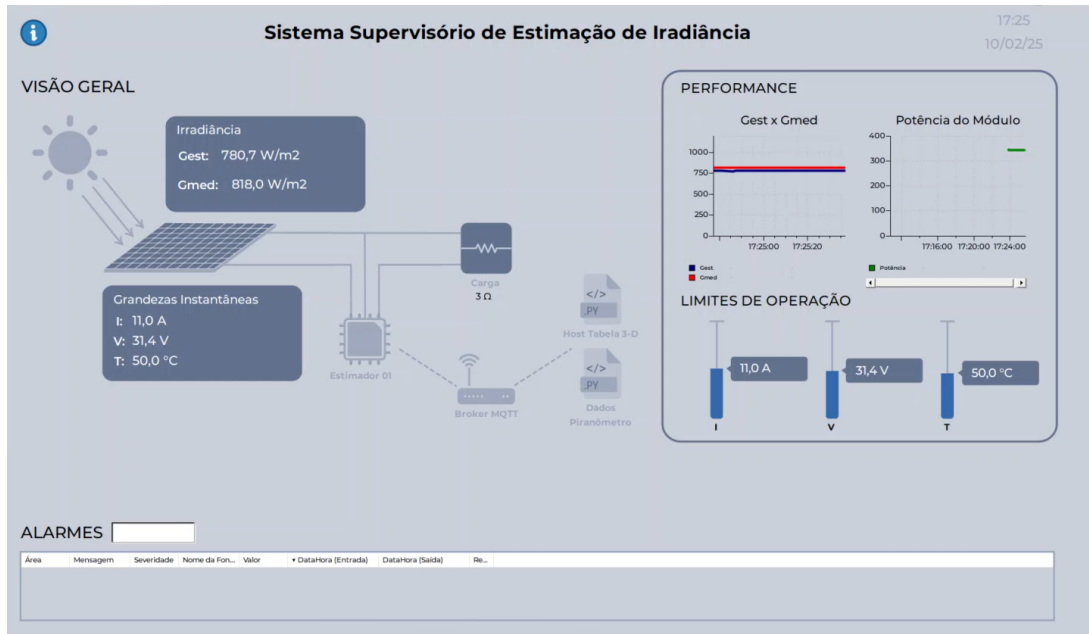
Fonte: (Próprio autor, 2025).

Figura 48 – IHM no teste experimental de condições ambientais ($G = 538\text{W}/\text{m}^2$ e $T = 47^\circ\text{C}$).



Fonte: (Próprio autor, 2025).

Figura 49 – IHM no teste experimental de condições ambientais ($G = 818 \text{ W/m}^2$ e $T = 50^\circ \text{C}$).



Fonte: (Próprio autor, 2025).

5.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os testes realizados comprovaram que todo o circuito de sensoramento funcionou conforme esperado, garantindo a correta aquisição e conversão dos sinais necessários para a estimação de irradiância. As simulações permitiram obter uma tabela 3-D de soluções precisa para diversos níveis de tensão do módulo fotovoltaico, especialmente nas condições de máxima potência, assegurando a confiabilidade do método proposto.

Além disso, a implementação e validação da comunicação confirmaram o correto funcionamento do protocolo MQTT entre os dispositivos do sistema, garantindo a funcionalidade do protocolo na aplicação deste trabalho. A interface homem-máquina projetada também foi validada, demonstrando sua capacidade de supervisão de forma intuitiva. Por fim, os testes experimentais mostraram que o estimador de irradiância respondeu adequadamente às diferentes condições ambientais analisadas. Essas análises confirmaram que o sistema desenvolvido operou conforme planejado, demonstrando sua viabilidade e estabelecendo uma base sólida para futuras otimizações e aplicações em ambientes reais.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi realizada uma análise acerca de estimadores de irradiância na literatura, com o objetivo de avaliar a técnica mais adequada aos critérios estabelecidos como ideais para um dispositivo estimador de irradiância. Constatou-se que o estimador proposto por Barbosa et al. (2024) apresentou boas características de custo, precisão e eficiência quando comparado às demais soluções avaliadas, sendo, portanto, escolhido como base para o desenvolvimento do estimador neste TCC.

A partir de uma abordagem proativa na identificação e avaliação das limitações do dispositivo desenvolvido por (BARBOSA et al., 2024), foi possível determinar pontos de aperfeiçoamento do protótipo. As melhorias identificadas concentraram-se, principalmente, em melhorias no *hardware* e na implementação da comunicação IoT.

Com base na engenharia de requisitos realizada, foi possível desenvolver um estimador de irradiância que conta com um *hardware* robusto, alta precisão no sensoriamento das grandezas, comunicação remota implementada e processamento de dados distribuído. Esse último aspecto viabilizou o uso de uma tabela tridimensional de soluções que excede a capacidade de armazenamento do microcontrolador, permitindo estimativas mais precisas.

O estimador proposto foi integrado a um sistema supervisório, e uma IHM eficiente e intuitiva foi desenvolvida. A interface foi projetada seguindo princípios e diretrizes voltados ao design de interfaces industriais, sendo estruturada de acordo com a aplicação e as necessidades do usuário. Dessa forma, o conceito foi validado, demonstrando sua aplicabilidade e viabilidade.

Finalmente, os testes experimentais comprovaram o correto funcionamento da comunicação entre o sistema estimador de irradiância, o sistema supervisório e dispositivos adicionais, como o piranômetro da PVA-1000S, evidenciando a flexibilidade e escalabilidade do protocolo MQTT. Além disso, a validação experimental demonstrou que o estimador de irradiância obteve um MAPE de 3,45% nas condições testadas, valor inferior ao parâmetro estabelecido de 3,60%. Embora as condições do experimento tenham sido limitadas, os resultados indicam a correta operação do algoritmo e sua adequação aos requisitos definidos, fornecendo uma base para aprimoramentos futuros e aplicações em cenários reais.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

A seguir, destacam-se algumas sugestões de trabalhos futuros relacionados ao que foi desenvolvido neste trabalho de conclusão de curso:

- Integrar uma IHM *low cost* ao estimador de irradiância com comunicação via MQTT, considerando que a solução implementada, Eclipse E3, é um *software* proprietário;

- Realizar medições experimentais em campo com um módulo fotovoltaico operando em condições ambientais reais;
- Desenvolver uma PCB dedicada, utilizando uma caixa patola padronizada para um tamanho de mercado;
- Inserir um sensor de temperatura mais próximo ao módulo fotovoltaico, visando maior precisão na estimativa;
- Aplicar a técnica de *lookup table* em conjunto com um algoritmo MPPT, permitindo a identificação das condições de máxima potência na mesma estrutura de comunicação;
- Viabilizar a implementação de tabelas 3-D de soluções considerando parâmetros de envelhecimento, possibilitando a adaptação do estimador à degradação dos módulos ao longo do tempo;
- Conforme forem desenvolvidas tabelas para diferentes módulos, compilar um *dataset* de modelos comerciais, a fim de facilitar o processo de instalação do estimador de irradiância;
- Realizar uma análise comparativa entre os algoritmos de estimativa estudados, implementando-os no hardware do sistema desenvolvido neste trabalho;
- Realizar uma análise comparativa entre diferentes MGNs aplicados à técnica de estimativa de irradiância desenvolvida neste trabalho;
- Realizar testes em laboratório com emulação de módulo FV, submetendo o estimador de irradiância a condições de sombreamento para avaliar seu desempenho;
- Avaliar o funcionamento do sistema estimador de irradiância em configurações de módulos FV conectados em série e/ou paralelo, considerando os efeitos da interconexão elétrica e como o sombreamento parcial pode afetar o desempenho do arranjo.

REFERÊNCIAS

- ALARCON-MAZA, K.; HERRERA-PEREZ, V.; RODRIGUEZ-FLORES, J.; PACHECO-CUNDURI, M.; HERNANDEZ-AMBATO, J. Design and experimental validation of an iot data-logger device for indirect measurement of solar irradiance based on a correlation model. In: *2023 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*. Denver, CO, USA: IEEE, 2023. p. 40–45.
- ANDERSON, M. *O que são Sistemas Supervisórios?* 2021. Acesso em: 18 de dez. de 2024. Disponível em: <<https://www.automacaoindustrial.info/o-que-sao-sistemas-supervisorios/>>.
- AUFRANC, J.-L. *ESP8266 and ESP32 Differences in One Single Table*. 2016. Acesso em: 06 fev. 2025. Disponível em: <<https://www.cnx-software.com/2016/03/25/esp8266-and-esp32-differences-in-one-single-table/>>.
- BARBOSA, E. J. *Técnicas de Seguimento do Ponto de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaicos Baseadas nos Modelos Globais Não Lineares de Um e Dois Diodos*. Tese (Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.
- BARBOSA, E. J.; AZEVEDO, G. M. d. S.; CAVALCANTI, M. C.; CAVALCANTE, V. M.; BRADASCHIA, F.; LIMONGI, L. R. Junction box-integrated irradiance estimator for photovoltaic modules based on iot technology. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 71, n. 11, p. 14135–14145, 2024.
- CANADIAN SOLAR. *Technical Specification - CS6W-MS*. 2023. Acesso em: 11 de mar. de 2025. Disponível em: <[https://minhacasasolar.fbtsstatic.net/media/1-ficha_t%C3%A9cnica_-_cs6w-ms_-_v2.71_\(en\).pdf](https://minhacasasolar.fbtsstatic.net/media/1-ficha_t%C3%A9cnica_-_cs6w-ms_-_v2.71_(en).pdf)>.
- CARRASCO, M.; MANCILLA-DAVID, F.; ORTEGA, R. An estimator of solar irradiance in photovoltaic arrays with guaranteed stability properties. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 61, n. 7, p. 3359–3366, 2014.
- CARVALHO, I. F. *Técnicas de Estimção de Irradiância a Partir de Dados de Módulos Fotovoltaicos*. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.
- CHOUAY, Y.; OUASSAID, M. An accurate real time neural network based irradiance and temperature sensor for photovoltaic applications. *Results in Engineering*, Elsevier B.V., v. 21, p. 101766, 2024. ISSN 2590–1230. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024000197>>.
- CIRIUS QUALITY. *O que é: Engenharia de Requisitos*. 2023. Acesso em: 08 fev. 2025. Disponível em: <<https://cirusquality.com.br/glossario/o-que-e-engenharia-de-requisitos/>>.
- EBRAHIMI, S. M.; SALAHSHOUR, E.; MALEKZADEH, M.; GORDILLO, F. Parameters identification of pv solar cells and modules using flexible particle swarm optimization algorithm. *Energy*, Elsevier B.V., v. 179, p. 358–372, 2019. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219308588>>.

ELIPSE SOFTWARE. *What are Supervisory Systems?* 2019. Acesso em: 18 de dez. 2024. Disponível em: <<https://kb.elipse.com.br/en/what-are-supervisory-systems/>>.

EYRING, V.; GILLET, N. P.; RAO, K. M. A.; BARIMALALA, R.; PARRILLO, M. B.; BELLOUIN, N.; CASSOU, C.; DURACK, P. J.; KOSAKA, Y.; MCGREGOR, S.; MIN, S.; MORGENSTERN, O.; SUN, Y. Human influence on the climate system. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PéAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M. I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J. B. R.; MAYCOCK, T. K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇI, O.; YU, R.; ZHOU, B. (Ed.). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge, Reino Unido e Nova Iorque, EUA: Cambridge University Press, 2021. cap. 3, p. 423–552. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-3/>>.

FIGUEIREDO, L. A. d. *Desenvolvimento de uma Interface Homem-Máquina (IHM) Industrial de Alta Performance Baseada no Estudo da Norma ISA-101 Aplicada a Processos de Mineração*. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.

FOSTER, R.; GHASSEMI, M.; COTA, A. *Solar Energy: Renewable Energy and the Environment*. 1. ed. [S.l.]: CRC Press, 2009.

GHOLAMI, A.; AMERI, M.; ZANDI, M.; GHACHANI, R. G.; PIERFEDERICI, S.; KAZEM, H. A. Step-by-step guide to model photovoltaic panels: An up-to-date comparative review study. *IEEE Journal of Photovoltaics*, v. 12, n. 4, p. 915–928, 2022.

GOETZ, H. F. *Metodologia para Desenvolvimento de IHMs de Alta Performance Visual*. 2019. Acesso em: 03 de jan. de 2025. Disponível em: <<https://kb.elipse.com.br/metodologia-para-desenvolvimento-de-ihms-de-alta-performance-visual/>>.

GUPTA, J. A history of international climate change policy. *WIREs Climate Change*, v. 1, n. 4, p. 636–653, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/wcc.58>>.

HAJJI, M.; YAHYAUI, Z.; MANSOURI, M.; NOUNOU, H.; NOUNOU, M. Fault detection and diagnosis in grid-connected pv systems under irradiance variations. *Energy Reports*, v. 9, p. 4005–4017, 2023. ISSN 2352-4847. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235248472300272X>>.

ISA, D. . G. S. *Introdução à Norma ISA-101: Interfaces Homem Máquina*. 2016. III Simpósio ISA São Paulo - Sabesp. Acesso em: 30 de dez. de 2024. Disponível em: <<https://isasp.org.br/wp-content/uploads/2020/01/ISA-101-III-Simp%C3%B3sio-ISA-S%C3%A3o-Paulo-Sabesp-Nov2016.pdf>>.

JUNIOR, A. J. D. N. *Contribuição à Modelagem de Módulos Fotovoltaicos e Proposta de uma Técnica Híbrida de Seguimento do Ponto de Máxima Potência com Estimador de Irradiância*. Tese (Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

JUNIOR, A. J. D. N. *Contribuição à Modelagem de Módulos Fotovoltaicos e Proposta de uma Técnica Híbrida de Seguimento do Ponto de Máxima Potência com Estimador de Irradiância*. Tese (Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

- JUNIOR, V. M. C. *Análise Comparativa de Modelos Globais Não-lineares para Módulos Fotovoltaicos*. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.
- LANG, Z.; ZHANG, Y. Parameter identification and performance estimation for pv modules based on reduced forms model. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 12, n. 5, Setembro 2020.
- LAZZARETTI, A. E.; COSTA, C. H. d.; RODRIGUES, M. P.; YAMADA, G. D.; LEXINOSKI, G.; MORITZ, G. L.; OROSKI, E.; GOES, R. E. d.; LINHARES, R. R.; STADZISZ, P. C.; OMORI, J. S.; SANTOS, R. B. d. A monitoring system for online fault detection and classification in photovoltaic plants. *Sensors*, v. 20, n. 17, 2020. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/17/4688>>.
- LU, H.; ZHANG, Y.; HAO, P.; MA, J.; ZHONG, H.; GU, T.; YANG, M.; ZHANG, L. Output performance prediction of pv modules based on power-law model from manufacturer datasheet. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 14, n. 3, Maio 2022.
- MADUREIRA, V. S.; CHAGAS, T. P. D.; JESUS, G. Q. D. Solar irradiance estimation using kalman filter. *Journal of Control Automation and Electrical Systems*, v. 31, p. 1447–1457, Outubro 2020.
- MEIRA, C.; VICENTE, E.; VICENTE, P.; TOFOLI, F. Análise comparativa de medidores de irradiância. In: . [S.l.: s.n.], 2018.
- OYELAMI, S.; AZEEZ, N. A.; ADEDIGBA, S.; AKINOLA, O.; AJAYI, R. A pyranometer for solar radiation measurement-review. v. 3, p. 61–68, dezembro 2020.
- PIMENTEL, D. D. O. *Estimação de Parâmetros de Módulos Fotovoltaicos Utilizando Métodos de Otimização Baseado em Metaheurística*. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.
- RISDIYANTO, A.; KRISTI, A. A.; JUNAEDI, A.; SUSANTO, B.; RACHMAN, N. A.; MUQOROBIN, A.; SANTOSA, H. P.; FUDHOLI, A. Performance of low-cost solar radiation logger. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, v. 13, n. 4, p. 3885–3894, 2023.
- ROCHA, N. P. *Desenvolvimento de uma Planta Didática Baseada em CubeSat*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2024.
- SANTOS, S. *ESP32 vs ESP8266 – Pros and Cons*. 2021. Acesso em: 05 fev. 2025. Disponível em: <<https://makeradvisor.com/esp32-vs-esp8266/>>.
- SCRIVEN, Z. *2 Tricks for more effective HMI screens*. 2016. Acesso em: 02 de jan. de 2025. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/2-tricks-more-effective-hmi-screens-zack-scriven>>.
- SENSENBACH, R. *HMI Extreme Makeover: Customizing a Navigation System for Your Industrial Interface*. 2018. Acesso em: 30 de dez. de 2024. Disponível em: <<https://inductiveautomation.com/blog/hmi-extreme-makeover-customizing-a-navigation-system-for-your-industrial-interface>>.

SHIBUYA, M. K.; LEI, G. H. M. Desenvolvimento de medidor de irradiância e irradiação solar de baixo custo para fins didáticos. *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS*, p. 1–8, agosto 2022. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1083>>.

SILVA, E. A.; BRADASCHIA, F.; CAVALCANTI, M. C.; NASCIMENTO, A. J.; MICHELS, L.; PIETTA, L. P. An eight-parameter adaptive model for the single diode equivalent circuit based on the photovoltaic module's physics. *IEEE Journal of Photovoltaics*, IEEE, v. 7, n. 4, p. 1115–1123, 2017.

SILVA, E. A. da. *Proposta de um Modelo Global Não-Linear para Caracterização do Comportamento Elétrico de Células Fotovoltaicas*. Tese (Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

VIEIRA, L. L. *Desenvolvimento de Interfaces Homem-Máquina de Alta Performance*. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

VILLALVA, M. *Entendendo as Curvas IV e PV dos Módulos Fotovoltaicos*. 2019. Acesso em: 16 de dez. 2024. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/entendendo-as-curvas-iv-e-pv-dos-modulos-fotovoltaicos/>>.

VILLALVA, M. G. *Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações*. 2. ed. São Paulo: Érica, 2015.

WALTERS, L. *HMI Redesign: Give Your Screens A Performance User-Experience Make-over*. 2018. Acesso em: 30 de dez. de 2024. Disponível em: <<https://inductiveautomation.com/blog/hmi-extreme-makeover-redesigning-hmis-performance-and-user-experience>>.

WENDLING, M. *Amplificadores Operacionais*. Guaratinguetá, SP, 2010. Acesso em: 08 fev. 2025. Disponível em: <<https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/3---amplificadores-operacionais-v2.0.pdf>>.

YADAV, G.; PAUL, K. Architecture and security of scada systems: A review. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, v. 34, 2021. ISSN 1874-5482.

YILDIZ, T.; GOL, M. A malfunction detection method for pv systems. In: *2019 IEEE Milan PowerTech*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.

ZANGHI, E. Sistemas scada: Conceitos. 09 2019.

ZHANG, Y.; HAO, P.; LU, H.; GU, T.; YANG, M. A novel method for performance estimation of photovoltaic module without setting reference condition. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, v. 134, n. 3, Janeiro 2022.

APÊNDICE A – REPOSITÓRIO DE ACESSO AOS ARQUIVOS DO SISTEMA

Os arquivos utilizados no sistema proposto foram disponibilizados em um repositório público no GitHub, visando garantir a transparência da pesquisa e possibilitar a reprodutibilidade dos experimentos. O repositório pode ser acessado no seguinte link:

<https://github.com/pedro-eustachio/TCC-PH>

Os arquivos disponibilizados incluem: código utilizado no microcontrolador ESP32; *scripts* em Python para a estimação de irradiância e para coleta de dados do piranômetro; arquivos de simulação no MATLAB, relativos ao MGNL e à *lookup table*); arquivos necessários para a reprodução do sistema supervisorio no Elipse E3; e outros arquivos adicionais, como textos explicativos.