

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA – DEE

IZABELA MENEGAZZO COSTA

**APRIMORAMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO SOLAR E
DESENVOLVIMENTO DE UM SENSORIAMENTO ÓPTICO PARA ANÁLISE DA
DINÂMICA SOLAR EM JOINVILLE (SC)**

JOINVILLE

2026

IZABELA MENEGAZZO COSTA

**APRIMORAMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO SOLAR E
DESENVOLVIMENTO DE UM SENSORIAMENTO ÓPTICO PARA ANÁLISE DA
DINÂMICA SOLAR EM JOINVILLE (SC)**

Trabalho apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Alessandro Luiz Batschauer

JOINVILLE

2026

,
Aprimoramento de um Sistema de Monitoramento Solar e
Desenvolvimento de um Sensoriamento Óptico para análise
da Dinâmica Solar em Joinville (SC) / Izabela Menegazzo
Costa. - Joinville, 2026.
86 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Alessandro Luiz Batschauer.

.
Monografia - Universidade do Estado de Santa Catarina,
Centro de Ciências Tecnológicas, Departamento de
Engenharia Elétrica, Joinville, 2026.

1. Palavra-chave. 2. Palavra-chave. 3. Palavra-chave.
4. Palavra-chave. 5. Palavra-chave. I. Batschauer,
Alessandro Luiz. II. , . III. Universidade do
Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências
Tecnológicas, Departamento de Engenharia Elétrica. IV.
Título.

IZABELA MENEGAZZO COSTA

**APRIMORAMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO SOLAR E
DESENVOLVIMENTO DE UM SENSORIAMENTO ÓPTICO PARA ANÁLISE DA
DINÂMICA SOLAR EM JOINVILLE (SC)**

Trabalho apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Alessandro Luiz Batschauer

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Alessandro Luiz Batschauer
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membros:

Prof. Dr. Felipe Joel Zimann
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Prof. Dr. Yales Rômulo de Novaes
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Joinville, 03 de Julho de 2026

RESUMO

A crescente demanda global por eletricidade e a urgência na mitigação dos impactos ambientais têm impulsionado a rápida expansão da matriz energética renovável, com forte destaque para a energia solar fotovoltaica. No entanto, a eficiência dessa fonte depende diretamente de fatores geoclimáticos, o que gera uma intermitência na geração de energia que é prejudicial à estabilidade da rede elétrica. Para mitigar essa instabilidade, é essencial compreender o funcionamento do céu e a sua dinâmica em relação às placas solares. Ao entender o comportamento e o trânsito das nuvens, torna-se possível antecipar as flutuações de radiação que atingem os painéis, auxiliando os operadores a equilibrar as cargas e evitar desequilíbrios no sistema elétrico. Diante desse cenário, este trabalho apresenta o aprimoramento de um sistema de monitoramento solar e desenvolvimento de um sensoriamento óptico para análise da dinâmica solar em Joinville (SC). A pesquisa realiza melhorias estruturais, eletrônicas e lógicas de uma infraestrutura preexistente de aquisição de dados e integra a coleta de piranômetros a um módulo de captura fotográfica automatizada. Por meio da aplicação de técnicas de processamento digital de imagens, o estudo visa correlacionar a dinâmica visual da atmosfera com as variações reais de radiação. Dessa forma, busca-se fornecer uma base de dados robusta e detalhada, capaz de subsidiar modelos de previsão de geração de alta precisão e contribuir para uma operação mais segura e eficiente das redes elétricas.

Palavras-chave: Irradiância Solar. Processamento Digital de Imagens. Efeito de Borda de Nuvem. Sistema Embarcado. Energia Fotovoltaica.

ABSTRACT

The growing global demand for electricity and the urgency to mitigate environmental impacts have driven the rapid expansion of the renewable energy matrix, with a strong emphasis on solar photovoltaic energy. However, the efficiency of this source depends directly on geoclimatic factors, which creates an intermittency in power generation that is detrimental to power grid stability. To mitigate this instability, it is essential to understand sky behavior and its dynamics in relation to solar panels. By understanding cloud behavior and transit, it becomes possible to anticipate the radiation fluctuations that hit the panels, helping operators balance loads and prevent imbalances in the electrical system. Given this scenario, this work presents the improvement of a solar monitoring system and the development of optical sensing for the analysis of solar dynamics in Joinville (SC), Brazil. The research performs structural, electronic, and logical upgrades to a pre-existing data acquisition infrastructure and integrates pyranometer data collection with an automated photographic capture module. Through the application of digital image processing techniques, the study aims to correlate the visual dynamics of the atmosphere with actual radiation variations. In this manner, it seeks to provide a robust and detailed database capable of supporting high-precision generation forecasting models and contributing to a safer and more efficient operation of power grids.

Keywords: Solar Energy. Photovoltaic Generation. Sky Monitoring. Digital Image Processing. Intermittency Mitigation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Oferta Interna de Energia 2015-2024.	13
Figura 2 – Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil.	15
Figura 3 – Perdas entre a energia disponibilizada pelo sol e à entregue a carga.	16
Figura 4 – Irradiância espectral solar	21
Figura 5 – Esquemático placa solar	26
Figura 6 – Hierarquia de estruturação de um sistema fotovoltaico	27
Figura 7 – Topologia das principais configurações de inversores e de strings	28
Figura 8 – Faixa espectral piranômetros	30
Figura 9 – Temperaturas máximas e mínimas médias de Joinville (2017-2025)	31
Figura 10 – Chuva mensal média em Joinville (2017-2025)	31
Figura 11 – Categorias de nebulosidade em Joinville (2017-2025)	32
Figura 12 – Média diária de energia solar de ondas curtas incidente em Joinville (2017-2025)	32
Figura 13 – Diagrama do sistema de aquisição completo.	38
Figura 14 – Deformações observadas no suporte dos sensores fabricado em PLA.	39
Figura 15 – Suporte estrutural dos sensores confeccionado em chapa de aço inoxidável.	41
Figura 16 – Suporte estrutural dos sensores confeccionado em chapa de aço inoxidável.	41
Figura 17 – Fluxograma de instalação do sistema operacional.	42
Figura 18 – Identificação das conexões entre os componentes da placa modular.	47
Figura 19 – Vista superior do invólucro externo com a instalação do sensor óptico.	51
Figura 20 – Comparativo unificado das trajetórias solares no sensor da câmera para o solstício de inverno, um dia de verão e equinócio em Joinville.	57
Figura 21 – Diagramas de dispersão e coeficientes de correlação para o Sensor (S1)-SP510 frente às variáveis da EPAGRI: (a) Radiação Média, (b) Umidade Relativa e (c) Temperatura do Ar.	63
Figura 22 – Diagramas de dispersão e coeficientes de correlação para o Sensor (S2)-SP215 frente às variáveis da EPAGRI: (a) Radiação Média, (b) Umidade Relativa e (c) Temperatura do Ar.	64
Figura 23 – Diagrama de dispersão e correlação entre o sensor de temperatura do protótipo e a Temperatura do Ar da EPAGRI.	65
Figura 24 – Diagrama de dispersão comparativo direto entre o Sensor S1 (SP510) e o Sensor S2 (SP215), evidenciando o laço de histerese diurna decorrente do desvio espectral atmosférico.	67
Figura 25 – Perfil diário de irradiância e temperatura para o dia 24 de setembro de 2025, evidenciando flutuações severas e picos de sobreirradiância.	69
Figura 26 – Painel de processamento incorreto para o cenário de pôr do sol, evidenciando a saturação errônea da máscara devido aos tons avermelhados do crepúsculo.	70

Figura 27 – Painel de processamento bem-sucedido para o cenário de céu com nuvens e sem sol direto, exibindo a correta segmentação da maior parte da massa nebulosa.	71
Figura 28 – Distribuição estatística dos pixels por faixas de nebulosidade para o cenário de céu encoberto por nuvens e sem sol direto.	72
Figura 29 – Painel de processamento adaptativo utilizando o espaço de cores HSV, evidenciando a decomposição da imagem nos canais de matriz, saturação e valor para a segmentação de nuvens densas.	73
Figura 30 – Esquemático do circuito eletrônico utilizado.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação da intensidade da correlação linear de Pearson.	34
Tabela 2 – Dados experimentais de condicionamento de sinal do circuito do sensor SP510.	48
Tabela 3 – Dados experimentais do ensaio de atenuação e linearidade do circuito divisor de tensão para o sensor SP215.	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIE	Agência Internacional de Energia
AM	Air Mass (Massa de ar)
BEN	Balanço Energético Nacional
BU	Biblioteca Universitária
CA	Corrente Alternada
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CC	Corrente Contínua
CCT	Centro de Ciências Tecnológicas
CCRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
COP	Conference of the Parties (Conferência das Partes)
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FV	Fotovoltaico
IEA	International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)
IN	Instrução Normativa
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima)
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização)
MME	Ministério de Minas e Energia
MMGD	Micro e Minigeração Distribuída
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência)
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
SC	Santa Catarina
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima)
WMO	World Meteorological Organization (Organização Meteorológica Mundial)

LISTA DE SÍMBOLOS

@	Arroba
%	Porcento
°C	Graus Celsius
W/m ²	Watt por metro quadrado
S	Irradiância solar (W/m ²)
θ	Ângulo zenital solar
p-n	Junção positiva-negativa (em semicondutores)
MW	Megawatt
TWh	Terawatt-hora
W	Watt
m ²	Metro quadrado
°	Grau (ângulo)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	ENERGIA SOLAR E IRRADIÂNCIA	20
2.1.1	Conceito de radiação solar	20
2.1.2	Espectro da radiação solar	20
2.1.3	Principais fatores geoclimáticos que influenciam a fotogeração	22
2.2	SISTEMA FOTOVOLTAICO	25
2.2.1	Placa Fotovoltaica	25
2.2.2	Inversor e micro inversor	26
2.2.2.1	<i>MPPT</i>	<i>27</i>
2.2.2.2	<i>Topologias</i>	<i>27</i>
2.3	MONITORAMENTO DA IRRADIÂNCIA SOLAR	28
2.3.1	Piranômetro termopilha	29
2.3.2	Piranômetro fotoelétricos	29
2.4	LOCALIZAÇÃO E CLIMA	30
2.5	TÉCNICAS DE PRÉ-PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS	33
2.5.1	Fundamentos de <i>Outliers</i> e <i>Aliasing</i>	33
2.5.2	Análise de Correlação Linear de Pearson	33
2.6	VULNERABILIDADES DA REDE FRENTE À GERAÇÃO SOLAR	34
3	APRIMORAMENTOS REALIZADOS NO SISTEMA DE MONITORAMENTO	36
3.1	SUORTE ESTRUTURAL DOS SENSORES DE IRRADIÂNCIA	39
3.2	ANÁLISE DE FALHA DO SUBSISTEMA DE ARMAZENAMENTO	41
3.3	RECONFIGURAÇÃO DO SISTEMA E OTIMIZAÇÃO DO ACESSO REMOTO	42
3.4	OTIMIZAÇÃO DINÂMICA DA JANELA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	44
3.4.1	Automação de Inicialização e Estratégia de Redundância do Sistema	45
3.5	COMISSIONAMENTO E CALIBRAÇÃO DO MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE SINAIS	46
3.5.1	Canal de Amplificação Diferencial do Piranômetro SP510	46
3.5.2	Canal de Atenuação de tensão do Piranômetro SP215	48

3.5.3	Integração do Módulo de Captura Óptica e Invólucro de Proteção . . .	49
3.6	ESTIMATIVA DE COBERTURA DE NUVENS POR PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	51
3.6.1	Método baseado na Razão entre os Canais Vermelho e Azul (R/B)	52
3.6.2	Método baseado no Espaço de Cores HSV	53
3.6.3	Refinamento por Operações Morfológicas de Abertura	54
3.6.4	Calibração Espacial da Trajetória Solar para Tratamento do Efeito de Borda das Nuvens	55
3.7	GERENCIAMENTO DE INFRAESTRUTURA DE NUVEM E EFICIÊN- CIA VOLUMÉTRICA DE IMAGENS	57
3.8	METODOLOGIA DE VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL	60
3.8.1	Tratamento de Frequência de Amostragem e Sincronização Temporal .	60
3.8.2	Análise Estatística e Métricas de Desempenho	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1	ANÁLISE DE CORRELAÇÃO E VALIDAÇÃO FRENTE À ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA	62
4.2	ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA INTERNA E RESPOSTA ESPECTRAL INTER-SENSORES	65
4.3	ANÁLISE COMPARATIVA INTER-SENSORES DO PROTÓTIPO	67
4.3.1	Dinâmica Atmosférica Intermitente e o Impacto da Nebulosidade Global	68
4.4	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS ALGORITMOS DE ESTIMATIVA DE COBERTURA DE NUVENS	69
4.4.1	Análise Exploratória e Segmentação no Domínio HSV	72
5	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	78
	ANEXO A – ESQUEMÁTICO GERAL DO SISTEMA	86

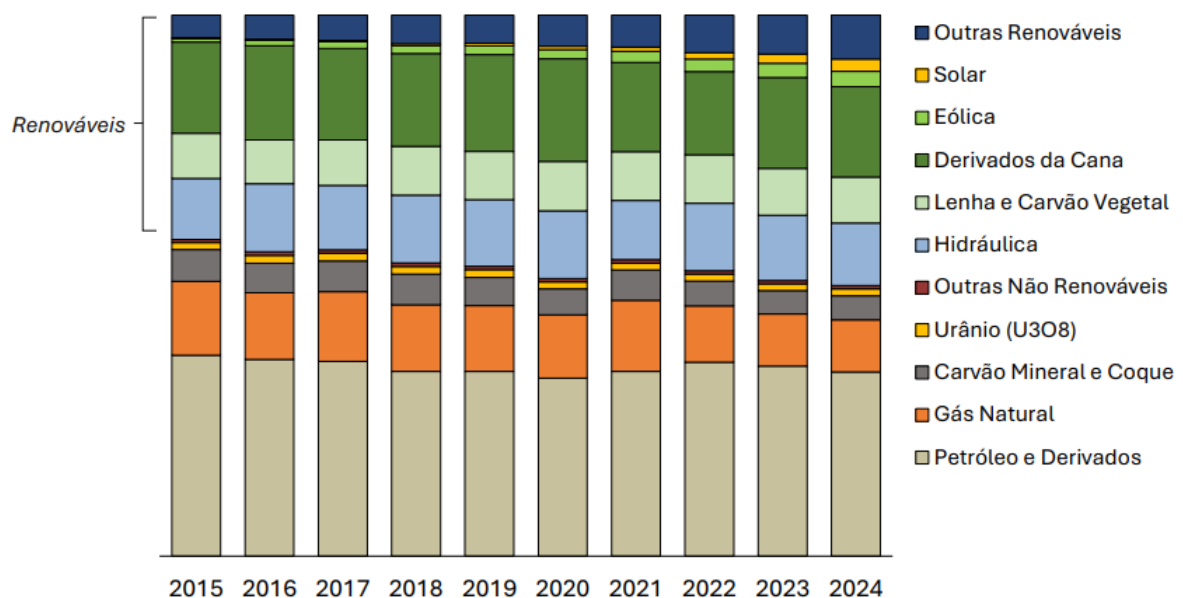
1 INTRODUÇÃO

No atual cenário de globalização e tecnologias emergentes de automação industrial, da mobilidade elétrica e do consumo residencial de equipamentos eletrônicos, é evidente o aumento do consumo de energia elétrica. Nesse contexto, o relatório final do Balanço Energético Nacional (BEN) da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) relata uma expansão de 5,5% do consumo final de energia elétrica no Brasil do ano de 2024 (EPE, 2025). Esse fenômeno, contudo, não se restringe ao contexto nacional, em âmbito global, a demanda por eletricidade apresentou um aumento de 4,3% em 2024, ultrapassando o crescimento anterior de 2,5% registrado em 2023 (IEA, 2025).

A relação intrínseca entre a modernização tecnológica e o crescente aumento da demanda energética evidencia a necessidade de ampliar a oferta de energia elétrica, de modo a acompanhar o ritmo de expansão do consumo e garantir a segurança energética do país. Dados apresentados por EPE (2025), referentes à oferta interna de energia de toda a matriz energética brasileira, ilustrados na Figura 1, demonstram que, ao longo da última década, houve uma expansão significativa das fontes renováveis, as quais, em 2024, passaram a representar aproximadamente 50% da matriz energética nacional.

Apesar desse avanço, uma parcela expressiva da matriz primária brasileira ainda é sustentada por recursos não renováveis, como petróleo, carvão mineral e gás natural. Tal dependência suscita preocupações quanto à sustentabilidade do modelo energético vigente, uma vez que esses combustíveis fósseis são finitos e, além de apresentarem risco de esgotamento, seu uso intensivo contribui para impactos ambientais de grande relevância (Rinkesh, 2020).

Figura 1 – Oferta Interna de Energia 2015-2024.



Fonte: (EPE, 2025).

Em 2024, as emissões globais de dióxido de carbono provenientes de combustíveis fósseis alcançaram aproximadamente 37,4 bilhões de toneladas, podendo superar 41 bilhões de toneladas quando consideradas mudanças no uso da terra e desmatamento (Global Carbon Project, 2024). As consequências desse cenário já são observadas em diferentes dimensões ambientais. A intensificação de eventos climáticos extremos, a acidificação dos oceanos, a perda de biodiversidade e a redução da capacidade dos sumidouros naturais de carbono, como florestas e solos, demonstram a urgência de mudanças estruturais no modelo de produção e consumo de energia (IPCC, 2023).

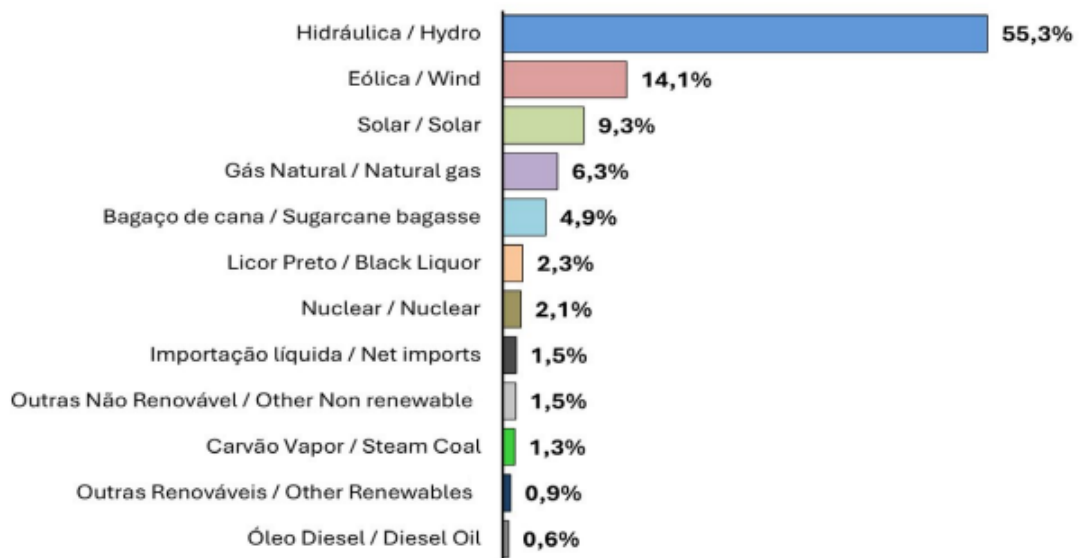
Visando mitigar esses impactos ambientais, a comunidade internacional tem buscado soluções por meio de compromissos multilaterais, como o Acordo de Paris, firmado em 2015 por mais de 190 países, que estabelece a meta de limitar o aquecimento global a valores bem abaixo de 2°C, preferencialmente 1,5°C, em relação aos níveis pré-industriais (UNFCCC, 2015). Esses compromissos são discutidos e revisados anualmente nas Conferências das Partes (COP), que reúnem os países signatários da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) para avaliar progressos, ajustar metas e propor novas estratégias globais de mitigação e adaptação (UNFCCC, 2025).

A volatilidade dos preços das fontes não renováveis, como carvão, petróleo e gás natural, representa um risco significativo para a estabilidade dos sistemas energéticos. Essa instabilidade de preços, frequentemente associada a fatores geopolíticos e flutuações de oferta e demanda, tende a pressionar os custos da energia, impactando diretamente a competitividade econômica e o bem-estar social. Assim, a dependência contínua dessas fontes aumenta a vulnerabilidade das economias às crises internacionais, podendo gerar instabilidade política e riscos de segurança energética tanto na conjuntura atual quanto nas perspectivas de médio e longo prazo (Yasmeen, 2024).

Diante desse cenário, marcado pelo aumento da demanda global por energia, pela intensificação dos impactos ambientais e pela vulnerabilidade associada à dependência de combustíveis fósseis, torna-se evidente a necessidade de transformação estrutural do setor energético. Nesse contexto, as fontes renováveis consolidam-se como alternativas estratégicas, capazes de reduzir emissões de gases de efeito estufa, fortalecer a segurança energética nacional e global, além de contribuir para a estabilidade dos custos de eletricidade, promovendo um modelo de desenvolvimento mais sustentável e resiliente (Algarni et al., 2023).

O Brasil apresenta um panorama muito promissor em relação à sua matriz energética pois já apresenta alta participação de fontes renováveis e possui um grande potencial de desenvolvimento, conferindo vantagens estratégicas em termos de segurança energética e sustentabilidade (EPE, 2025). Como apresentado na Figura 2, as fontes renováveis representam 88,0% da oferta interna de eletricidade no Brasil. Esse índice expressivo é alcançado pela ampla diversidade de geração limpa interna, englobando a hidráulica, eólica, solar, bagaço de cana, licor preto e outras renováveis, a além da parcela predominantemente renovável oriunda da importação líquida. Políticas públicas e marcos regulatórios têm buscado consolidar essa trajetória, promovendo a

Figura 2 – Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil.



Fonte: (EPE, 2025).

diversificação da matriz e garantindo o atendimento da crescente demanda de eletricidade de forma sustentável (MME, 2023).

Dentro desse contexto de diversificação, destacam-se diferentes fontes renováveis, como a hídrica, a eólica e a solar, cada uma contribuindo de maneira relevante para a segurança do sistema elétrico nacional (EPE, 2025). Entretanto, a energia solar fotovoltaica vem se consolidando como uma das fontes renováveis mais promissoras para atender à crescente demanda energética mundial, em função de sua abundância, baixo impacto ambiental, redução dos custos tecnológicos e avanço das políticas de incentivo (Villarreal, 2022).

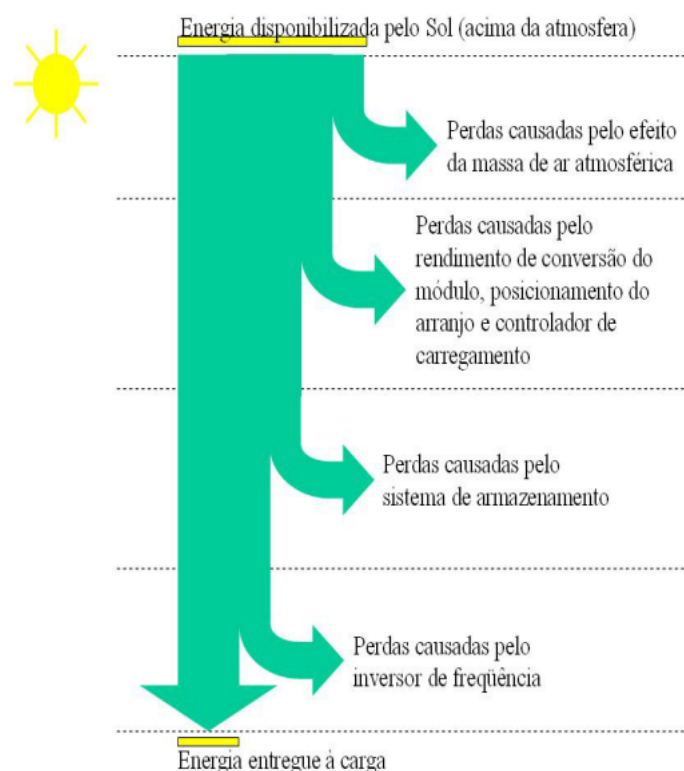
Conforme projeções da Agência Internacional de Energia (International Energy Agency – IEA), a fonte solar deverá ser responsável por aproximadamente 80% da expansão líquida da capacidade instalada de geração renovável em escala global, no intervalo compreendido entre os anos de 2024 e 2030 (IEA, 2024). No ano de 2024, a produção de eletricidade proveniente da fonte solar totalizou 70,7 TWh, correspondendo a uma expansão de 39,6% em relação ao volume gerado em 2023. Paralelamente, a capacidade instalada de geração fotovoltaica nacional apresentou crescimento de 28,1% no mesmo período, resultando em uma potência operacional de 48.468 MW. Esse montante contempla tanto as usinas de geração centralizada quanto as unidades de micro e mini geração distribuída (MMGD) (EPE, 2025).

A abundância da energia solar se destaca como um dos principais fatores que evidenciam o grande potencial de crescimento desse recurso. Estima-se que o Sol irradie, em média, cerca de 174 petawatts para a Terra na região superior da atmosfera, sendo parte dessa radiação refletida de volta ao espaço (Betini; Castagna; Tiepolo, 2012). Embora a exploração integral do potencial solar incidente seja inviável, o desenvolvimento de tecnologias de captação e conversão de energia solar é amplamente promissor. Esta prioridade é corroborada pelo aumento da demanda energética global que já ultrapassou 30.000 TWh em 2024 (Ember, 2025).

O aproveitamento da energia solar para a geração de eletricidade ocorre predominantemente por meio de sistemas fotovoltaicos. Esses sistemas convertem diretamente a radiação solar em energia elétrica, sendo amplamente utilizados devido à sua viabilidade técnica e econômica. Entre as principais vantagens destacam-se o baixo custo de operação e manutenção, comparado a outras fontes renováveis e a possibilidade de instalação em diferentes escalas e localidades. Além disso, a geração fotovoltaica favorece o conceito de energia distribuída, permitindo que a eletricidade seja produzida próxima ao local de consumo, o que reduz perdas na transmissão e aumenta a confiabilidade do sistema elétrico (Balfour; Shaw; Nash, 2016).

A eficiência dos sistemas fotovoltaicos está diretamente relacionada à quantidade de energia solar que atinge a superfície terrestre e à capacidade das células em converter essa radiação em eletricidade. Apesar de a Terra receber cerca de 1.366 W/m^2 de irradiância solar fora da atmosfera, parte significativa dessa energia é refletida, espalhada ou absorvida durante a passagem pela atmosfera, resultando em uma potência média de aproximadamente 1.000 W/m^2 em condições ideais ao nível do solo. Além dessas perdas naturais entre o Sol e a superfície terrestre, o rendimento final dos sistemas fotovoltaicos é limitado por fatores intrínsecos ao próprio processo de conversão, como ilustrado na Figura 3 (Knabben, 2017) (Alley et al., 2022).

Figura 3 – Perdas entre a energia disponibilizada pelo sol e à entregue a carga.



Fonte: (Vitti; Alvares, 2006).

A evolução tecnológica no setor fotovoltaico tem estabelecido novos recordes de eficiência. No mercado convencional, a eficiência dos painéis de silício monocristalino apresentou

um salto expressivo na última década, aumentando de cerca de 17% para patamares que hoje tangenciam os 25%. Em escala de pesquisa, as células promissoras de perovskita pura já registram 26,9% de eficiência, valor que sobe para 35,2% quando combinadas ao silício em estruturas *tandem*. Por fim, no topo do desempenho laboratorial, encontram-se as células multijunção, formadas por várias camadas que absorvem cores diferentes da luz, que atingem 47,6% de eficiência na célula, quando esses componentes são montados com lentes na estrutura completa de um módulo, a eficiência alcança 38,9% (Fraunhofer ISE, 2026).

Entretanto, o desempenho real é afetado por fatores ambientais e operacionais, como temperatura elevada, sombreamento parcial, acúmulo de sujeira, degradação dos materiais e perdas elétricas nos condutores e inversores. Essas limitações reduzem a energia efetivamente entregue à rede ou ao ponto de consumo, sendo essenciais para a análise do rendimento global e da viabilidade de sistemas fotovoltaicos (Balfour; Shaw; Nash, 2016).

Devido à baixa eficiência dos painéis fotovoltaicos disponíveis comercialmente, torna-se fundamental realizar uma análise detalhada da viabilidade de sistemas fotovoltaicos, visando o aproveitamento máximo da energia solar. Essa avaliação depende diretamente do conhecimento preciso sobre a disponibilidade, a variabilidade temporal e a distribuição espacial da radiação solar em uma determinada localidade (Balfour; Shaw; Nash, 2016). Nesse contexto, o mapeamento solar constitui uma ferramenta essencial para subsidiar o dimensionamento adequado dos sistemas fotovoltaicos, estimar a geração de energia elétrica, bem como sistemas de controle e rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT -Maximum Power Point Tracking).

Os piranômetros desempenham papel essencial no contexto de mapeamento solar, uma vez que medem a irradiância global e registram continuamente as variações na intensidade da radiação solar. Esses dados permitem identificar padrões de variabilidade diária e sazonal, além de avaliar a influência de fatores atmosféricos. A partir dessas medições, é possível validar modelos de estimativa de irradiância, calibrar sistemas de monitoramento remoto, aprimorar o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos e desenvolver algoritmos de controle mais eficientes, garantindo maior precisão nas previsões de geração e na avaliação da viabilidade de instalação de sistemas solares em diferentes condições (Paula et al., 2020).

Diante desse contexto, este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem como objetivo principal aprimorar um sistema integrado de monitoramento solar e desenvolver um módulo de sensoriamento óptico do céu na cidade de Joinville (SC). A pesquisa engloba o aprimoramento estrutural, eletrônico e lógico de uma infraestrutura de aquisição preexistente, realizando validação metrológica dos dados.

Além disso, o trabalho propõe a integração de capturas fotográficas automatizadas com técnicas de processamento digital de imagens para quantificar a cobertura de nuvens. Dessa forma, busca-se analisar e correlacionar a dinâmica visual da atmosfera, com destaque para fenômenos como o efeito de borda de nuvem, com as variações bruscas de radiação solar, fornecendo os parâmetros necessários para que trabalhos futuros possam desenvolver modelos de previsão de geração e novas estratégias de estabilidade para redes elétricas e sistemas fotovoltaicos.

1.1 OBJETIVOS

Esta seção apresenta os objetivos que norteiam a execução deste trabalho. A seguir, as metas são estruturadas em objetivo geral, que sintetiza a contribuição principal da pesquisa, e objetivos específicos, que detalham os passos técnicos indispensáveis para o seu cumprimento.

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar e aprimorar a coleta de dados de irradiância solar em Joinville, utilizando um piranômetro fotovoltaico com alta taxa de atualização, integrando o processamento visual do céu para avaliar o impacto da dinâmica solar nas flutuações de radiação.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos que orientam o trabalho em questão são:

- Estudar o sistema de monitoramento de irradiância;
- Coletar dados de irradiância solar ;
- Aprimorar a robustez física e a confiabilidade eletrônica do protótipo de monitoramento solar;
- Aprimorar o processamento e o armazenamento de dados de variáveis meteorológicas;
- Validar metrologicamente os sensores de irradiância do sistema em comparação com uma estação de referência;
- Integrar um módulo de captura óptica para registro visual automatizado do estado do céu;
- Estimar a fração de cobertura de nuvens aplicando técnicas de processamento digital de imagens;
- Analisar o impacto da dinâmica das nuvens e do efeito de borda nas flutuações e picos de irradiância solar.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente trabalho está estruturado de forma sistemática o desenvolvimento de uma base de dados, bem como a análise subsequente dos dados coletados. A sequência adotada reflete a evolução natural do estudo, desde a implantação da infraestrutura de coleta até a consolidação e validação do banco de dados. O conteúdo é dividido em cinco capítulos principais:

1. Introdução: Apresenta o contexto do tema abordado, justifica a relevância da pesquisa e define os objetivos gerais e específicos do trabalho.

2. Revisão Bibliográfica: Explora, de forma aprofundada, os conceitos teóricos e as tecnologias pertinentes, fornecendo o embasamento necessário ao desenvolvimento do estudo.
3. Desenvolvimento: Detalha as etapas de implementação da infraestrutura de coleta de dados de irradiância solar, bem como a metodologia adotada para a construção do banco de dados.
4. Resultados: Apresenta a análise dos dados obtidos, evidenciando a dinâmica do comportamento solar e as informações extraídas para fundamentar as conclusões.
5. Conclusão: Sintetiza as principais contribuições da pesquisa, destaca os desafios enfrentados durante a execução do estudo e propõe recomendações para futuras investigações e aperfeiçoamentos.

Essa estrutura foi adotada com o intuito de fornecer uma visão clara e organizada da investigação, facilitando o acompanhamento da evolução do estudo e a compreensão dos princípios e aplicações da Engenharia Elétrica em cada etapa do processo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para o embasamento e a compreensão dos conceitos abordados ao longo deste trabalho.

2.1 ENERGIA SOLAR E IRRADIÂNCIA

A energia solar pode ser aproveitada, de modo geral, por meio de duas principais formas: a conversão térmica, que se baseia na utilização de coletores para o aquecimento de fluidos, e a conversão fotovoltaica, na qual a radiação solar é diretamente transformada em eletricidade. Esta última modalidade fundamenta-se no chamado efeito fotovoltaico, observado pela primeira vez em 1839 pelo físico francês Alexandre-Edmond Becquerel. Tal efeito consiste na geração de corrente elétrica quando a luz incide sobre determinados materiais semicondutores. Nos experimentos conduzidos por Becquerel, eletrodos foram imersos em uma solução condutora, apresentando variações nos potenciais elétricos sempre que uma das placas era iluminada pela radiação solar, o que permitiu demonstrar, pela primeira vez, a conversão direta da energia luminosa em energia elétrica (CEPEL; CRESESB, 2014).

2.1.1 Conceito de radiação solar

A energia proveniente do Sol, denominada radiação solar, atinge a superfície terrestre na forma de ondas eletromagnéticas que se propagam pelo vácuo à velocidade da luz. Essa energia é quantificada por meio da irradiância (S), expressa em watts por metro quadrado (W/m^2), a qual representa a potência incidente sobre uma determinada área. Entretanto, a irradiância média fora da atmosfera de aproximadamente $1.366 W/m^2$, não chega integralmente à superfície da terra, pois parte dessa energia é perdida devido aos processos de reflexão, absorção e dispersão de gases atmosféricos, aerossóis e formações de nuvens. Assim, apenas uma fração da radiação solar atinge efetivamente a superfície, sendo seu valor médio, em condições ideais e regiões próximas à Linha do Equador, cerca de $1.000 W/m^2$ ao meio-dia (Knabben, 2017).

Dessa forma, a parcela de radiação que efetivamente atinge o solo é composta por três componentes principais: direta, difusa e refletida (ou de albedo). A radiação direta corresponde à fração proveniente do Sol que incide sobre a superfície sem interferências significativas, enquanto a radiação difusa resulta do espalhamento da luz pela atmosfera, sendo mais predominante em condições de nebulosidade. A radiação refletida, por sua vez, representa a parcela refletida pelas superfícies terrestres, cuja intensidade depende das propriedades ópticas e térmicas do solo ou dos materiais presentes (Magarreiro; Freitas; Brito, 2016).

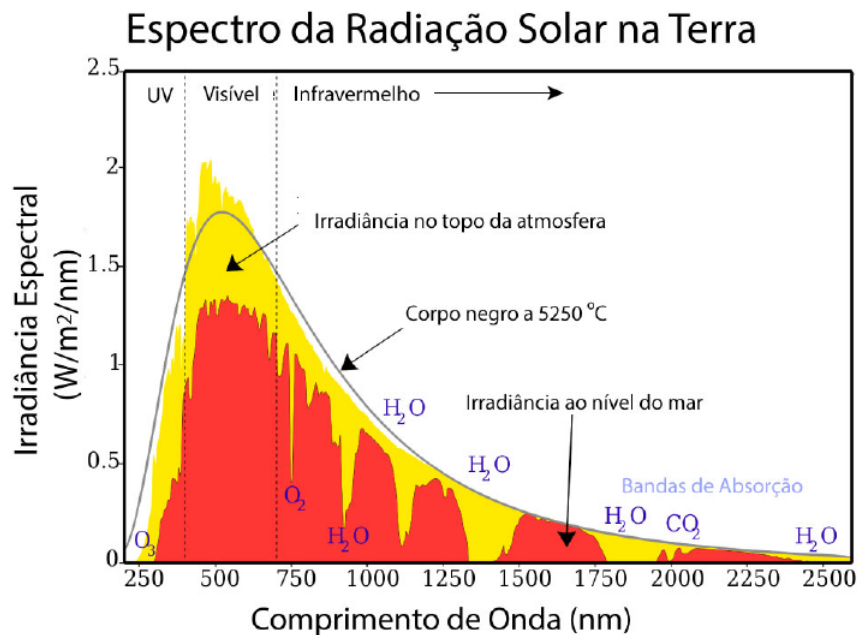
2.1.2 Espectro da radiação solar

A radiação solar pode ser definida como o fluxo de energia proveniente do Sol, o qual se propaga pelo espaço e alcança a superfície terrestre na forma de radiação eletromagnética. Essa

energia é medida por meio de dois parâmetros principais: a Irradiância Solar Total, que representa a quantidade total de potência proveniente do Sol por unidade de área, e a Irradiância Solar Espectral, que descreve como essa energia é distribuída ao longo dos diferentes comprimentos de onda (Gómez et al., 2018).

O espectro de radiação solar é ilustrado na Figura 4, na qual é possível observar que a maior parte da energia emitida pelo Sol concentra-se nas faixas do espectro visível, abrangendo parte da região mais relevantes para a conversão fotovoltaica, dado que os módulos respondem a faixa aproximada de 400 nm a 1100 nm. Além disso, faixas de onda acima de 1100 nm podem contribuir para o sobre aquecimento, enquanto comprimentos abaixo de 400 nm contribuem para a degradação dos módulos (Optics, 2025). Destaca-se ainda, que apenas cerca de 1,2% da energia total emitida pelo Sol tem comprimentos de onda inferiores a 300 nm, enquanto comprimentos superiores a 2.400 nm representam 4% (Neves, 2016).

Figura 4 – Irradiância espectral solar



Fonte: Adaptado de (Rohde; Costa, 2007).

Outrossim, observa-se a diferença entre a irradiância no topo da atmosfera e no nível do mar. Essa diferença é atribuída à absorção e dispersão da radiação solar pelos gases e partículas presentes na atmosfera, destacando-se o ozônio, oxigênio, água e dióxido de carbono. Entretanto, vale ressaltar que a quantidade de radiação solar que atinge a superfície não é apenas afetada pela absorção e dispersão dos gases e partículas atmosféricas, ou ainda fatores geoclimáticos, a emissão solar também apresenta variações naturais.

Observações das últimas décadas indicam que a emissão solar não é constante, que ocorrem em escalas temporais que vão desde minutos até ciclos de décadas (Fröhlich, 2006). Essas flutuações estão relacionadas à natureza dinâmica do Sol, que emite radiação em diversas faixas do espectro eletromagnético, dos raios gama às ondas de rádio. Isso ocorre devido à

interação entre campos elétricos e magnéticos em seu interior. Esse comportamento complexo reflete o funcionamento do dínamo solar, responsável por gerar e modular o campo magnético que, por sua vez, afeta diretamente a quantidade e o tipo de radiação que chega ao nosso planeta (Gómez et al., 2018).

2.1.3 Principais fatores geoclimáticos que influenciam a fotogeração

A conversão fotovoltaica da energia solar em eletricidade depende fortemente de variáveis geoclimáticas que condicionam tanto a quantidade quanto a qualidade da radiação incidente sobre os módulos. Dentre esses fatores destacam-se a geometria Sol-Terra, as condições atmosféricas locais, e a temperatura ambiente. Todos interligados no processo de fotogeração, que atuam de forma integrada, determinando a intensidade, a distribuição espectral e a variação temporal da irradiância solar disponível para a fotogeração.

a) Geometria Sol-Terra

A Geometria Sol-Terra define a trajetória aparente do Sol no céu e, conseqüentemente, a distribuição espacial e temporal da irradiância solar sobre o planeta. Essa geometria resulta da inclinação do eixo terrestre, de $23,45^\circ$ em relação ao plano da eclíptica, e da órbita elíptica da Terra ao redor do Sol, que, combinadas à latitude do observador, determinam variáveis fundamentais como o ângulo de declinação solar, ângulo horário, ângulo zenital e azimutal. Esses parâmetros são essenciais para o dimensionamento e a modelagem de sistemas fotovoltaicos, uma vez que influenciam diretamente o ângulo de incidência da radiação sobre os módulos e, portanto, o aproveitamento energético do sistema (Jenčo, 2025).

Adicionalmente, o eixo de rotação da Terra não se alinha perfeitamente com o plano da órbita elíptica que o planeta percorre, apresentando uma inclinação de $23^\circ 27'$. Em decorrência dessa inclinação, há uma variação na exposição dos hemisférios à radiação solar ao longo do ano, de modo que, em determinados períodos, o hemisfério sul recebe maior incidência de luz solar, enquanto em outros, o hemisfério norte é mais exposto (Soares, 2014).

Um conceito prático associado à geometria solar é o meio-dia solar, definido como o instante em que o Sol cruza o meridiano local, atingindo sua máxima altura aparente no céu. Diferentemente do meio-dia civil, indicado pelos relógios convencionais, o meio-dia solar varia conforme a longitude do local e a chamada equação do tempo, que corrige as diferenças resultantes da excentricidade orbital e da inclinação axial da Terra. Essa diferença é importante porque influencia diretamente os cálculos de irradiância instantânea, já que o pico de radiação direta em superfícies horizontais ocorre próximo ao meio-dia solar (Bedaque; Bretones, 2019).

b) Massa de ar

A massa de ar (AM), por sua vez, descreve o percurso relativo da radiação solar através da atmosfera até atingir a superfície terrestre. O índice AM é inversamente proporcional ao cosseno do ângulo zenital solar $AM = \frac{1}{\cos \theta}$, de modo que maiores ângulos resultam em trajetos atmosféricos mais longos e, conseqüentemente, maiores perdas por absorção e dispersão. Além de reduzir a irradiância total, a massa de ar modifica o espectro solar, alterando a proporção de comprimentos de onda que chegam ao solo e, portanto, a resposta espectral das células fotovoltaicas (Knabben, 2017).

c) Condições atmosféricas locais

A eficiência e o desempenho dos sistemas solares fotovoltaicos (FV) são fortemente influenciados por variáveis atmosféricas, como cobertura de nuvens, poluentes, deposição de poeira, umidade relativa do ar e velocidade do vento. A presença de nuvens reduz significativamente a irradiância direta normal (DNI) incidente sobre os módulos, provocando variações temporais na geração de energia. Nuvens densas podem diminuir a produção em até 50%, enquanto o fenômeno conhecido como “efeito de borda de nuvem” pode momentaneamente intensificar a irradiância devido à dispersão e refração da luz nas bordas das nuvens (Bamisile et al., 2025).

Os poluentes atmosféricos e aerossóis como poeira fina, fumaça, fuligem e emissões industriais causam dispersão e absorção da radiação solar, fenômeno chamado “escurecimento solar” (solar dimming). Esses efeitos reduzem a energia disponível para conversão fotovoltaica e podem diminuir o fator de capacidade em até 20%, conforme as condições locais. Já a deposição de poeira nos módulos é crítica, sobretudo em regiões áridas, pois reduz a transmitância óptica, promove aquecimento localizado e acelera a degradação dos materiais, podendo causar perdas de até 60% sem limpeza regular (Bamisile et al., 2025).

A umidade atmosférica também afeta o desempenho dos sistemas FV ao refratar e difundir a luz incidente, reduzindo a irradiância efetiva sobre as células. Além disso, favorece o acúmulo de partículas e a delaminação dos encapsulantes, acelerando a degradação dos módulos. Por outro lado, níveis moderados de umidade auxiliam no resfriamento dos painéis, elevando ligeiramente sua eficiência. O vento, por sua vez, pode ter efeitos opostos: em velocidades moderadas, atua como agente de resfriamento e remove poeira; em altas intensidades, pode transportar partículas abrasivas, gerar sombreamento dinâmico e comprometer a integridade estrutural. Assim, compreender e controlar esses cinco fatores é essencial para o dimensionamento, operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos eficientes (Bamisile et al., 2025).

d) Temperatura ambiente

O aumento da temperatura eleva a agitação térmica no material semicondutor, reduzindo a diferença de potencial e, conseqüentemente, a tensão de circuito aberto das células solares. Essa redução de tensão decorre do estreitamento da banda de energia e do aumento

da corrente de saturação reversa, efeitos que, combinados, resultam na diminuição da eficiência global de conversão. De acordo com Dubey, Sarvaiya e Seshadri (2013), a potência de saída dos módulos fotovoltaicos apresenta uma correlação negativa com a temperatura, assim, temperaturas elevadas tendem a comprometer o desempenho dos módulos, enquanto condições mais amenas favorecem a geração elétrica. Essa relação é particularmente relevante em regiões de clima tropical, nas quais o ganho em irradiância solar pode ser parcialmente compensado pelas perdas térmicas associadas ao aquecimento dos módulos. A variação sazonal da trajetória solar, decorrente da inclinação do eixo terrestre, influencia a duração do dia e a altura aparente do Sol. Durante o solstício de verão, o aumento do período diurno resulta em maior disponibilidade de energia solar, ao passo que, no solstício de inverno, a redução do tempo de insolação limita a geração. Essa variação é menos pronunciada em regiões equatoriais, mas ainda significativa para o cálculo da produção anual de energia. Sendo assim, ferramentas de simulação, utilizam equações da geometria Sol-Terra para estimar o ângulo solar horário, a trajetória diária do Sol e o fator de correção da distância Terra-Sol, permitindo previsões mais realistas da produção fotovoltaica (Campos, 2013).

e) Efeito de Borda de Nuvem e Eventos de Sobreirradiância

A presença de nebulosidade na atmosfera atua primariamente como um agente atenuador da radiação solar global devido aos processos de reflexão tridimensional e absorção pelas gotículas de água (Tapakis; Charalambides, 2014). Contudo, sob condições específicas de céu parcialmente nublado, ocorre um fenômeno óptico e dinâmico conhecido como efeito de borda de nuvem, capaz de provocar picos transientes de irradiância que superam os limiares teóricos estabelecidos para condições de céu limpo (Piacentini et al., 2011). Fisicamente, este incremento anômalo manifesta-se quando o disco solar permanece temporariamente desobstruído enquanto formações nebulosas posicionam-se adjacentes à linha de visada direta entre o observador e o Sol (Tapakis; Charalambides, 2014).

Nessas circunstâncias, há a incidência concomitante do componente de radiação direta integral e de uma parcela substancial de radiação difusa secundária sobre o plano horizontal (Piacentini et al., 2011). Essa radiação secundária é intensificada pelo espalhamento frontal e por reflexões múltiplas nas microgotículas de água presentes na periferia óptica e tênue da nuvem (Tapakis; Charalambides, 2014). O contorno excessivamente brilhante da formação nebulosa funciona analogamente como um concentrador óptico natural difuso, elevando transitoriamente a potência radiante superficial total antes que ocorra a oclusão total do disco solar (Schenkel, 2015).

2.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Os sistemas fotovoltaicos são projetados de forma personalizada, levando em consideração as necessidades energéticas do local e fatores ambientais que podem influenciar diretamente no seu desempenho, como a incidência solar, temperatura e sombreamento. De modo geral, esses sistemas têm como recurso a energia solar, que é captada por meio das células fotovoltaicas, responsáveis por converter a radiação solar em energia elétrica. As células são agrupadas em módulos ou painéis fotovoltaicos, que constituem a unidade básica de geração do sistema juntamente com o inversor. Em algumas configurações, são utilizadas baterias para o armazenamento da energia produzida, garantindo o fornecimento mesmo em períodos sem sol (Balfour; Shaw; Nash, 2016).

O inversor, por sua vez, tem a função de converter a corrente contínua (CC), gerada pelos painéis, em corrente alternada (CA), compatível com o uso em equipamentos elétricos convencionais e com a rede pública. O controlador de carga é utilizado para regular a tensão e corrente entre os painéis e as baterias, evitando sobrecargas e prolongando a vida útil do sistema. Além disso, o cabeamento elétrico e os dispositivos de proteção contra surtos são essenciais para garantir a segurança e eficiência da instalação (Balfour; Shaw; Nash, 2016).

2.2.1 Placa Fotovoltaica

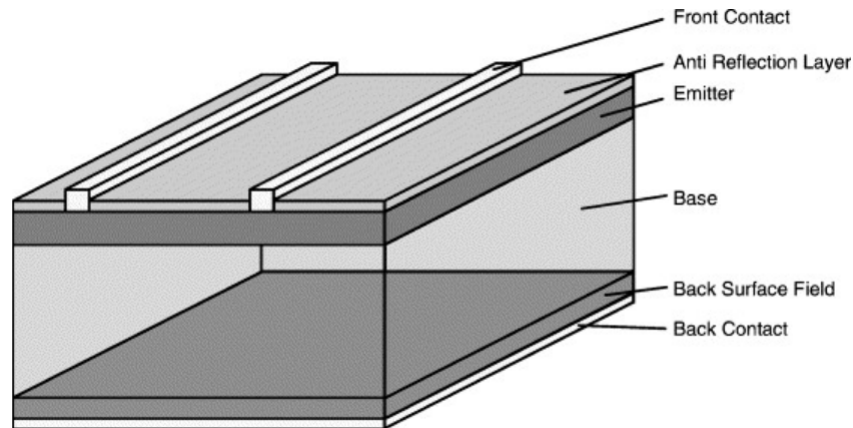
As placas fotovoltaicas têm seu funcionamento baseado no efeito fotovoltaico, fenômeno que consiste na geração de uma tensão elétrica entre dois eletrodos quando a luz incide sobre determinado material (Goetzberger; Hebling; Schock, 2003). Atualmente, as células fotovoltaicas utilizam semicondutores dopados que formam uma junção p-n. Quando a radiação solar incide sobre a célula, os fótons liberam elétrons do semicondutor, gerando uma diferença de potencial que pode ser utilizada para produzir corrente elétrica (CEPEL; CRESESB, 2014).

A eficiência desse processo depende das propriedades ópticas e estruturais do material. Em semicondutores como o silício, a maior parte da absorção ocorre próxima à superfície, o que exige um projeto cuidadoso das camadas para minimizar as recombinações e maximizar a coleta de cargas. A Figura 5 apresenta o esquema simplificado de uma célula solar típica, evidenciando a disposição das camadas e dos contatos elétricos que permitem o aproveitamento da energia gerada (Goetzberger; Hebling; Schock, 2003).

As células solares individuais, embora capazes de gerar energia, possuem tensão relativamente baixa e são suscetíveis a danos ambientais. Para superar essas limitações, tais componentes são interligadas e encapsuladas, formando os módulos fotovoltaicos. Esses módulos são compostos por conjuntos de células solares conectadas entre si, o que permite não apenas elevar a tensão e a potência de saída, mas também garantir proteção mecânica e durabilidade ao conjunto. Cada módulo é composto por diversas camadas funcionais, projetadas para preservar a integridade estrutural e otimizar o desempenho elétrico (Mahdi et al., 2024).

A camada frontal do módulo é geralmente formada por vidro temperado de baixo teor

Figura 5 – Esquemático placa solar



Fonte: (Goetzberger; Hebling; Schock, 2003).

de ferro, que oferece alta transmitância à luz solar e resistência a impactos, poeira e variações térmicas. Logo abaixo, encontra-se o encapsulante, normalmente feito de acetato de etileno-vinila (EVA), responsável por fixar e proteger as células, além de promover a aderência entre o vidro e a camada posterior (backsheet). Embora existam alternativas como o polivinil butiral (PVB) ou os ionômeros, o EVA permanece o material mais utilizado devido ao seu baixo custo, boa transparência e estabilidade térmica (Mahdi et al., 2024).

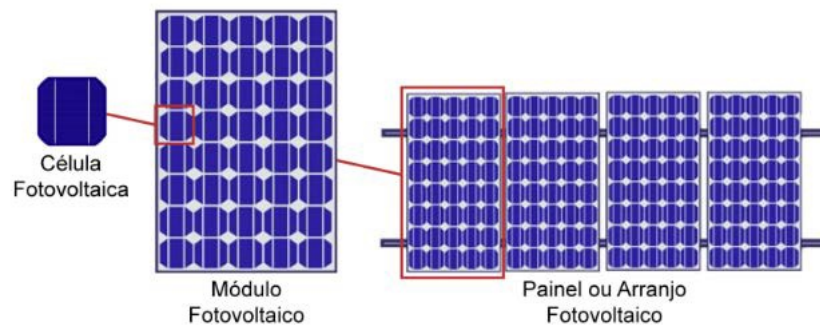
As células fotovoltaicas propriamente ditas são constituídas por lâminas finas de silício cristalino, interconectadas por fitas metálicas condutoras (ribbons). A pureza e a espessura do silício influenciam diretamente o desempenho do módulo, determinando sua eficiência e durabilidade. Na parte posterior, o backsheet atua como barreira contra umidade e radiação ultravioleta, além de garantir isolamento elétrico e resistência mecânica. O conjunto é finalizado com uma moldura de alumínio, que confere rigidez estrutural, e uma caixa de junção, que abriga as conexões elétricas e diodos de proteção, assegurando a operação segura e eficiente do sistema (Mahdi et al., 2024).

Por fim, conforme apresentado na Figura 6, a integração desses módulos resulta em painéis solares fotovoltaicos, os quais são amplamente empregados em sistemas conectados à rede elétrica e em aplicações autônomas. Graças à confiabilidade, baixo impacto ambiental e viabilidade econômica crescente, esses sistemas representam uma das principais alternativas para a geração sustentável de eletricidade, contribuindo para a diversificação da matriz energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa (Goetzberger; Hebling; Schock, 2003).

2.2.2 Inversor e micro inversor

A conversão da energia solar em eletricidade por meio de módulos fotovoltaicos (FV) tornou-se uma das formas mais difundidas e estudadas de geração de energia renovável. Esses módulos captam a radiação solar e a transformam em energia elétrica em corrente contínua (CC), que pode ser utilizada diretamente ou convertida em corrente alternada (CA) pelo inversor, para

Figura 6 – Hierarquia de estruturação de um sistema fotovoltaico



Fonte: (Portal Solar, 2023).

alimentar diferentes tipos de cargas. A interligação desses dispositivos, formam um sistema fotovoltaico, que pode operar de forma autônoma, utilizando baterias para armazenamento, ou conectado à rede elétrica, injetando diretamente a energia gerada (Rampinelli, 2010).

2.2.2.1 MPPT

Os módulos fotovoltaicos apresentam uma curva característica de potência em função da tensão, que possui um único ponto de operação no qual a potência gerada é máxima, conhecido como Ponto de Máxima Potência (MPP – Maximum Power Point). Esse ponto varia constantemente em razão de mudanças nas condições de irradiação solar e temperatura, o que afeta diretamente o desempenho do sistema (Gazoli et al., 2011).

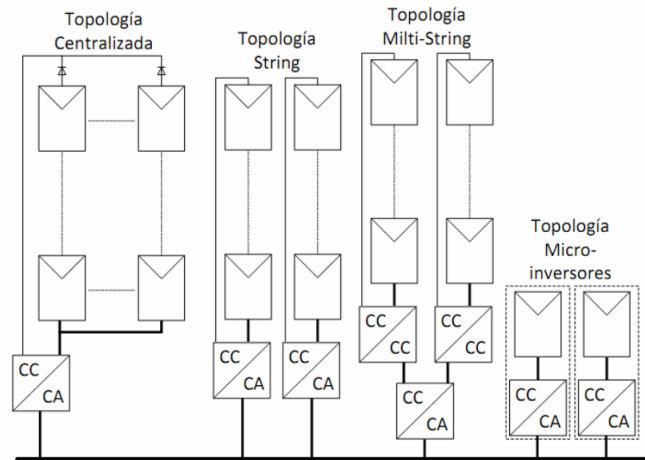
Para garantir que o gerador fotovoltaico opere sempre com o melhor aproveitamento de energia, utiliza-se o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT – Maximum Power Point Tracking). Esse método é implementado no conversor eletrônico acoplado ao arranjo fotovoltaico e tem a função de ajustar automaticamente a tensão e a corrente, de modo que o sistema trabalhe continuamente no ponto de maior eficiência, independentemente das variações ambientais (Gazoli et al., 2011).

2.2.2.2 Topologias

A configuração dos sistemas fotovoltaicos pode variar conforme o objetivo da aplicação e as condições de infraestrutura elétrica disponíveis. De modo geral, esses sistemas podem ser classificados em sistemas isolados (off-grid), sistemas conectados à rede (on-grid) e sistemas híbridos. Já as topologias de sistemas fotovoltaicos variam conforme o tipo de inversor utilizado e o modo de conexão dos módulos (Rampinelli, 2010). De modo geral, as principais topologias empregadas em sistemas fotovoltaicos conectados à rede são apresentadas na Figura 7.

A topologia centralizada é uma das mais tradicionais, na qual diversos arranjos de módulos são conectados em série e paralelo a um único inversor de grande porte. Essa configuração apresenta menor custo por unidade de potência, mas tende a ter menor flexibilidade e eficiência em condições de sombreamento parcial. Já a topologia de string utiliza inversores menores,

Figura 7 – Topologia das principais configurações de inversores e de strings



Fonte: (Cossoli et al., 2015).

dedicados a grupos específicos de módulos (strings), permitindo melhor rastreamento do ponto de máxima potência (Maximum Power Point Tracking – MPPT) e maior confiabilidade em comparação com o sistema centralizado uma vez que aumenta a eficiência global do sistema em condições não uniformes de irradiância (Cossoli et al., 2015).

Outra configuração estudada é de inversores multistring, onde várias strings compartilham o mesmo inversor central, mas cada uma possui seu próprio conversor CC-CC, possibilitando o controle individual do MPPT e equilibrando desempenho e custo. Por fim, a topologia de micro-inversores, em que cada módulo possui seu próprio inversor, convertendo a energia de corrente contínua para alternada individualmente. Essa abordagem oferece o máximo aproveitamento energético e facilita a manutenção, embora apresente custo inicial mais elevado (Cossoli et al., 2015).

2.3 MONITORAMENTO DA IRRADIÂNCIA SOLAR

A medição da radiação é realizada por meio de instrumentos específicos, capazes de registrar diferentes componentes da irradiância. Entre esses instrumentos, destaca-se o piranômetro, responsável pela medição da irradiância solar global (direta + difusa), ou seja, a quantidade de energia proveniente do Sol que incide sobre uma superfície horizontal por unidade de área. Essa grandeza é expressa em W/m^2 e é fundamental para estudos de energia solar, climatologia, meteorologia e engenharia de sistemas fotovoltaicos (Pereira et al., 2017).

A norma ISO 9060:2018 classifica os piranômetros de acordo com seu desempenho e precisão, levando em consideração resposta direcional, resposta de temperatura, resposta à estabilidade a longo prazo além do tempo de resposta, dependência espectral, erro de não linearidade e dependência da inclinação. Além disso, são divididos em três categorias principais: classe A apresentam maior exatidão, estabilidade térmica e resposta espectral uniforme, sendo adequados em calibrações e pesquisas científicas. Os de classe B são comumente usados em

aplicações intermediárias, como estações meteorológicas regionais, enquanto os de classe C são mais destinados a monitoramentos operacionais ou de menor precisão, como em sistemas fotovoltaicos comerciais (ISO, 2018).

2.3.1 Piranômetro termopilha

O piranômetro de termopilha é um instrumento de alta precisão que converte a energia radiante em energia elétrica por meio de uma termopilha composta por vários termopares em série. Sua área sensível é recoberta por tinta negra de alta absorção, que simula o comportamento de um corpo negro ideal e garante a captação quase total da radiação incidente. A absorção da energia solar provoca um aumento de temperatura na superfície receptora, enquanto a base do instrumento permanece relativamente fria. Essa diferença térmica gera um potencial elétrico mensurável, proporcional à quantidade de energia solar incidente (Pereira et al., 2017).

Além dessas características construtivas, o piranômetro de termopilha apresenta excelente resposta dentro de um ângulo sólido de 180° , seguindo o padrão de uma resposta de cosseno. Essa propriedade garante que a radiação seja medida de forma precisa, independentemente do ângulo de incidência, contribuindo para a redução das incertezas nas medições. O sensor também apresenta desvios inferiores a 1%, o que assegura alta confiabilidade e repetibilidade nos resultados.

Outro aspecto importante é sua curva de resposta praticamente plana na faixa espectral entre 300 nm e 3.000 nm, permitindo uma medição uniforme da irradiância solar em todo o espectro relevante. Essas características tornam o piranômetro de termopilha um equipamento essencial em aplicações que exigem medições precisas da radiação solar, como em estudos de energia solar, calibração de instrumentos e monitoramento meteorológico.

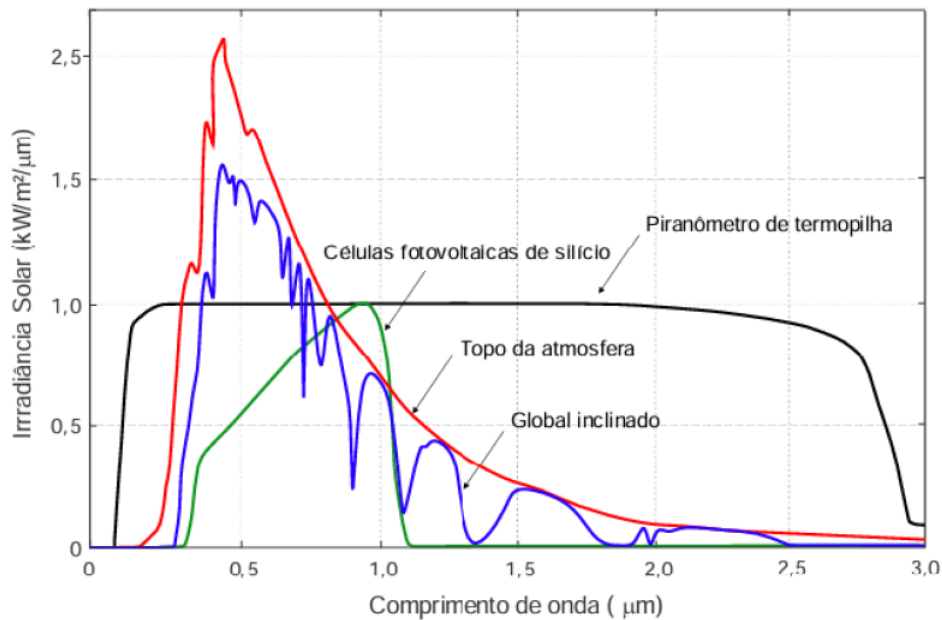
2.3.2 Piranômetro fotoelétricos

Os piranômetros que utilizam fotodiodos convertem diretamente a radiação solar incidente em corrente elétrica proporcional à irradiância. No entanto, devido à resposta espectral limitada, esses instrumentos podem apresentar diferentes níveis de incerteza sob distintas condições atmosféricas, como céu claro e céu encoberto. Além disso, a resposta ao ângulo de incidência da radiação tende a ser menos precisa em comparação com equipamentos baseados em termopilhas. Outro aspecto relevante é a maior sensibilidade a ruídos elétricos, consequência do princípio de operação puramente eletrônico, sem inércia térmica (Pereira et al., 2017).

Os piranômetros fotovoltaicos, têm sua operação baseada na conversão direta da irradiância em sinal elétrico, assim, apresentam resposta extremamente rápida às variações de radiação incidente, permitindo a detecção eficiente de flutuações de curta duração (Vilela, 2010). Esses instrumentos utilizam células de silício cristalino com faixa espectral entre aproximadamente 400 nm e 1.100 nm, semelhante à dos módulos fotovoltaicos, o que favorece seu uso em estudos de energia solar e em análises exploratórias de potencial solarimétrico (Zeqiang et al., 2013). Na

Figura 8 é possível comparar a faixa espectral do piranômetro fototérmico e fotovoltaico, que como exposto se assemelha a captação de uma placa fotovoltaica.

Figura 8 – Faixa espectral piranômetros



Fonte: (Meydbray; Emery; Kurtz, 2012), adaptado por (Figueira, 2020).

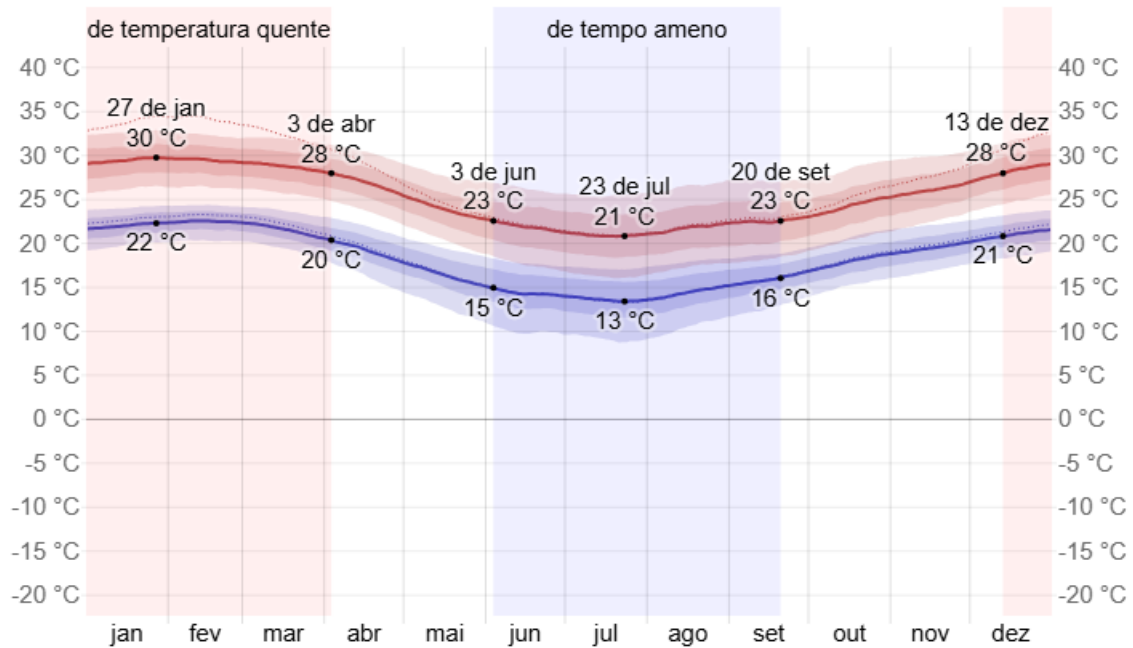
Apesar das limitações associadas à precisão espectral e angular, esses instrumentos destacam-se pela robustez, baixo custo e facilidade de operação, características que os tornam adequados a aplicações que toleram margens de incerteza mais amplas. Por esse motivo, são amplamente empregados em áreas como meteorologia e agrometeorologia, além de serem úteis em etapas iniciais de estudos de potencial solarimétrico, quando o objetivo principal é a obtenção de dados exploratórios. No Brasil, por exemplo, são comumente utilizados nas estações meteorológicas automáticas operadas pelo INMET (Pereira et al., 2017).

2.4 LOCALIZAÇÃO E CLIMA

Joinville é um município localizado na região nordeste do estado de Santa Catarina, com um relevo composto por terrenos cristalinos da Serra do Mar e áreas de sedimentação costeira. Devido a essas características, o clima predominante da região, segundo a classificação de Köppen, é descrito como mesotérmico, úmido, sem estação seca (SEPUD, 2021).

De acordo com essa caracterização climática, a Figura 9 apresenta a variação das temperaturas médias mínimas e máximas registradas entre os anos de 2017 e 2025. Observa-se que os valores médios anuais situam-se entre 13°C e 30°C. A linha vermelha representa as temperaturas máximas e a azul as mínimas, evidenciando o padrão sazonal típico da região, com elevação das temperaturas nos meses de janeiro e fevereiro e redução entre junho e julho.

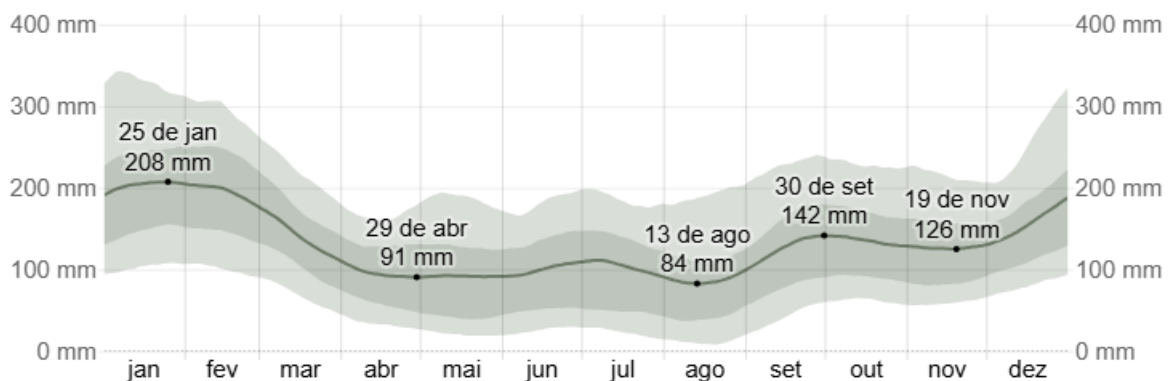
Figura 9 – Temperaturas máximas e mínimas médias de Joinville (2017-2025)



Fonte: (WeatherSpark, 2021).

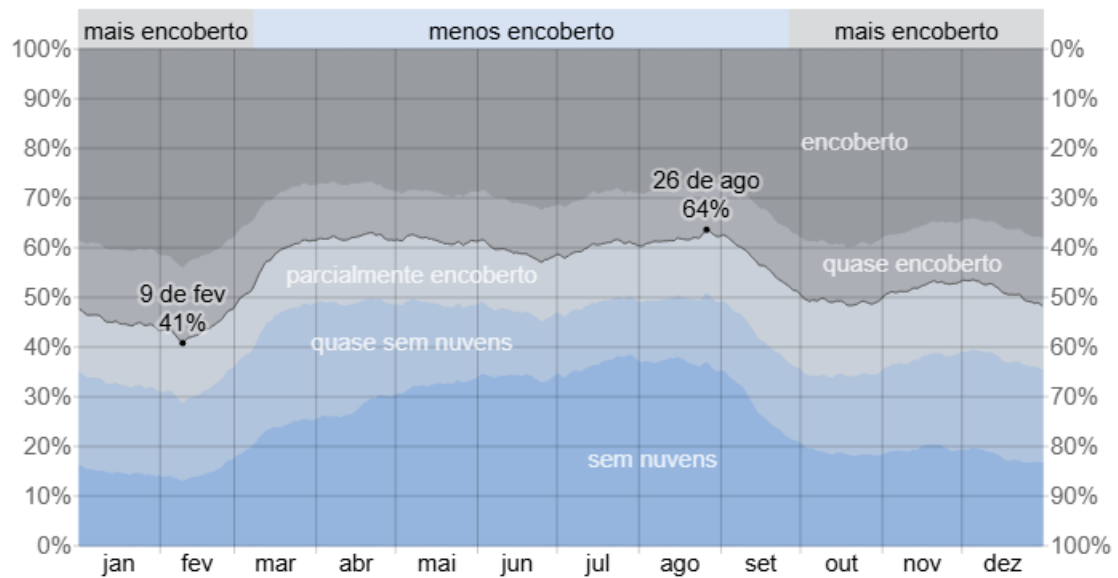
A precipitação é um fator climático importante em Joinville. A cidade tem chuvas durante todo o ano, com destaque para janeiro, o mês mais chuvoso, com média de 206 mm, e agosto, o mês mais seco, com média de 84 mm. A variação na quantidade de chuva ao longo do ano é visível no gráfico da Figura 10, de precipitação mensal, que mostra picos durante o verão e redução de chuvas no inverno. Em contra partida, a nebulosidade apresentada na Figura 11, cuja escala esquerda indica a porcentagem de céu limpo e a direita de céu encoberto, indica que a cidade tem períodos com céu mais nublado, especialmente durante os meses mais quentes. Isso ocorre dado que o calor do verão aumenta a evaporação e a umidade do ar, facilitando a formação de nuvens. Essa maior cobertura de nuvens afeta diretamente tanto a percepção térmica quanto a quantidade de radiação solar que consegue atingir a superfície (Abreu, 2000).

Figura 10 – Chuva mensal média em Joinville (2017-2025)



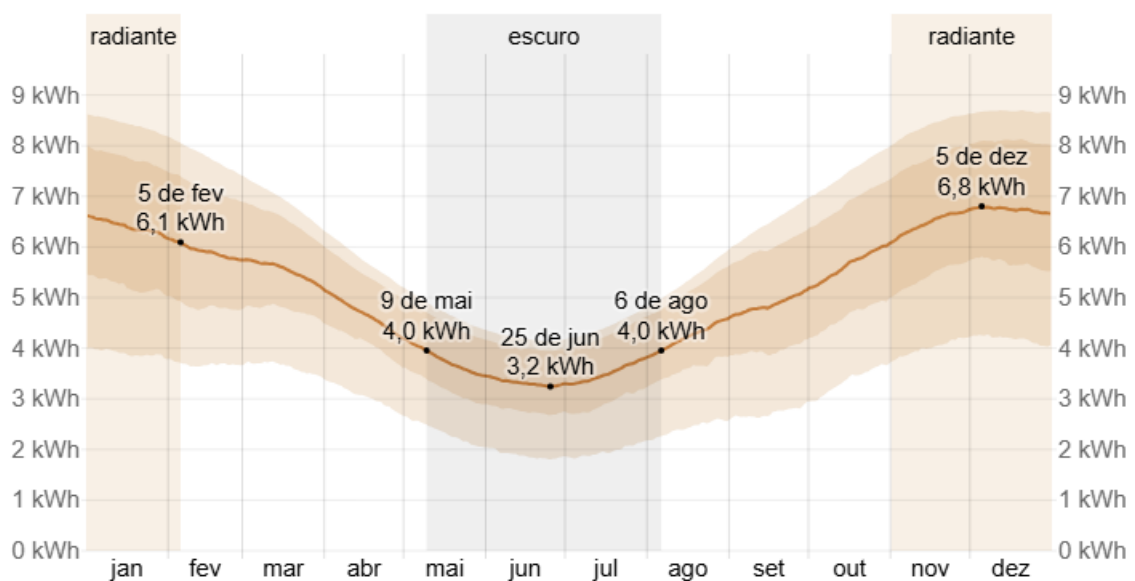
Fonte: (WeatherSpark, 2021).

Figura 11 – Categorias de nebulosidade em Joinville (2017-2025)



Por sua vez, a radiação solar apresenta um comportamento sazonal bem definido. A Figura 12 ilustra o total diário de energia solar de ondas curtas incidente sobre a superfície terrestre, considerando as variações na duração do dia, na altura solar e na absorção por nuvens e demais elementos atmosféricos. Esse tipo de radiação abrange tanto a luz visível quanto a radiação ultravioleta. Observa-se que a incidência é mais intensa durante o verão, em razão da maior duração do dia e da elevação do sol no horizonte, enquanto no inverno essa intensidade tende a diminuir.

Figura 12 – Média diária de energia solar de ondas curtas incidente em Joinville (2017-2025)



2.5 TÉCNICAS DE PRÉ-PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

A etapa de aquisição contínua em sistemas de monitoramento ambiental resulta, frequentemente, em extensos conjuntos de dados brutos que podem apresentar ruídos, anomalias ou frequências de amostragem incompatíveis. Para garantir a confiabilidade metrológica e embasar as correlações deste estudo, torna-se indispensável a aplicação prévia de tratamentos computacionais e estatísticos.

2.5.1 Fundamentos de *Outliers* e *Aliasing*

Um *outlier* é definido como um valor que se desvia substancialmente do padrão geral observado em um conjunto de dados. Esse ponto de dados é frequentemente interpretado como uma anomalia, indicando que pode ter sido gerado por um processo distinto. Embora os *outliers* possam surgir devido a erros de medição ou falhas no processo de coleta de dados, os mesmos também podem refletir características raras ou inesperadas do sistema em estudo (Aggarwal, 2017).

Dessa forma, em análises como de irradiância solar, torna-se relevante realizar uma avaliação complementar dos princípios físicos envolvidos, a fim de identificar possíveis medições incorretas. Nesse contexto, surge a necessidade de estabelecer intervalos estatísticos de confiança, que correspondem a faixas de variação admissíveis para as medições da série temporal. Os limites desses intervalos delimitam os valores máximos e mínimos esperados para as observações, assegurando a confiabilidade dos dados obtidos (Calça, 2022)

Além disso, outro fator crítico para assegurar a confiabilidade dos dados em sistemas de monitoramento é o processo de digitalização dos sinais físicos. A amostragem consiste no processo de conversão de um sinal contínuo, no tempo ou no espaço, em uma sequência discreta de valores numéricos, o que implica em uma perda parcial de informação em relação ao sinal original. Quando a taxa de amostragem adotada é insuficiente para representar adequadamente o conteúdo espectral do sinal, ocorre o fenômeno conhecido como *aliasing*. Esse efeito resulta em distorções que tornam diferentes sinais indistinguíveis após a amostragem, comprometendo a qualidade e a precisão dos dados obtidos (Ribeiro et al., 2021).

2.5.2 Análise de Correlação Linear de Pearson

O Coeficiente de Correlação de Pearson (r), também denominado coeficiente de correlação produto-momento, constitui uma métrica estatística paramétrica utilizada para quantificar a intensidade e a direção da associação linear entre duas variáveis quantitativas contínuas (Pearson, 1895). O princípio fundamental deste coeficiente baseia-se na avaliação do comportamento síncrono das variáveis em relação às suas respectivas médias aritméticas. Matematicamente, a relação é definida pela razão entre a covariância das duas variáveis e o produto de seus desvios padrão individuais, conforme estabelecido na Equação 1:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

Onde os termos X_i e Y_i representam as observações pareadas da amostra de tamanho n , ao passo que $\bar{X}$ e $\bar{Y}$ correspondem às médias amostrais calculadas para cada conjunto de dados.

O coeficiente r é uma grandeza adimensional cujo domínio matemático é estritamente delimitado no intervalo $[-1, 1]$. O sinal do coeficiente determina a orientação geométrica da associação: valores positivos indicam uma relação diretamente proporcional, na qual ambas as variáveis divergem convergentemente na mesma direção, enquanto valores negativos apontam para uma relação inversamente proporcional.

Para fins de padronização acadêmica e rigor analítico na interpretação da magnitude desse coeficiente, adota-se a classificação proposta por (Mukaka, 2012). Sob esta convenção estatística, o módulo do coeficiente ($|r|$) qualifica a força da dispersão dos dados ao redor de uma linha de tendência perfeitamente reta, sendo estratificado de acordo com os intervalos apresentados na Tabela 1.

Quadro 1 – Classificação da intensidade da correlação linear de Pearson.

Intervalo do Módulo ($ r $)	Classificação Acadêmica
$0,90 \leq r \leq 1,00$	Correlação Muito Forte
$0,70 \leq r \leq 0,89$	Correlação Forte
$0,50 \leq r \leq 0,69$	Correlação Moderada
$0,30 \leq r \leq 0,49$	Correlação Fraca
$0,00 \leq r \leq 0,29$	Correlação Desprezível

2.6 VULNERABILIDADES DA REDE FRENTE À GERAÇÃO SOLAR

A crescente inserção de fontes de energia renovável variável (ERV) na matriz elétrica, embora traga expressivos benefícios ambientais e econômicos, introduz desafios complexos relacionados à previsibilidade e à flexibilidade operativa da geração (Ministério de Minas e Energia (MME), 2026). Devido à dependência direta de condições meteorológicas, a produção de eletricidade por essas matrizes oscila de forma intermitente, resultando em variações significativas na quantidade de energia disponibilizada. Esse cenário torna o gerenciamento da rede elétrica altamente complexo, uma vez que a manutenção da estabilidade sistêmica exige que a oferta acompanhe as flutuações do consumo em tempo real, mitigando o risco de falhas e colapsos estruturais (Gomes, 2025).

Esse desafio operacional intensifica-se consideravelmente quando a participação das fontes renováveis variáveis ultrapassa o patamar de 20% na matriz energética. Sob essas condições, erros de estimativa na geração provocam desequilíbrios severos entre a oferta e a demanda, exigindo uma flexibilidade substancial das usinas convencionais (Mararakanye; Bekker, 2019). Na prática, os geradores tradicionais são compelidos a realizar manobras rápidas de aumento ou

redução de carga para neutralizar as oscilações naturais das ERVs e salvaguardar a segurança operacional (Piacentini et al., 2011).

Paralelamente, a descentralização da geração, que abrange desde a Micro e Minigeração Distribuída (MMGD) até grandes parques geradores (Ministério de Minas e Energia (MME), 2026), impõe uma dinâmica de fluxo bidirecional sobre redes de distribuição que não foram projetadas para essa finalidade. Essa incompatibilidade técnica frequentemente resulta em sobretensões e compromete a qualidade da energia eletrodinâmica entregue (Mararakanye; Bekker, 2019). Adicionalmente, o fator geográfico agrava o problema, visto que as usinas renováveis costumam estar localizadas distantes dos grandes centros de consumo. Essa distância fragiliza a conexão com a rede principal e culmina em oscilações de voltagem que, se não mitigadas, podem danificar equipamentos e desencadear desligamentos em larga escala (Mararakanye; Bekker, 2019).

Tendo em vista esse panorama de vulnerabilidades técnicas e operacionais, o desenvolvimento e a implementação de modelos de previsão de geração de maior precisão assumem um papel fundamental. A compreensão e o monitoramento da dinâmica espacial das nuvens destacam-se como fatores críticos, uma vez que o trânsito dessas massas é o principal causador das oscilações abruptas de irradiação solar. A relevância dessa abordagem é atestada pelas diretrizes recentes do próprio Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que aponta a captura de imagens do céu como uma demanda tecnológica essencial para avaliar a cobertura de nuvens e aprimorar as estimativas de geração (ONS, 2022).

O aperfeiçoamento dessas previsões é válido para o Sistema Interligado Nacional (SIN), que atualmente enfrenta limitações de visibilidade sobre o volume real de energia autoconsumida pela Micro e Minigeração Distribuída (MMGD) (ONS; MME; GIZ, 2024). Essa perda de informação, aliada à intermitência, tem forçado o ONS a realizar cortes emergenciais de geração renovável para garantir a segurança e o escoamento da rede (ONS, 2024). Consequentemente, a exatidão nas previsões consolida-se como o principal mecanismo para elevar a confiabilidade e integrar esses recursos de forma eficiente.

Diante das instabilidades operacionais provocadas pela intermitência da radiação solar, compreender o comportamento dinâmico dessa fonte renovável torna-se essencial para garantir a segurança e a eficiência da rede elétrica. Como discutido ao longo desta revisão bibliográfica, a mitigação desses impactos e o desenvolvimento de modelos de previsão mais precisos dependem diretamente da obtenção de dados solarimétricos locais confiáveis e de alta resolução.

Nesse sentido, para que seja possível avançar do embasamento teórico para a análise prática dessas flutuações, o capítulo a seguir apresenta a contextualização do sistema de monitoramento empregado neste trabalho, detalhando a infraestrutura que servirá de base para a coleta e investigação das variáveis meteorológicas em campo, além dos aprimoramentos estruturais, eletrônicos e lógicos implementados.

3 APRIMORAMENTOS REALIZADOS NO SISTEMA DE MONITORAMENTO

O presente trabalho foi desenvolvido a partir das pesquisas conduzidas no projeto “Requisitos dinâmicos de controle e técnicas de seguimento do MPP para sistemas fotovoltaicos”, financiado pela Chamada CNPq/MCTI/FNDCT N° 18/2021 – Universal e realizado em co-operação entre a UFPE, UFSM e UDESC. A iniciativa teve como foco a investigação dos requisitos dinâmicos associados ao controle e ao rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) em sistemas fotovoltaicos submetidos a rápidas variações de irradiância e condições de sombreamento parcial.

Durante a execução do projeto, também foram desenvolvidas estações para aquisição e armazenamento de dados solarimétricos em diferentes regiões do Brasil, possibilitando análises comparativas entre localidades com características climáticas distintas. Nesse contexto, cada universidade parceira tornou-se responsável pela operação do sistema instalado em sua respectiva região, incluindo atividades de aquisição, manutenção e tratamento dos dados. Assim, estações foram implementadas nas cidades de Recife, Joinville e Santa Maria, sob responsabilidade, respectivamente, da UFPE, UDESC e UFSM.

O desenvolvimento da arquitetura do sistema contou com contribuições do trabalho de Kluj (2025), responsável por aprimoramentos na plataforma de monitoramento solarimétrico, consolidando uma solução capaz de realizar o monitoramento contínuo de variáveis ambientais. Os projetos envolveram a seleção dos componentes eletrônicos, a construção da estrutura física e a implementação dos módulos de aquisição, condicionamento, processamento e armazenamento de dados, integrando sensores de irradiância e temperatura, circuitos analógicos, conversores analógico-digitais e uma unidade central de processamento, permitindo medições contínuas e confiáveis em ambiente externo.

Os sensores de irradiância utilizados no projeto geram sinais analógicos proporcionais à intensidade da radiação solar incidente. Entretanto, devido às diferenças entre as faixas de saída dos sensores e os níveis de tensão aceitos pelo sistema de aquisição, tornou-se necessário o uso de circuitos de condicionamento de sinais, garantindo compatibilidade elétrica e maior precisão nas leituras realizadas.

No caso do piranômetro termoeletrico, cuja saída encontra-se na faixa de milivolts, utiliza-se o módulo amplificador de instrumentação AD620. Esse circuito apresenta baixo ruído, elevada precisão e ganho ajustável, permitindo amplificar adequadamente o sinal do sensor até níveis compatíveis com o conversor analógico-digital. Já o sensor fotoeletrico possui saída de até 5 V, valor superior à tensão máxima suportada pelo sistema de aquisição. Para adequar esse sinal, emprega-se o trimpot multivoltas 3.296 W e 10 k Ω configurado como divisor de tensão ajustável, solução que reduz a complexidade do circuito e possibilita o ajuste fino da tensão de entrada.

Após a etapa de condicionamento, os sinais analógicos são convertidos para o domínio digital pelo conversor analógico-digital ADS1015. O dispositivo possui resolução de 12 bits, comunicação I2C e taxa de amostragem de até 3.300 amostras por segundo, características

que favorecem a aquisição rápida e confiável dos dados. Sua função é transformar os sinais provenientes dos sensores em informações digitais que possam ser processadas pelo sistema embarcado, sendo escolhido principalmente pela elevada velocidade de aquisição e pela facilidade de integração com plataformas computacionais compactas.

Além das medições de irradiância, o sistema também realiza o monitoramento da temperatura ambiente por meio do sensor digital DS18B20. O componente utiliza comunicação One-Wire e apresenta faixa de medição entre com resolução configurável de até 12 bits. Por possuir saída digital, o sensor pode ser conectado diretamente ao microcomputador, dispensando a utilização de canais adicionais do ADC. Adicionalmente, o DS18B20 apresenta boa imunidade a ruídos e elevada confiabilidade, características importantes para aplicações de monitoramento térmico contínuo em ambientes externos.

O processamento, armazenamento e gerenciamento das informações coletadas são realizados pelo Raspberry Pi 4, que atua como unidade central do sistema. O dispositivo conta com processador Quad-core ARM Cortex-A72 de 64 bits, memória RAM de até 4 GB e suporte a interfaces como Ethernet, I2C e One-Wire, permitindo a comunicação eficiente com os sensores e módulos empregados. Dessa forma, o microcomputador é responsável por receber os dados provenientes do ADC e do sensor de temperatura, processá-los e posteriormente armazená-los ou enviá-los para plataformas externas de monitoramento e análise.

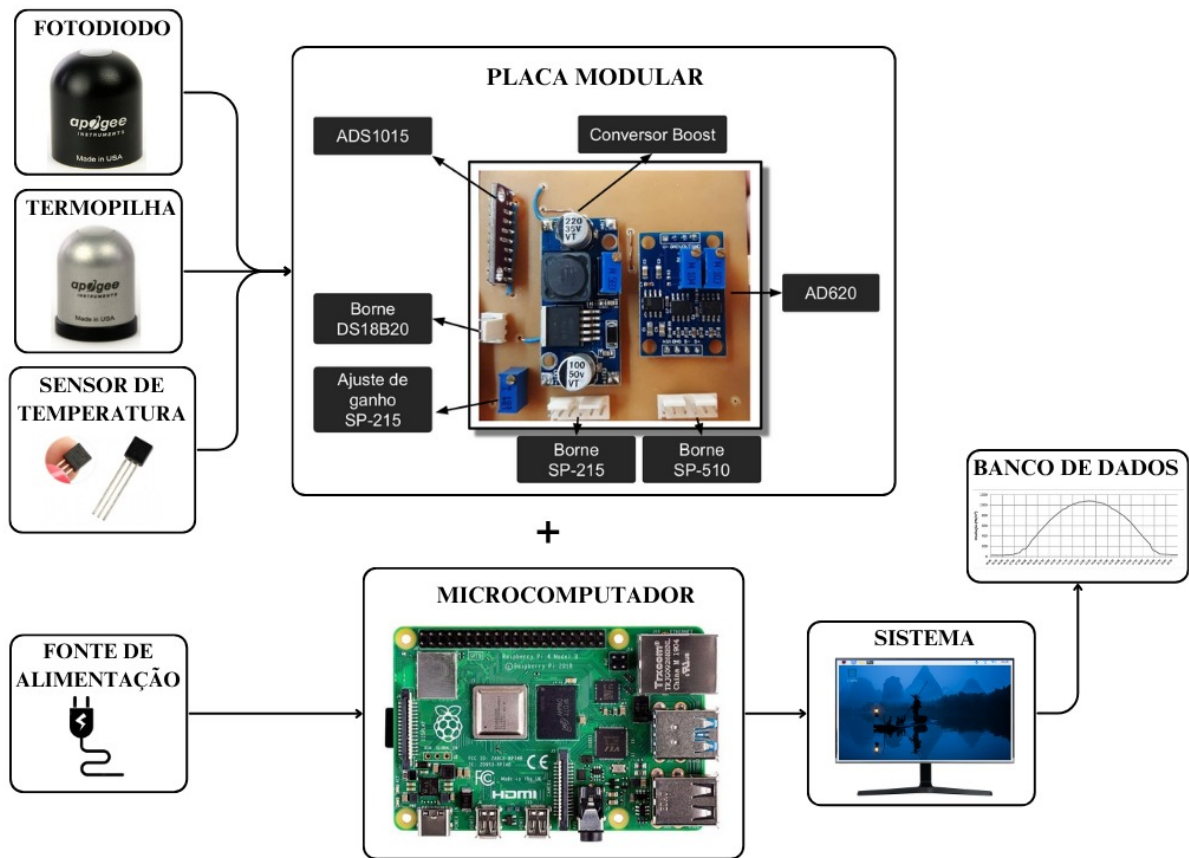
A alimentação principal do sistema é realizada por uma fonte de 5 V. Entretanto, alguns sensores de irradiância requerem alimentação em 12 V para operação adequada. Para atender a essa necessidade, utiliza-se o conversor elevador de tensão XL6009E1, baseado no circuito integrado XL6009, responsável por elevar a tensão de 5 V para 12 V de maneira eficiente. Além disso, visando garantir o funcionamento estável do Raspberry Pi 4 e dos demais módulos eletrônicos, o sistema conta com uma estrutura de alimentação projetada para minimizar oscilações e assegurar maior confiabilidade durante a operação contínua do sistema de aquisição.

Dessa forma, a infraestrutura desenvolvida possibilita a aquisição contínua de dados ambientais, fornecendo suporte experimental para análises relacionadas ao comportamento de sistemas fotovoltaicos em condições reais de operação. Assim, o presente trabalho dá continuidade às investigações anteriormente desenvolvidas, utilizando a infraestrutura consolidada e as metodologias já estabelecidas para aprimorar o sistema implantado e aprofundar os estudos associados à dinâmica de sistemas fotovoltaicos submetidos a diferentes condições climáticas e operacionais.

Conforme contextualizado, esse trabalho de conclusão de curso se inicia dada a posse da infraestrutura de aquisição de dados solarimétricos, representada na Figura ?? que já se encontrava em operação contínua no telhado do Bloco J do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina. Assim, na fase inicial foi possível realizar a coleta de alguns dados ambientais que, somados ao banco de dados já existente, expandiram o volume de registros disponíveis. Diante da posse desses registros, tornou-se possível realizar uma etapa fundamental, a validação metrológica e a análise de consistência do sistema de monitoramento

por meio do confronto com uma base de dados oficial e homologada.

Figura 13 – Diagrama do sistema de aquisição completo.



Dessa forma, a primeira parte deste capítulo dedica-se a apresentar o arranjo experimental montado para essa validação, detalhando a proximidade geográfica com a estação de referência da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), bem como os tratamentos matemáticos, computacionais e estatísticos aplicados para compatibilizar e correlacionar ambas as bases de dados.

No entanto, durante as campanhas de monitoramento em campo, o sistema passou a registrar instabilidades na coleta de dados, interrupções abruptas e, por fim, a completa inoperância de suas funções. Diante desse cenário de interrupção, o protótipo foi retirado de seu local de instalação e transferido para o ambiente laboratorial, para uma inspeção e manutenção técnica.

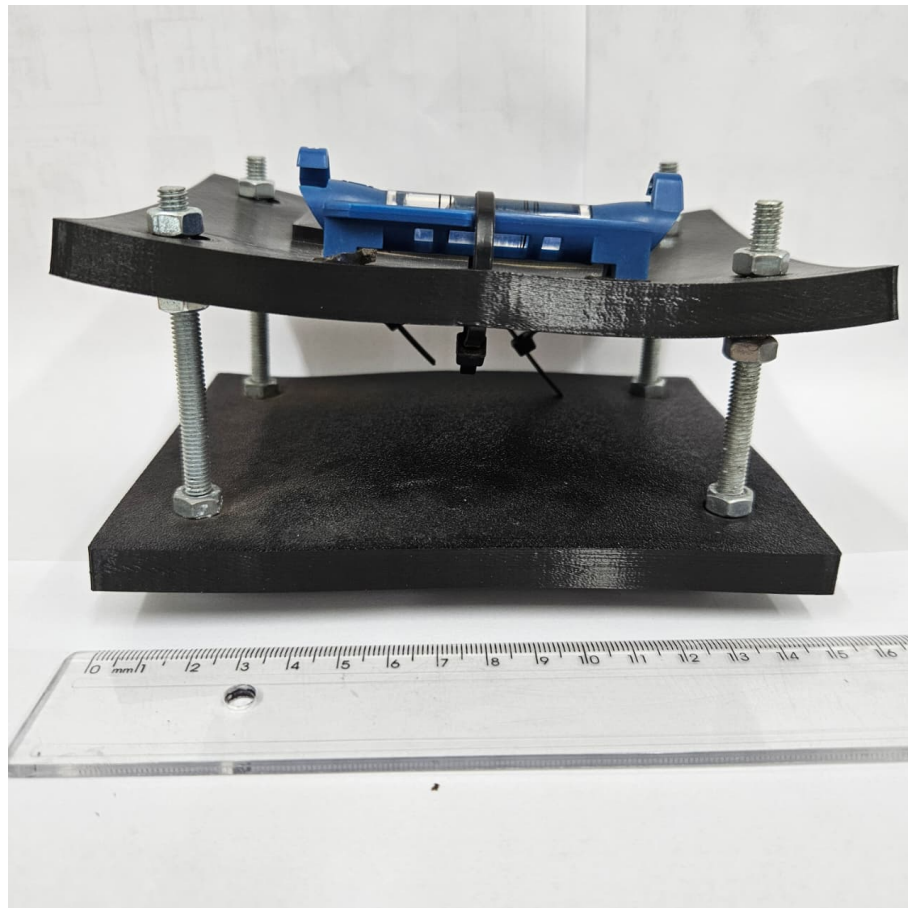
O objetivo dessa intervenção foi identificar a causa raiz das falhas elétricas e estruturais, corrigi-las e reestruturar o projeto para conferir maior robustez ao sistema, evitando a reincidência desses eventos danosos. Durante a análise diagnóstica, identificaram-se problemas de hardware associados ao estresse térmico, bem como vulnerabilidades na arquitetura do software de controle e sincronização. Assim, as seções subsequentes detalham as falhas identificadas, acompanhadas das respectivas soluções de engenharia aplicadas como parte integrante das atividades desse

TCC. Adicionalmente, são apresentadas as novas implementações que expandiram a capacidade analítica e a segurança do projeto reforçando a confiabilidade do equipamento e elevando o nível de detalhamento do monitoramento solarimétrico.

3.1 SUPORTE ESTRUTURAL DOS SENSORES DE IRRADIÂNCIA

Diante das inconsistências observadas nas leituras, tornou-se evidente a necessidade de uma análise detalhada no hardware. Durante essa inspeção foi constatado que o suporte apresentava deformações significativas, causadas pela exposição prolongada às elevadas temperaturas geradas durante a operação do sistema. Essas deformações alteraram o posicionamento dos componentes e afetaram o funcionamento adequado da estrutura, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Deformações observadas no suporte dos sensores fabricado em PLA.



Essa base havia sido desenvolvida em um projeto anterior por meio de impressão 3D, utilizando filamento de PLA (Ácido Polilático) na cor preta. Durante a realização dos experimentos em campo com o sistema de monitoramento solar, a estrutura atingiu temperaturas superiores a 65 °C. Essa elevação térmica foi intensificada devido à alta absorvidade do material preto, que atua como um corpo absorvedor de radiação eletromagnética, acumulando mais calor do que o mensurado pelo próprio sensor de temperatura do sistema (Santos; Silva, 2024).

Em pesquisas realizadas posteriormente foi constatado que o o PLA apresenta temperatura de amolecimento Vicat próxima de 60 °C, o material passou a operar acima de sua faixa térmica recomendada, condição que compromete diretamente sua estabilidade dimensional e resistência mecânica (BCN3D Technologies, 2026).

Diante dos problemas identificados, esse trabalho realizou o reprojeito do suporte estrutural, substituindo-se o componente impresso em PLA por uma estrutura fabricada em chapas de aço inoxidável com espessura de 1 mm. A escolha do aço inox ocorreu devido à sua elevada resistência à corrosão em ambientes externos sujeitos a intempéries e sua excelente estabilidade mecânica sob exposição solar, garantindo que as variações térmicas não comprometam a integridade da peça (Silva, 2023).

Para a execução física do novo suporte estrutural, contou-se com o auxílio do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da UDESC/CCT. A escolha por uma chapa de aço inoxidável com espessura de 1 mm fundamentou-se tanto na disponibilidade de material nos laboratórios da instituição quanto no fato de que essa especificação supria plenamente os requisitos de rigidez mecânica demandados pelo projeto. Visando a padronização e o reaproveitamento das diretrizes de projeto, o novo componente metálico manteve estritamente o mesmo dimensionamento geométrico e a área de projeção da base polimérica anterior. Dessa forma, preservou-se o sistema original de ajuste mecânico articulado, necessário para a correta inclinação angular e alinhamento do sensor em relação ao ângulo de azimute solar.

Como aprimoramento físico do arranjo, foram acrescentados dois furos concêntricos na região central da chapa de aço inoxidável, dimensionados especificamente para a fixação mecânica direta dos sensores. No protótipo original em PLA, a união desses componentes era realizada por meio de abraçadeiras plásticas de nylon que não garantiam a estabilidade necessária. Com a nova furação, a ancoragem dos transdutores passou a ser efetuada via união parafusada utilizando os próprios insertos roscados dos sensores, conferindo um travamento rígido, livre de folgas estruturais e substancialmente mais resistente a intempéries e esforços mecânicos.

A nova estrutura desenvolvida em aço inoxidável proporcionou maior robustez e estabilidade ao sistema, eliminando os problemas de deformação observados anteriormente no suporte em PLA. Além da melhoria estrutural, o novo material garante maior confiabilidade para operação contínua em ambiente externo, reduzindo riscos de falhas mecânicas causadas por temperatura e aumentando a vida útil do conjunto. O modelo final desenvolvido pode ser observado na Figura 16.

Figura 15 – Suporte estrutural dos sensores confeccionado em chapa de aço inoxidável.

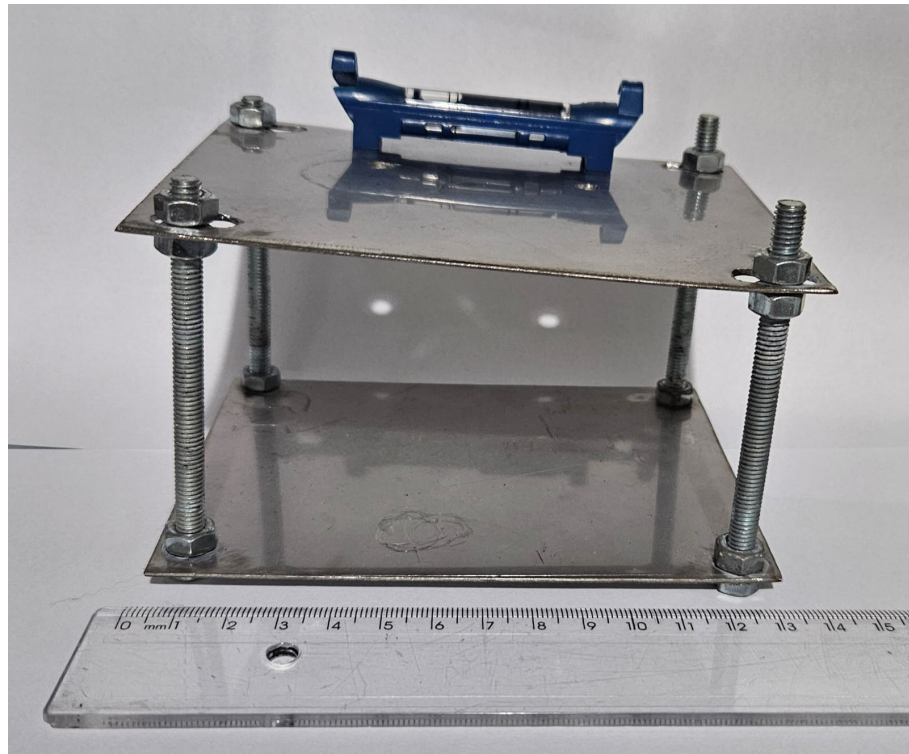


Figura 16 – Suporte estrutural dos sensores confeccionado em chapa de aço inoxidável.

3.2 ANÁLISE DE FALHA DO SUBSISTEMA DE ARMAZENAMENTO

Durante o processo de inspeção técnica, foi detectada uma falha permanente no cartão microSD original, tornando-o incapaz de armazenar ou fornecer dados ao sistema. Ocorrências dessa natureza são frequentemente relatadas em fóruns oficiais da comunidade Raspberry Pi envolvendo falhas, corrupção de dados e perda de funcionalidade de cartões microSD utilizados como dispositivo de armazenamento principal (Raspberry Pi Forum, 2026).

A documentação técnica do Raspberry Pi descreve a presença de um mecanismo de monitoramento de sobrecorrente no barramento do cartão microSD, evidenciando que condições elétricas anormais associadas ao subsistema de armazenamento são consideradas no projeto original do equipamento (Raspberry Pi Ltd, 2026). Esse mecanismo é acionado automaticamente a cada inicialização do sistema. Caso uma anomalia seja detectada, o bootloader interrompe a alimentação do cartão SD e aguarda um intervalo de 5 segundos antes de realizar uma nova sondagem no componente. Adicionalmente, essa condição de erro é sinalizada visualmente por meio do LED de atividade do equipamento, o qual emite um padrão de código composto por um lampejo longo seguido de dois lampejos curtos.

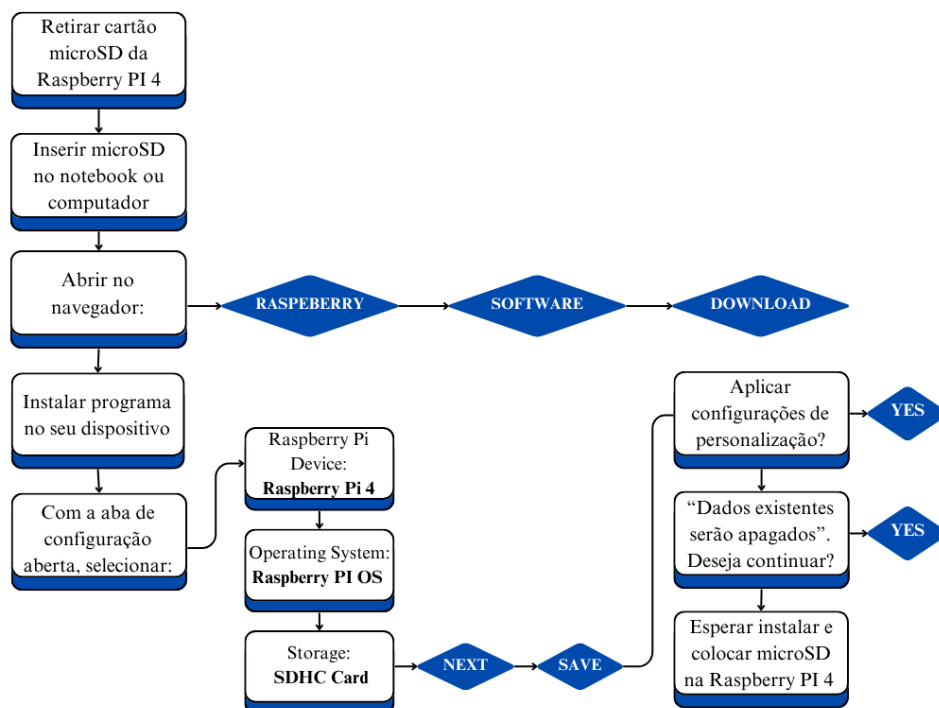
Neste projeto, o Raspberry Pi opera dentro de duas caixas que, embora garantissem a vedação contra a chuva, limitava a dissipação térmica ao ficar exposta ao sol direto, agindo como uma estufa. Do ponto de vista elétrico, o superaquecimento do semicondutor altera suas propriedades e eleva a demanda de corrente nos pinos de alimentação do dispositivo (Rabaey;

Chandrakasan; Nikolić, 2003). Esse confinamento de calor somou-se a um regime de operação severo, caracterizado pela gravação contínua de variáveis a cada um segundo durante metade do dia, acelerando o desgaste das células de memória Flash.

Assim, entende-se ser correto considerar a hipótese de que a elevada intensidade de gravações, combinada às condições térmicas de operação, tenha favorecido processos de degradação do microSD, culminando na perda de funcionalidade do memória flash do Raspberry Pi agregado ao protótipo. Tal ocorrência exigiu a substituição do dispositivo e a reconfiguração completa do sistema de armazenamento.

Para restabelecer o funcionamento do equipamento, o processo de restauração consistiu, basicamente, em conectar o novo cartão microSD a um computador e utilizar um software instalador para baixar e gravar a imagem do sistema operacional compatível. Durante essa gravação, aplicam-se também as configurações iniciais de personalização de rede e acesso do dispositivo. A sequência padronizada dessas etapas de preparação e instalação do sistema pode ser observada no fluxograma da Figura 17 (Kluj, 2025).

Figura 17 – Fluxograma de instalação do sistema operacional.



Fonte: Kluj (2025).

3.3 RECONFIGURAÇÃO DO SISTEMA E OTIMIZAÇÃO DO ACESSO REMOTO

Dada a necessidade de reconfiguração completa do sistema operacional devido à substituição do cartão MicroSD, realizou-se uma reavaliação das ferramentas de acesso remoto adotadas no projeto. Até então, a administração do Raspberry Pi ocorria por meio do TeamViewer. Embora

a plataforma fosse funcional e atendesse às necessidades iniciais, observaram-se eventuais episódios de lentidão e uma sutil perda na qualidade gráfica da interface durante o uso contínuo. Tais comportamentos, aliados à oportunidade de otimização proporcionada pela montagem do novo ambiente do sistema, motivaram a busca por uma alternativa que oferecesse uma experiência de navegação mais fluida e nítida.

A transição para o RealVNC foi fundamentada em uma análise técnica das arquiteturas de conexão de ambas as soluções. O TeamViewer é projetado primariamente para suporte técnico remoto e ambientes corporativos, utilizando mecanismos agressivos de compressão de dados para manter a estabilidade em conexões heterogêneas, o que pode justificar a leve degradação visual percebida (TeamViewer, 2022). Por outro lado, o RealVNC possui integração nativa com o Raspberry Pi OS, apresentando ampla adoção em sistemas embarcados, laboratórios e projetos de Internet das Coisas (IoT). Embora ambas as ferramentas possuam níveis de segurança arquitetural equivalentes, o RealVNC destaca-se neste contexto por permitir conexões em modo direto (peer-to-peer) (RealVNC, 2026). Essa característica reduz a dependência de infraestruturas externas e elimina etapas intermediárias de roteamento, minimizando a latência em redes locais ou VPNs.

Com a escolha validada, procedeu-se à configuração do RealVNC no novo ambiente. Como a ferramenta já vem pré-instalada no sistema do microcomputador, o processo consistiu inicialmente em habilitar o serviço do VNC Server nas configurações nativas de interface do Raspberry Pi, via comando *raspi-config*. Para viabilizar o acesso remoto fora da rede local sem a necessidade de reconfigurar o roteador com redirecionamento de portas, optou-se pela modalidade de conexão em nuvem. Esse processo foi finalizado mediante a autenticação de uma conta *RealVNC Connect* diretamente no aplicativo do servidor local, estabelecendo um túnel criptografado e contínuo entre o dispositivo e a nuvem.

Apesar das funcionalidades de nuvem do RealVNC, a necessidade de garantir uma infraestrutura de rede estritamente privada motivou a integração do Tailscale ao projeto. O Tailscale consiste em uma VPN de configuração zero desenvolvida sobre o protocolo WireGuard®, um padrão criptográfico de alta velocidade e baixo consumo de processamento (Tailscale Inc., 2026). A ferramenta resolve o problema de conectividade ao estabelecer uma *tailnet*, uma rede em malha que conecta os dispositivos de forma direta ponto a ponto e dispensa o uso de servidores intermediários. Dentro desse ambiente virtual seguro, o Raspberry Pi e a estação de controle comunicam-se por meio de endereços IPs estáticos dedicados, isolando o tráfego da internet pública e eliminando a necessidade de redirecionamento de portas no roteador.

A implementação prática do Tailscale ocorreu de forma simplificada, seguindo as diretrizes de inicialização rápida da plataforma. O processo iniciou-se com a instalação do software no Raspberry Pi através da execução do script automatizado fornecido pelo repositório oficial via terminal de comando. Após a instalação, o serviço foi inicializado no sistema operacional, gerando um link exclusivo para autenticação. Ao acessar esse Localizador Uniforme de Recursos (URL, do inglês *Uniform Resource Locator*) em um navegador e efetuar o login na interface

administrativa, o nó do Raspberry Pi foi formalmente autorizado e adicionado à *tailnet*. O mesmo procedimento de instalação e *login* foi realizado na máquina cliente. Uma vez estabelecida a malha, o painel do Tailscale atribuiu um endereço IP fixo e exclusivo ao Raspberry Pi, o qual passou a ser utilizado no cliente RealVNC Viewer para realizar o acesso remoto direto, estável e sob criptografia robusta. Desse modo, obteve-se uma evolução significativa na qualidade do acesso remoto.

3.4 OTIMIZAÇÃO DINÂMICA DA JANELA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Inicialmente, o sistema de aquisição de dados operava a partir de uma janela temporal fixa, dimensionada pelos extremos anuais de fotoperíodo para a localidade de Joinville (SC). Sob essa lógica, a rotina de monitoramento iniciava-se no horário correspondente ao amanhecer mais precoce do ano e encerrava-se no pôr do sol mais tardio. Contudo, devido à elevada taxa de amostragem configurada para um segundo (1 s), essa abordagem gerava severa ineficiência no gerenciamento de armazenamento. Durante as estações caracterizadas por dias mais curtos, a rigidez do horário fixo resultava no registro massivo de dados redundantes e espúrios em períodos de total ausência de irradiância solar, inflando os arquivos de armazenamento local, elevando o tráfego de dados na rede durante o upload automático e sobrecarregando pós-processamento das matrizes solarimétricas.

Com o intuito de otimizar o volume de dados gerados e mitigar o consumo desnecessário de memória e processamento, o algoritmo de controle foi reformulado por meio da integração da biblioteca computacional Astral. Essa ferramenta permitiu determinar, de forma dinâmica e diária, os horários exatos do nascer e do pôr do sol com base nas coordenadas geográficas da posição do sistema de hardware e no fuso horário local (Smith, 2026). Dessa maneira, a janela de operação do sistema passou a se ajustar automaticamente à sazonalidade astronômica, restringindo a atividade do microcontrolador aos períodos de efetivo potencial de geração energética.

Para quantificar o impacto dessa otimização, tomou-se como referência o solstício de inverno em Joinville, correspondente ao dia mais curto do ano. Na lógica de janela fixa antiga, a coleta ocorria ininterruptamente das 05:14 às 19:12 (13 horas e 58 minutos), enquanto a janela otimizada atual delimitou a atividade útil real das 06:59 às 17:34 (10 horas e 35 minutos). A diferença entre os métodos revelou um período de desperdício diário total de 203 minutos (105 minutos pela manhã e 98 minutos à noite) operando em total escuridão. Dada a frequência de amostragem de 1 Hz, o algoritmo anterior armazenava 12.180 registros completamente inúteis por arquivo diário. Como o sistema totalizava 50.280 linhas diárias, conclui-se que 24,22% de toda a base de dados coletada no solstício de inverno consistia em ruído ou valores nulos.

Adicionalmente, com o intuito de assegurar o registro integral dos fenômenos de transição luminosa, como o alvorecer e o crepúsculo, instituiu-se uma margem de segurança temporal no código. Assim, a rotina de coleta foi configurada para iniciar exatamente 3 minutos antes do nascer do sol calculado e encerrar-se 3 minutos após o pôr do sol. Essa modificação técnica

garantiu o mapeamento completo do ciclo diário de irradiância útil e, simultaneamente, promoveu uma redução significativa no volume de dados armazenados, consolidando uma arquitetura de monitoramento computacionalmente eficiente e otimizada para o escopo do projeto.

3.4.1 Automação de Inicialização e Estratégia de Redundância do Sistema

Como desdobramento da reconfiguração do sistema operacional e visando assegurar a total autonomia do sistema embarcado, foi implementada uma rotina de inicialização automática para a aplicação. Esse processo foi estruturado por meio da criação e do registro de um arquivo de serviço customizado no gerenciador de inicialização (systemd) do Linux. A configuração consistiu em mapear o script principal do projeto para que este seja tratado como um processo nativo, instruindo o núcleo do sistema operacional a disparar sua execução em segundo plano assim que a sequência de boot do hardware for concluída.

A relevância técnico-operacional dessa configuração justifica-se pelo impacto que interrupções não programadas na rede elétrica exercem sobre a continuidade dos ensaios. Na ausência desse mecanismo, a identificação tardia de uma queda de energia acarretaria extensos períodos de inatividade e a consequente perda irreversível de dados experimentais contínuos, comprometendo a amostragem. Portanto, o acionamento automatizado do sistema protege o projeto contra essas lacunas temporais na coleta, dispensando a necessidade de monitoramento humano constante sobre a infraestrutura.

Diante da vulnerabilidade identificada no dispositivo de armazenamento principal, a reconfiguração do sistema não se limitou a uma manutenção corretiva isolada. Em vez disso, foi projetada uma estratégia integrada de gerenciamento de configuração e redundância para mitigar os riscos de perda de dados experimentais e reduzir drasticamente o tempo de restauração do sistema em cenários de falhas de hardware. O pilar inicial dessa arquitetura de proteção consistiu na implementação do controle de versões por meio da ferramenta Git, vinculando o desenvolvimento local a um repositório remoto privado na plataforma GitHub. Esse arranjo o permitiu armazenar o código principal da aplicação, os arquivos de automação e o guia de instalação diretamente no repositório online. Assim, garantiu-se a segurança e o acesso contínuo aos códigos do projeto, através de um servidor externo mesmo em caso de perda do hardware.

Para viabilizar a rápida reconstrução do ambiente computacional, baseado em um Raspberry Pi 4 Model B executando a distribuição Debian 13, elaborou-se uma documentação técnica estruturada no arquivo SETUP.md. Este documento registra os parâmetros de inicialização do hardware, incluindo a interface de captura de imagem e o barramento I²C para sensores externos, além dos procedimentos de autenticação da VPN Tailscale para o restabelecimento imediato do acesso remoto. Complementarmente, a portabilidade das bibliotecas de software foi assegurada pelo uso de um ambiente virtual Python, cuja árvore de dependências foi exportada no arquivo requirements.txt. Essa padronização permite recriar o ambiente lógico de execução em qualquer novo dispositivo de armazenamento de maneira idêntica à utilizada nos ensaios originais, mitigando falhas por incompatibilidade de versões.

Em relação aos dados coletados, a integridade das imagens e das leituras dos sensores não foi afetada pela falha do hardware, visto que o sistema já realizava o envio automático desses arquivos para o Google Drive. O desafio na reconfiguração concentrou-se, portanto, em garantir a reinstalação rápida do software sem expor dados sensíveis. Nesse sentido, como não seria recomendável, por questões de segurança, disponibilizar as chaves de autenticação da API (*credentials.json* e *token.json*) no GitHub, optou-se por utilizar um pacote de *backup* compactado em nuvem. Essa separação garantiu que as configurações do projeto ficassem protegidas e que o sistema pudesse ser reativado em poucos minutos.

3.5 COMISSIONAMENTO E CALIBRAÇÃO DO MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE SINAIS

Durante as etapas preliminares de testes com o primeiro protótipo do sistema, foram identificadas instabilidades na leitura dos sinais analógicos, caracterizadas por flutuações atípicas e indícios de mau contato elétrico decorrentes da degradação das juntas de solda. Diante do comprometimento da confiabilidade metrológica desse circuito original, e sob a orientação técnica da equipe de pesquisadores do laboratório parceiro da UFSM, deliberou-se pela substituição integral do módulo. Visando garantir maior robustez estrutural e isolamento contra ruídos elétricos, uma nova placa de circuito impresso (PCI) foi desenvolvida e confeccionada com o suporte da equipe de pós-graduação da instituição, permitindo o avanço seguro para os ensaios de calibração.

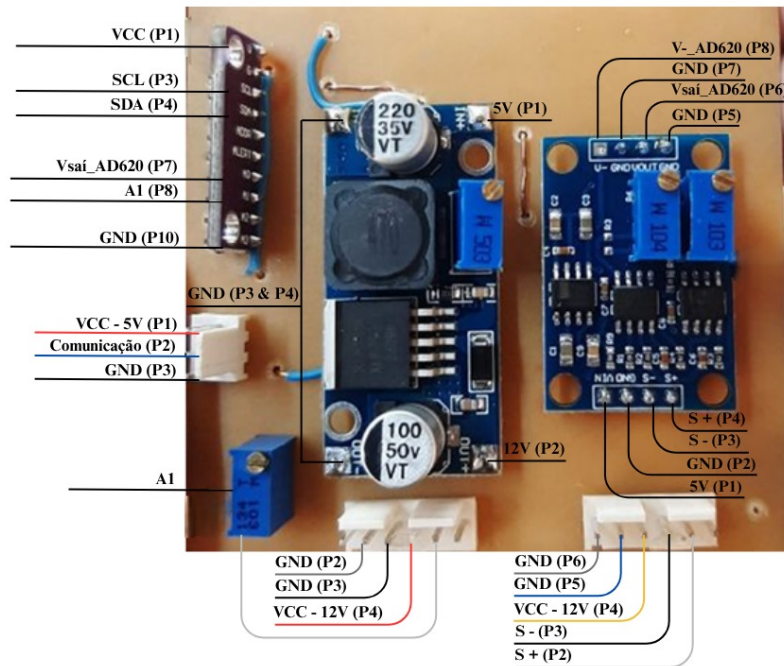
Após a confecção da nova placa de circuito impresso, procedeu-se com a etapa de comissionamento e calibração do estágio de condicionamento de sinais. Inicialmente, o sistema foi energizado com uma fonte externa capaz de fornecer uma tensão contínua de 5 V. A partir dessa alimentação primária, utilizou-se um conversor CC-CC elevador do tipo Boost, baseado no circuito integrado XL6009E1, para elevar o patamar de 5 V para 12 V, nível nominal estável exigido para a correta polarização dos circuitos integrados e sensores do equipamento. A arquitetura detalhada dos barramentos de interconexão, mapeamento de pinos e alimentação dos módulos pode ser consultada no circuito eletrônico completo apresentado na Figura 30 do Anexo A, já a imagem da placa em circuito impresso pode ser observada na Figura 18.

3.5.1 Canal de Amplificação Diferencial do Piranômetro SP510

Finalizado o ajuste dessa etapa de potência, deu-se início à calibração específica do canal de medição do piranômetro termoeletrônico SP510. Esse procedimento foi realizado sem a presença física do sensor de radiação no circuito, simulando empiricamente a resposta do transdutor por meio da inserção de níveis controlados de tensão contínua diretamente nos pinos de entrada do estágio de amplificação. Para o monitoramento e validação dos sinais gerados, utilizou-se um osciloscópio operando como instrumento de medição, além do microcomputador Raspberry Pi, o qual executava o script de aquisição de dados para confirmar os resultados lidos no osciloscópio.

Visando mitigar a interferência de ruídos eletromagnéticos de modo comum provenientes do ambiente, a aquisição dos sinais no conversor analógico-digital ADS1015 foi configurada

Figura 18 – Identificação das conexões entre os componentes da placa modular.



Fonte: Kluj (2025).

em modo diferencial. O canal A0, correspondente à saída do amplificador de instrumentação AD620 acoplado ao piranômetro termoeletrico SP510, foi mapeado e lido em relação ao canal A3, utilizado como referência virtual do sistema.

Durante a aferição, alguns cuidados técnicos foram necessários devido às características elétricas do módulo AD620. Como esse amplificador é alimentado por uma fonte simétrica gerada internamente por um circuito integrado inversor de tensão, a ausência do sensor deixa as entradas flutuantes. Esse estado induz o amplificador à saturação reversa, fazendo com que o mesmo injete uma tensão indesejada de aproximadamente -4,6 V em sua saída (ANALOG DEVICES, 2020). A inserção dessa polaridade negativa nos canais lógicos do ADS1015, cujo limite operativo aceita apenas tensões positivas entre 0 e 3,3 V, causaria a queima instantânea do componente. Por esse motivo, para evitar danos ao hardware, as entradas de sinal do módulo AD620 foram mantidas curto-circuitadas (TEXAS INSTRUMENTS, 2015).

A calibração do módulo AD620 ocorreu de forma sequencial utilizando os dois trimpots integrados de ajuste de offset e ganho. Com as entradas do circuito em curto-circuito, o trimpot de offset foi rotacionado até que a tensão de saída medida pelo osciloscópio atingisse o valor mais próximo possível de zero. Na sequência, para a calibração do ganho, considerou-se que a especificação de saída máxima teórica do sensor SP510 é de 90 mV (APOGEE INSTRUMENTS, 2026). Para estabelecer uma margem de segurança e proteger o conversor analógico-digital, definiu-se o teto de 3,0 V como o limite para o fundo de escala do sinal amplificado. Simulando a entrada máxima de 90 mV no canal, o trimpot de ganho foi regulado até que a saída estabilizasse

no limiar projetado de 3,0 V, estabelecendo um fator de amplificação linear de aproximadamente 33,33 V/V. Os detalhes a respeito das tensões simuladas, valores lidos e o respectivo erro percentual, calculado com base na divergência entre a razão medida experimentalmente e o ganho ideal projetado, estão dispostos na Tabela 2.

Quadro 2 – Dados experimentais de condicionamento de sinal do circuito do sensor SP510.

Entrada Simulada (V)	Leitura Digital AD (V)	Razão Medida (V/V)	Erro Percentual (%)
0,030	1,003	33,4333	0,31
0,045	1,498	33,2889	0,12
0,060	1,996	33,2667	0,19
0,075	2,496	33,2800	0,15
0,090	3,010	33,4444	0,34

Fonte: Autoria própria (2026).

3.5.2 Canal de Atenuação de tensão do Piranômetro SP215

Para a etapa de comissionamento do segundo canal de medição, correspondente ao piranômetro fotoelétrico SP215, adotou-se uma abordagem de atenuação de sinal. Diferentemente do modelo SP510, que exige amplificação, o transdutor SP215 fornece uma tensão analógica de saída em um nível mais elevado, operando na faixa de 0V à 5 V. Como esse valor máximo excede o limiar de segurança operacional e a tensão de referência suportada pelo estágio de aquisição do conversor analógico-digital ADS1015, fez-se necessário o rebaixamento do sinal (APOGEE INSTRUMENTS, 2022).

Para adequar essa tensão de forma precisa e manter a baixa complexidade do circuito elétrico, empregou-se um trimpot multivoltas de 10 k Ω configurado como um divisor de tensão ajustável. O procedimento de calibração ocorreu de forma independente e também sem a presença do sensor. Injetou-se uma tensão contínua de exatos 5,0 V na entrada do divisor resistivo, simulando a condição teórica de irradiância máxima de saída do sensor SP215.

Com o auxílio do osciloscópio para medição em tempo real e a validação pelas leituras no script do Raspberry Pi, o eixo do trimpot foi rotacionado até que a tensão aferida em seu terminal central, o qual está conectado ao canal A1 do conversor ADS1015, fosse reduzida para 3,0 V. Esse ajuste prático estabeleceu uma razão de divisão de tensão de 0,6 V/V, garantindo que toda a excursão de operação do sensor SP215 possa ser devidamente amostrada pelo sistema digital sem riscos de saturação ou danos ao conversor analógico-digital. Os resultados obtidos nos ensaios de atenuação e linearidade para este canal, incluindo o erro percentual da medição em relação à razão teórica ideal, encontram-se compilados na Tabela 3.

Quadro 3 – Dados experimentais do ensaio de atenuação e linearidade do circuito divisor de tensão para o sensor SP215.

Entrada Simulada (V)	Leitura Digital AD (V)	Razão Medida (V/V)	Erro Percentual (%)
4,77	2,850	0,60	0,42
4,01	2,412	0,60	0,25
3,01	1,828	0,61	1,21
2,00	1,236	0,62	3,00
1,01	0,664	0,66	9,57

Fonte: Autoria própria (2026).

3.5.3 Integração do Módulo de Captura Óptica e Invólucro de Proteção

Com o intuito de complementar a coleta de dados quantitativos obtidos pelos sensores de irradiância e temperatura descritos anteriormente, implementou-se um subsistema secundário voltado ao monitoramento visual do experimento através da instalação de uma câmera dedicada. A inclusão desse dispositivo teve como propósito inicial correlacionar as leituras elétricas e meteorológicas com o estado real do céu, permitindo analisar de que forma a presença, a densidade e o movimento das nuvens interferem diretamente na coleta dos dados de radiação solar.

Ainda que, no presente trabalho, o registro visual atue apenas como um mecanismo de validação imediata, a integração de registros visuais apresenta grande relevância quando projetada para um cenário futuro ou de larga escala. Na gestão avançada de sistemas fotovoltaicos e no controle dinâmico da rede elétrica, a análise do comportamento de nuvens é fundamental para prever quedas abruptas de geração e permitir que grandes produtores identifiquem se uma perda de eficiência decorre de fatores climáticos transitórios ou de falhas físicas e sujeira nos painéis (Chow et al., 2011) (Mellit; Kalogirou; Pavan, 2018). Essa contextualização confere um propósito claro à adição do dispositivo, conectando o experimento atual a demandas tecnológicas de alta escala.

Para viabilizar essa validação, selecionou-se o módulo Raspberry Pi Camera v1.3 devido a características específicas de hardware: o dispositivo utiliza o sensor OmniVision OV5647 de 5 megapixels com foco fixo, o que oferece baixo custo, dimensões reduzidas e compatibilidade nativa com o microcomputador por meio do barramento dedicado CSI (Camera Serial Interface), evitando o uso de portas USB (RASPERRY PI FOUNDATION, 2026). Na arquitetura do sistema, essa interface de câmera já se encontra previamente ativada e disponível no ambiente do sistema operacional desde a inicialização da placa.

A partir disso, foi desenvolvido um script em Python para estabelecer a comunicação com o hardware utilizando a biblioteca *subprocess*, gerenciando o fluxo de controle para realizar capturas de imagem em um intervalo fixo de 15 minutos. A adoção dessa elevada taxa de amostragem fotográfica justificou-se pela necessidade de constituir, durante a janela temporal da pesquisa, um volume amostral robusto e diversificado para a etapa de testes e validação dos

algoritmos de processamento digital de imagens.

A cada ciclo de tempo, o código invoca o processador de imagem nativo do sistema, o utilitário *rpicam-still*, configurado com os parâmetros de captura imediata –*immediate* e um tempo de exposição prévio de 500 milissegundos –*t 500*. Esse atraso de meio segundo é o passo técnico que permite ao sensor calibrar o brilho e o balanço de branco automaticamente antes de consolidar o arquivo no formato JPEG, que é nomeado de forma cronológica com base no carimbo de data e hora do sistema.

O funcionamento diurno dessa rotina de capturas é condicionado de forma automatizada pelos horários do sol na região de Joinville (SC). Para isso, o algoritmo utiliza localmente a biblioteca *Astral* do Python, conforme detalhado anteriormente. A partir dos dados de localização, a biblioteca calcula de forma matemática os horários exatos do nascer e do pôr do sol convertidos para o fuso horário local, eliminando a dependência de requisições externas à rede. Com essas referências temporais atualizadas, o código restringe o acionamento da câmera estritamente aos períodos com luz solar útil, mantendo o sensor em modo de espera durante a noite para evitar capturas redundantes e sem iluminação.

A transferência e a organização das imagens geradas ocorre em lotes com frequência de uma vez ao dia. O script estabelece comunicação com o Google Drive API utilizando o protocolo de autenticação OAuth2, que valida o acesso seguro por meio dos arquivos de credenciais *credentials.json* e tokens *token.json* locais. Inicialmente, o algoritmo verifica a existência de uma pasta remota identificada com a data vigente (AAAA-MM-DD); caso não seja localizada, a estrutura é criada automaticamente na nuvem. As fotos acumuladas no período são enviadas em lote e, após a confirmação de recebimento seguro pela API do Drive, o comando *os.remove* elimina a imagem correspondente do cartão MicroSD. Essa rotina impede o preenchimento total do armazenamento local e garante a autonomia contínua do monitoramento.

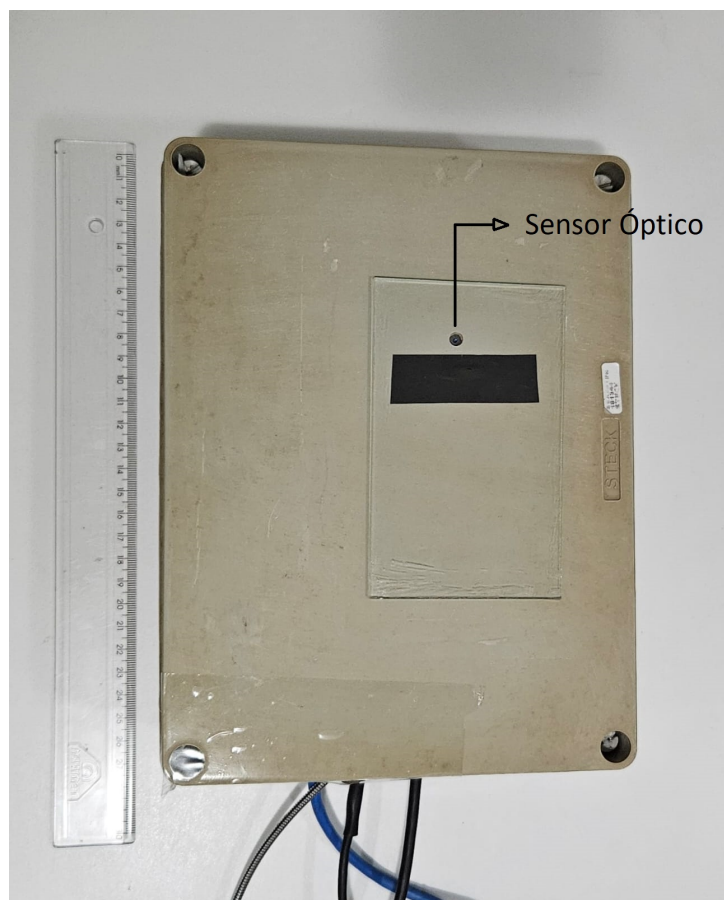
No que tange à integração física do *hardware*, o módulo da câmera foi conectado à placa de processamento por meio de um cabo plano flexível (*FPC — Flexible Printed Circuit*) já integrado à câmera. Para a proteção dos componentes eletrônicos contra o ambiente externo, utilizou-se a estrutura de duplo invólucro já utilizada anteriormente. No invólucro interno, que abriga a eletrônica sensível do sistema, foi necessária a confecção de uma abertura retilínea para a passagem do cabo FPC. Esta fenda foi realizada por meio de um processo de fusão térmica controlada do polímero da estrutura, garantindo um canal adequado para transpassar o cabo sem submetê-lo a tensões mecânicas, torções ou dobras severas que pudessem comprometer as trilhas condutoras.

O invólucro externo atua como a barreira principal de proteção ambiental do protótipo. Para a exposição da lente da câmera, realizou-se uma perfuração mecânica circular na face superior da estrutura utilizando uma furadeira manual equipada com broca de diâmetro compatível. O diâmetro do orifício foi dimensionado para permitir apenas a projeção da lente óptica para o ambiente externo, mantendo o corpo técnico do sensor protegido no interior da estrutura. O ajuste físico entre a câmera e o invólucro apresentou encaixe estanque e preciso, sendo fixada por meio

de uma fixação adesiva. Essa forma de fixação foi escolhida para permitir que o componente seja facilmente removido caso necessite de manutenção e mantenha-se estável durante o processo de captura de imagem.

Por fim, para mitigar a infiltração de água e umidade, foi posicionado na parte externa do invólucro, um visor de vidro de alta transparência atuando como visor protetor sem causar atenuação significativa ou distorção na qualidade das imagens capturadas sobre a abertura da lente na parte externa do invólucro, como observado na Figura 19. A fixação e a vedação periférica deste visor foram consolidadas com a aplicação de um selante de silicone comercial, assegurando o isolamento do protótipo contra agentes externos.

Figura 19 – Vista superior do invólucro externo com a instalação do sensor óptico.



Fonte: Autoria própria (2026).

3.6 ESTIMATIVA DE COBERTURA DE NUVENS POR PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Uma vez consolidada a estrutura do sistema de monitoramento e validada a rotina de captura fotográfica por meio da câmera instalada, os registros visuais obtidos passam a fundamentar a etapa de quantificação da fração de cobertura de nuvens no plano local. Essa métrica serve como variável fundamental para a posterior correlação entre os índices de nebulosidade, o

comportamento da irradiância solar global e os reflexos diretos na potência gerada pelos módulos fotovoltaicos do sistema.

A presença de nebulosidade exerce influência direta sobre o balanço de radiação que atinge a superfície terrestre. Dependendo de características físicas como espessura óptica, densidade e composição microfísica, as nuvens atenuam a irradiância incidente e provocam o fenômeno de variabilidade intermitente, rampas de potência, na geração centralizada ou distribuída (Atitude Reflexiva, 2016). Portanto, a identificação automática e a classificação da densidade dessas formações tornam-se fundamentais para modelar os efeitos atmosféricos sobre o desempenho energético do sistema. Com esse propósito, foram avaliadas duas técnicas de processamento digital de imagens: o método da Razão Vermelho/Azul (R/B) e a segmentação no Espaço de Cores HSV.

3.6.1 Método baseado na Razão entre os Canais Vermelho e Azul (R/B)

Esta abordagem explora os dados contidos nos canais da matriz RGB (*Red*, *Green*, *Blue*) da imagem, correlacionando-os com os fenômenos físicos de óptica atmosférica. Em condições de céu limpo, predomina o Espalhamento de Rayleigh, processo no qual as moléculas atmosféricas, por possuírem dimensões muito menores que o comprimento de onda da luz visível, espalham mais intensamente as bandas de menor comprimento (faixa do azul) (Atitude Reflexiva, 2016). Isso resulta em valores elevados no canal B e reduzidos no canal R . Por outro lado, as nuvens são compostas por gotículas de água e cristais de gelo com diâmetros superiores aos comprimentos de onda da luz visível, ativando o Espalhamento de Mie. Esse fenômeno espalha o espectro de forma uniforme, igualando as intensidades dos canais R , G e B , o que confere à nuvem uma assinatura visual branca ou acinzentada.

Com base nesse comportamento, calcula-se pixel a pixel a razão entre as intensidades dos canais vermelho e azul. Na formulação teórica do método, a razão é normalmente definida como a divisão simples entre os canais vermelho e azul (R/B). Entretanto, durante a implementação computacional, foi adicionada uma constante de estabilização C ao denominador, conforme apresentado na Equação 2, para evitar possíveis divisões por zero em pixels que apresentem intensidade nula no canal azul.

$$\text{Razão } R/B = \frac{R}{B + C} \quad (2)$$

A inserção de constantes de estabilização numérica é uma técnica amplamente consolidada na literatura de processamento digital de imagens e computação gráfica. Essa modificação visa contornar indefinições matemáticas, como a divisão por zero, que ocorrem frequentemente quando os valores dos pixels se aproximam de limites nulos (Gonzalez; Woods, 2009; Wang et al., 2004).

Ressalta-se ainda, que a intensidade dos canais nas imagens de 8 bits processadas varia naturalmente de 0 a 255. Como o sistema restringe as capturas estritamente aos períodos diurnos

com luz solar útil, os valores dos pixels registrados são elevados. Seguindo a mesma premissa das práticas de estabilização citadas, a adoção empírica de uma constante unitária ($C = 1,0$) na Equação 2 gera uma divergência da ordem de milésimos em relação à razão teórica original para esses cenários de alta iluminância. Uma vez que os limiares de classificação operacional (0,4 e 0,6) atuam na primeira casa decimal, conclui-se que o acréscimo dessa constante gera um desvio matematicamente desprezível. Dessa forma, garante-se a estabilidade numérica do código contra erros de divisão por zero sem comprometer a exatidão da segmentação.

, conclui-se que o acréscimo do valor unitário gera um desvio matematicamente desprezível. Dessa forma, garante-se a estabilidade numérica do código contra erros de divisão por zero sem comprometer a exatidão da segmentação.

A classificação da cobertura de nuvens ocorre por meio de limiarização, cujos valores de corte foram definidos de forma empírica pela autora e estruturados em três faixas operacionais:

- **Céu Limpo:** pixels com razão inferior a 0,4, indicando dominância do Espalhamento de Rayleigh;
- **Nuvens Finas:** pixels com razão entre 0,4 e 0,6, tipificando formações de alta altitude e baixa espessura óptica, como *cirrus* e *cirrostratus*, que causam menor impacto na atenuação da radiação;
- **Nuvens Densas:** pixels com razão superior a 0,6, caracterizando massas opacas de baixa altitude, como *stratocumulus* e *nimbostratus*, associadas a quedas severas na irradiância solar direta.

Além da determinação das porcentagens de céu limpo, nuvens finas e nuvens densas, o algoritmo gera uma representação visual da matriz de razões R/B por meio de um mapa de calor. Essa visualização permite analisar a distribuição espacial dos valores calculados para cada pixel da imagem, evidenciando regiões com diferentes características atmosféricas. Como a razão R/B tende a assumir valores menores em áreas de céu limpo e valores mais elevados em regiões cobertas por nuvens, o mapa de calor fornece uma interpretação visual do comportamento da segmentação realizada pelo algoritmo. Dessa forma, torna-se possível verificar não apenas a quantidade total de cobertura de nuvens presente na cena, mas também sua distribuição ao longo do campo de visão da câmera, facilitando a análise qualitativa dos resultados obtidos.

3.6.2 Método baseado no Espaço de Cores HSV

A segunda metodologia utiliza o espaço de cores HSV, composto pelos parâmetros de Matiz (*Hue*), Saturação (*Saturation*) e Valor (*Value*). A escolha deste modelo justifica-se pelo desacoplamento entre a informação cromática e a intensidade luminosa (brilho), tornando o algoritmo de detecção mais robusto contra variações de iluminância natural causadas pela variação do ângulo zenital do Sol ou por alterações automáticas de exposição da câmera (Ferreira; Richetto; Alvalá, 2023).

O parâmetro da matriz mapeia a tonalidade pura em um espectro angular que, na biblioteca OpenCV, é digitalizado no intervalo de 0 a 180. O azul característico do céu limpo concentra-se estritamente na faixa espectral entre 90 e 135. O algoritmo atua por exclusão complementar, aplicando um filtro por intervalo linear através de limites inferiores e superiores definidos matricialmente por:

$$\text{Limite Mínimo} = [90, 40, 40] \quad \text{e} \quad \text{Limite Máximo} = [135, 255, 255] \quad (3)$$

Todos os pixels cujos vetores HSV encontram-se contidos nesse intervalo são indexados em uma máscara binária representativa do céu limpo. Na sequência, aplica-se uma operação lógica de inversão binária (*NOT* bit a bit). Dessa forma, todas as regiões que não apresentam a assinatura cromática do azul são classificadas como cobertura de nuvens. Complementando a segmentação, os canais *H*, *S* e *V* são isolados e analisados individualmente para avaliar a distribuição de transmitância e refletividade da cena sob diferentes condições de inclinação solar.

3.6.3 Refinamento por Operações Morfológicas de Abertura

Para corrigir imperfeições decorrentes do processo de segmentação e mitigar a presença de falsos positivos, ambas as técnicas foram submetidas a um filtro por operação morfológica de abertura ($\circ$). Esta operação consiste na aplicação encadeada de duas transformações clássicas da álgebra de conjuntos: uma erosão ($\ominus$) seguida por uma dilatação ($\oplus$), utilizando o mesmo elemento estruturante (*B*). Matematicamente, o processo é definido pela Equação 4:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (4)$$

Onde *A* representa a matriz binária segmentada obtida nos passos anteriores. Inicialmente, a erosão remove estruturas convexas e pixels isolados na máscara que não possuem conectividade espacial mínima com o elemento estruturante. Esse estágio elimina ruídos de alta frequência térmica do sensor de imagem, artefatos gerados pela compressão de arquivo (padrão JPEG) e reflexos localizados. Posteriormente, a dilatação expande as bordas das massas binárias remanescentes, restaurando a morfologia e as dimensões originais das macroestruturas sem reintroduzir os ruídos eliminados.

No método da Razão *R/B*, utilizou-se um elemento estruturante quadrado com dimensões de 3×3 pixels. Para o método HSV, aplicou-se um núcleo (*kernel*) de 5×5 pixels. A adoção de um operador de maior dimensão no espaço HSV justifica-se pela necessidade de uma filtragem espacial mais agressiva, neutralizando as oscilações espúrias nos canais de saturação e brilho periféricos que poderiam induzir o algoritmo a erros de classificação nas transições entre o céu e os contornos das nuvens.

3.6.4 Calibração Espacial da Trajetória Solar para Tratamento do Efeito de Borda das Nuvens

Em sistemas de monitoramento do céu voltados para o estudo de Eventos de Amplificação da Radiação Solar, conhecidos como REE (Ferreira; Richetto; Alvalá, 2023), a avaliação do brilho das nuvens é frequentemente prejudicada pela iluminação desigual do céu e pela intensa radiação direta na região ao redor do sol (Yang et al., 2017). Além disso, ocorre o chamado efeito de borda das nuvens, onde o espalhamento da luz solar nas gotículas de água nas extremidades de uma formação nebulosa cria um contorno excessivamente brilhante. Isso faz com que algoritmos de segmentação convencionais confundam esse fenômeno óptico com o próprio disco solar ou com o céu limpo.

Para contornar esse problema, isolar essas interferências e viabilizar a correlação exata entre a irradiância medida em superfície e os pixels de nuvens causadores do REE, foi desenvolvido neste trabalho um algoritmo de rastreamento e calibração geométrica para prever dinamicamente a posição exata do sol nas imagens. A estratégia adotada consiste em calcular matematicamente as coordenadas em pixels x, y do centro do sol no plano da imagem a cada minuto de observação. Inicialmente, os ângulos de azimuth, representado por ϕ , e zênite, representado por θ_z , são obtidos através da biblioteca *pvl* *python*, que utiliza o horário e a localização geográfica da estação para determinar a posição astronômica do astro.

Após a conversão desses ângulos para radianos, o mapeamento para o plano da imagem de 2.592×1.944 pixels é realizado através das seguintes equações de projeção centralizadas:

$$x = x_c + r \cdot \sin(\theta_z) \cdot \sin(\phi + \psi) \quad (5)$$

$$y = y_c + r \cdot \sin(\theta_z) \cdot \cos(\phi + \psi) \quad (6)$$

Nessas equações, os termos x_c e y_c definem o centro óptico da imagem, correspondendo à metade da largura e da altura, respectivamente, enquanto r é o raio escalar que ajusta o tamanho e a escala da trajetória projetada aos pixels da tela. O termo (θ_z) controla a distância radial do sol em relação ao centro do sensor, e as funções trigonométricas do azimuth distribuem a posição nos eixos horizontal e vertical, corrigidas pelo ângulo de rotação ψ , configurado como 0 para manter o alinhamento direto com o Norte geográfico. Como os sistemas digitais posicionam a origem (0,0) no canto superior esquerdo da matriz de pixels, aplica-se a inversão do eixo vertical através da fórmula $y_{plot} = H - y$, onde H é a altura total da imagem, equivalente a 1.944 pixels.

A câmera utilizada possui uma abertura angular limitada de 76° em sua diagonal. Para fins de contextualização óptica, essa abertura restrita, aliada ao fator de corte inerente ao tamanho reduzido do sensor digital, resulta em um campo de visão horizontal que se aproxima de 50° a 60° . Na fotografia convencional, esse ângulo equivale ao de uma lente de distância focal padrão, entre 43 mm e 50 mm em formato *Full Frame*, que captura uma área muito semelhante ao cone de atenção principal do olho humano, região onde enxergamos com foco e nitidez (Goldstein,

2013). Devido a essa limitação do campo visual, a lente trabalha de forma linear e quase sem distorções esféricas acentuadas nas bordas da imagem permitindo que a escala de projeção seja calibrada adequadamente apenas modificando o valor do raio escalar r (Langford; Fox; Smith, 2010).

No entanto, caso o projeto utilize no futuro uma lente olho de peixe (*fisheye*) de 180° , este modelo matemático linear precisará ser alterado; o termo $r \cdot (\theta_z)$ precisará ser substituído por uma função de projeção equidistante, dada por $r \cdot \theta_z$, ou por polinômios de calibração específicos, como o modelo de Scaramuzza, necessário para corrigir a forte distorção visual que ocorre nas extremidades dessas lentes (Zubic; Gehrig; Scaramuzza, 2024).

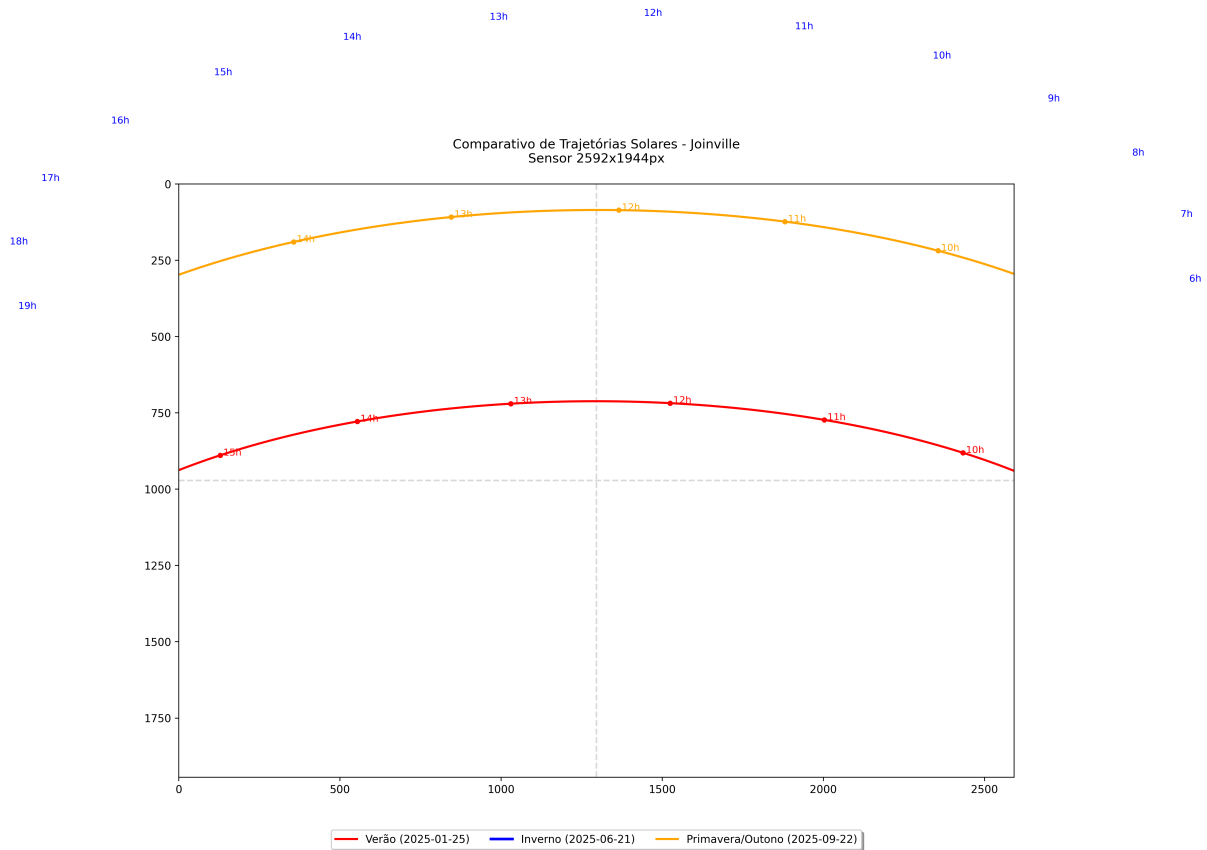
A implementação atual deste modelo possibilita o mapeamento da trajetória do sol minuto a minuto, gerando a base espacial necessária para aplicar filtros de atenuação ou *masks* de oclusão sincronizados sobre a região circunsolar. Ao isolar as interferências diretas do disco solar, o algoritmo prepara o terreno para que as fotografias digitais sejam processadas no espaço de cores HSV, com foco exclusivo no canal de Valor ou Brilho, denotado por V ou B (Ferreira; Richetto; Alvalá, 2023), representando um avanço prático crucial para as fases subsequentes da pesquisa.

Para demonstrar o funcionamento do algoritmo, o gráfico unificado apresentado na Figura 20 traduz as posições do sol em três períodos distintos diretamente para a escala de pixels do sensor da câmera de 2.592×1.944 , onde o eixo horizontal representa a largura X e o eixo vertical a altura Y . Nesta representação comparativa, a linha contínua mapeia o caminho do sol ao longo do dia, e cada ponto indica a posição do astro em sua respectiva hora cheia. O topo do gráfico está alinhado com a orientação do Norte geográfico, o que significa que o sol nasce do lado direito, Leste, atinge sua altura máxima ao meio-dia solar, na região central, e se põe do lado esquerdo, Oeste.

Ao rodar o algoritmo para o solstício de inverno, em 21 de junho de 2025, conforme apresentado na Figura 20, observa-se que todas as marcações horárias e a linha da trajetória são plotadas fora e acima dos limites úteis da imagem. Esse comportamento ocorre porque a câmera está instalada em posição zenital, apontada diretamente para o topo do céu, com uma abertura angular limitada, enquanto o sol no inverno, para as coordenadas de Joinville, atinge ângulos muito baixos em relação ao horizonte, passando completamente fora do campo de visão do sensor. Para esta curva específica, o algoritmo foi configurado para manter a exibição dos rótulos horários mesmo fora do quadro, permitindo a validação geométrica do modelo.

Em contrapartida, ao executar o algoritmo para um dia de verão, exemplo 25 de janeiro de 2025, e o equinócio de 22 de setembro de 2025, as trajetórias descritas são exibidas apenas nos intervalos em que o astro cruza o enquadramento do sensor. Dessa forma, o comparativo unificado justifica visualmente por que a validação prática e o ajuste fino do raio r não podem ser feitos com fotografias reais obtidas no inverno, demonstrando a consistência do modelo computacional ao apontar que o astro está, de fato, fora do enquadramento atual da câmera.

Figura 20 – Comparativo unificado das trajetórias solares no sensor da câmera para o solstício de inverno, um dia de verão e equinócio em Joinville.



Fonte: Autoria própria (2026).

3.7 GERENCIAMENTO DE INFRAESTRUTURA DE NUVEM E EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA DE IMAGENS

No que tange à infraestrutura de comunicação e armazenamento de dados em nuvem, o sistema utilizava originalmente um endereço de correio eletrônico institucional vinculado à UFSM. Este canal havia sido estruturado para atender ao projeto de pesquisa financiado pelo CNPq voltado a sistemas fotovoltaicos, mencionado anteriormente. Todavia, em virtude do encerramento das atividades do projeto cooperativo e da conclusão do ciclo de fomento pelas instituições parceiras, UFSM e UFPE, o referido domínio foi descontinuado em decorrência dessa readequação administrativa.

A conta institucional outrora utilizada disponibilizava uma quota ampliada de armazenamento em nuvem. Com a desativação desse serviço, a arquitetura de repositório permaneceu ancorada no ecossistema da plataforma Google Drive; contudo, o fluxo de dados do protótipo foi redirecionado para uma conta comercial convencional e gratuita de usuário oferecida pela Google. Consequentemente, o projeto passou a ser submetido ao limite de cota padrão de 15 GB compartilhado por essa modalidade de serviço.

Paralelamente, a dinâmica de operação do protótipo passou a envolver uma frequência

constante de aquisição, gerando um fluxo contínuo de registros numéricos e fotográficos ao longo do dia. Enquanto a arquitetura original lidava estritamente com dados textuais e tabulares dos sensores de irradiância e temperatura, cujo impacto no armazenamento em disco era praticamente desprezível, a incorporação do subsistema óptico elevou exponencialmente a demanda por memória física devido ao peso computacional dos arquivos de imagem. Embora o volume atual seja suportado temporariamente pela plataforma gratuita, o horizonte de operação contínua e o consequente acúmulo desse histórico fotográfico motivaram reflexões acerca da sustentabilidade e da escalabilidade do armazenamento a longo prazo.

Diante dessa nova perspectiva de aprimoramento da arquitetura frente ao volume gerado pelas capturas, considerou-se pertinente avaliar estratégias para otimizar o gerenciamento do espaço em disco. Nesse contexto, a primeira abordagem analisada consistiu na viabilidade de aplicar algoritmos de compactação secundária, como *.zip* ou *.tar.gz*, aos pacotes semanais de imagens capturadas. Contudo, os ensaios empíricos evidenciaram uma redução volumétrica desprezível no tamanho final dos arquivos, apresentando um ganho inferior a 1%.

Sob a ótica da teoria da informação, esse comportamento corrobora o princípio de que arquivos previamente submetidos a compressões com perda, como o formato JPEG adotado no sistema, possuem alta entropia de dados. Como a redundância estatística e espacial já foi eliminada na geração do arquivo, torna-se ineficaz qualquer tentativa de compactação posterior em nível de sistema de arquivos (Wallace, 1991).

O formato WebP baseia-se no princípio da codificação preditiva intra-quadro (*intra-frame predictive coding*) (Google LLC, 2021). Diferente do padrão JPEG, que segmenta a imagem em blocos rígidos e independentes de 8×8 pixels para aplicar a Transformada Discreta de Cosseno (DCT) e a posterior etapa de quantização (Gonzalez; Woods, 2009), o algoritmo do WebP utiliza os blocos de pixels vizinhos já processados para prever os valores dos pixels subsequentes. Em termos práticos, o algoritmo reconstrói o cenário estimando os gradientes de cor e luminosidade, salvando apenas a diferença matemática (o resíduo) entre a predição e a imagem real. Essa abordagem possibilita uma redução no tamanho dos arquivos, sem introduzir os artefatos de macroblocos borrados que comprometeriam as análises subsequentes no espaço de cores HSV.

A implementação prática desse fluxo metodológico inicia-se com a captura automatizada das imagens do céu pelo dispositivo embarcado Raspberry Pi, o qual armazena os arquivos nativamente em seu diretório local. Posteriormente, essas mídias são transmitidas para uma estrutura de pastas organizada por datas no Google Drive, um processo que ocorre de forma assíncrona em segundo plano para garantir que o fluxo de capturas da câmera não seja interrompido por oscilações na rede de dados.

Uma vez centralizados na nuvem, os arquivos passam por um algoritmo de otimização em massa desenvolvido em ambiente Python, executado de forma manual e sob demanda no ambiente Google Colab. Essa abordagem manual configura uma solução temporária, adotada em função das restrições da versão gratuita do Colab, que não dispõe de agendamento nativo de rotinas. Essa estrutura visa atender à etapa atual do projeto, projetando-se uma transição futura

para uma arquitetura automatizada a fim de gerenciar o volume histórico de capturas e evitar o esgotamento da cota de armazenamento em nuvem.

O *script* utiliza a biblioteca *Pillow* (PIL) para realizar uma varredura recursiva em todas as subpastas, identificando arquivos nos formatos JPEG e PNG. Para evitar o processamento redundante e o desperdício de recursos computacionais, o algoritmo implementa uma verificação de existência prévia: caso o arquivo correspondente em formato WebP já exista no diretório, a operação é ignorada, conferindo idempotência ao processo. Em seguida, as imagens válidas são convertidas explicitamente para o espaço de cores RGB para eliminar canais de transparência residuais e, finalmente, são salvas no formato WebP.

O parâmetro de qualidade da gravação foi estipulado pela autora no valor de 80, atuando diretamente no estágio de quantização da compressão com perdas. Essa configuração serve como um fator de escala matemático que descarta ruídos de fundo e microdetalhes irrelevantes para o olho humano, controlando o limiar de degradação dos blocos de pixels de modo a maximizar a redução do arquivo sem introduzir distorções cromáticas que comprometeriam o processamento posterior das imagens.

Para avaliar o impacto real dessa otimização, o algoritmo foi aplicado em um lote experimental composto por 184 fotografias. Os resultados volumétricos revelaram uma redução drástica no armazenamento, onde o espaço total ocupado pelas imagens originais contraiu de 151,16 MB para apenas 31,18 MB após a conversão. Em termos globais, essa transição representou uma economia de 119,98 MB de memória física, o que equivale a uma redução geral de 79,37% no espaço em disco, com uma eficiência redutiva média de 82,72% por foto individual e um tamanho médio por arquivo que decresceu de 841,26 KB para 173,55 KB. Cabe ressaltar que, do ponto de vista estético e de percepção visual, as diferenças estruturais e cromáticas entre os arquivos originais e comprimidos são completamente imperceptíveis a olho nu, mantendo a nitidez e as texturas das formações nebulosas.

Além da fidelidade visual, a integridade qualitativa das imagens foi rigorosamente preservada para fins científicos. Para validar a viabilidade do novo formato, todas as 184 imagens otimizadas foram submetidas ao algoritmo de segmentação e mensuração da porcentagem de cobertura de nuvens detalhado anteriormente nesta seção. O delta da variação na métrica final de cobertura de nuvens entre as imagens originais e as comprimidas em WebP apresentou uma oscilação máxima de apenas 0,02%. Do ponto de vista prático e analítico, essa divergência é considerada irrelevante para a rotina do sistema, uma vez que as oscilações e margens de erro já observadas rotineiramente no próprio método de análise, decorrentes de variações ambientais de iluminação e das limitações intrínsecas da segmentação por razão R/B e canais HSV, são significativamente superiores a este limiar. Desse modo, os testes confirmam a plena compatibilidade do formato WebP com o método de análise já estabelecido, garantindo alta eficiência volumétrica sem comprometer a acurácia dos resultados obtidos.

3.8 METODOLOGIA DE VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Para realizar a validação experimental e a análise de consistência dos dados que foram coletados pelo protótipo de monitoramento, buscou-se um conjunto de dados meteorológicos oficiais para servir como linha de base e referência. Essa validação cruzada foi viabilizada ao constatar que o local de instalação do protótipo, situado no perímetro urbano de Joinville (Santa Catarina), encontrava-se em um raio de proximidade geográfica reduzido em relação à Estação Meteorológica Automática de referência (Código 1051) pertencente à Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI) (EPAGRI/CIRAM, 2026). Localizada sob as coordenadas geográficas de Latitude $-26,3419^\circ$ e Longitude $-48,9889^\circ$, com uma altitude de 47 metros, essa proximidade territorial assegura que ambos os sistemas estejam submetidos ao mesmo perfil macroclimático geral e à similar cobertura de nuvens.

A rede de monitoramento da EPAGRI opera por meio de estações automatizadas que transmitem os registros ambientais em tempo real, cujos instrumentos meteorológicos atendem às diretrizes e padrões de calibração estabelecidos pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) (World Meteorological Organization, 2018). No que tange à mensuração da radiação solar global horizontal, a estação automática de Joinville utiliza um piranômetro de alta precisão baseado em termopilha, classificado de acordo com as especificações da norma internacional ISO 9060 (International Organization for Standardization, 2019).

Este tipo de instrumento de referência possui absorvedores de corpo negro protegidos por cúpulas de vidro, o que garante uma resposta espectral plana e imune a desvios seletivos causados pelas variações na colimetria da luz solar ao longo do dia (Vignola; Michalsky; Stoffel, 2020). Tais características conferem às leituras de radiação extraídas do portal oficial o grau de confiabilidade metrológica necessário para a validação das análises deste trabalho.

3.8.1 Tratamento de Frequência de Amostragem e Sincronização Temporal

Para realizar a análise comparativa entre as duas bases de dados, foi necessário compatibilizar as diferentes frequências de amostragem: enquanto a estação da EPAGRI disponibiliza seus registros de forma consolidada a cada hora, o protótipo desenvolvido realiza a coleta e o armazenamento das leituras dos sensores em escala de segundos. Essa compatibilização temporal foi realizada por meio de um algoritmo em Python, utilizando a biblioteca *Pandas* (McKinney, 2010), que calculou a média aritmética de todas as subamostras em segundos registradas dentro de cada intervalo de uma hora. Esse processo de agrupamento integrou os dados do protótipo em uma série temporal horária idêntica à cronologia da EPAGRI, permitindo o alinhamento exato para o cálculo dos coeficientes de correlação.

3.8.2 Análise Estatística e Métricas de Desempenho

Com as séries temporais devidamente alinhadas e compatibilizadas na mesma escala horária, tornou-se possível conduzir a análise estatística dos dados. Para isso, aplicou-se o Coefi-

ciente de Correlação de Pearson (r), uma ferramenta analítica que se justifica pela necessidade de avaliar, de forma quantitativa e padronizada, como as diferentes condições atmosféricas afetam o comportamento e a resposta dinâmica dos sensores desenvolvidos.

Por se tratar de um índice adimensional que varia entre -1 e 1 , essa métrica permite mensurar não apenas a intensidade da associação linear entre o protótipo e a referência oficial, mas também identificar o sentido dessa relação. Dessa forma, analisa-se matematicamente o impacto de variáveis como o ganho térmico e a flutuação da umidade do ar sobre o desempenho dos sensores de irradiância, isolando o comportamento do hardware sob diferentes cenários climáticos.

Operacionalmente, essa avaliação estatística foi estruturada em duas etapas principais. A primeira etapa consistiu no confronto individual das séries temporais de cada sensor de irradiância e do sensor de temperatura do protótipo com os seus respectivos correspondentes homologados na estação meteorológica da EPAGRI, estabelecendo a acurácia externa do sistema face a uma referência oficial. Na segunda etapa, realizou-se a correlação direta entre os dois sensores de irradiância (SP510 e SP215) integrados no próprio protótipo, visando mensurar a consistência interna, a repetibilidade das leituras do circuito eletrônico e as distinções de resposta decorrentes das diferentes tecnologias ópticas empregadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo dedica-se à apresentação e discussão dos resultados obtidos durante o período de monitoramento em campo. Inicialmente, realiza-se a validação metrológica dos dados coletados por meio da correlação estatística com a estação meteorológica oficial da EPAGRI, seguida por uma análise da consistência interna e da resposta espectral dos sensores do protótipo. Posteriormente, investiga-se o comportamento dinâmico do sistema frente à intermitência atmosférica e, por fim, avalia-se o desempenho dos algoritmos de processamento digital de imagens na estimativa e classificação da cobertura de nuvens.

4.1 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO E VALIDAÇÃO FRENTE À ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA

A análise dos resultados iniciou-se pelo confronto estatístico entre as leituras do sensor de irradiância por termopilha SP510 e os dados oficiais da estação meteorológica EPAGRI 1051. O dispositivo apresentou uma correlação positiva considerada forte com a Radiação Média da estação, atingindo um coeficiente de $r = 0,8457$. O comportamento gráfico e o alinhamento dos pontos que comprovam essa forte associação linear podem ser observados no primeiro painel da Figura 21(a).

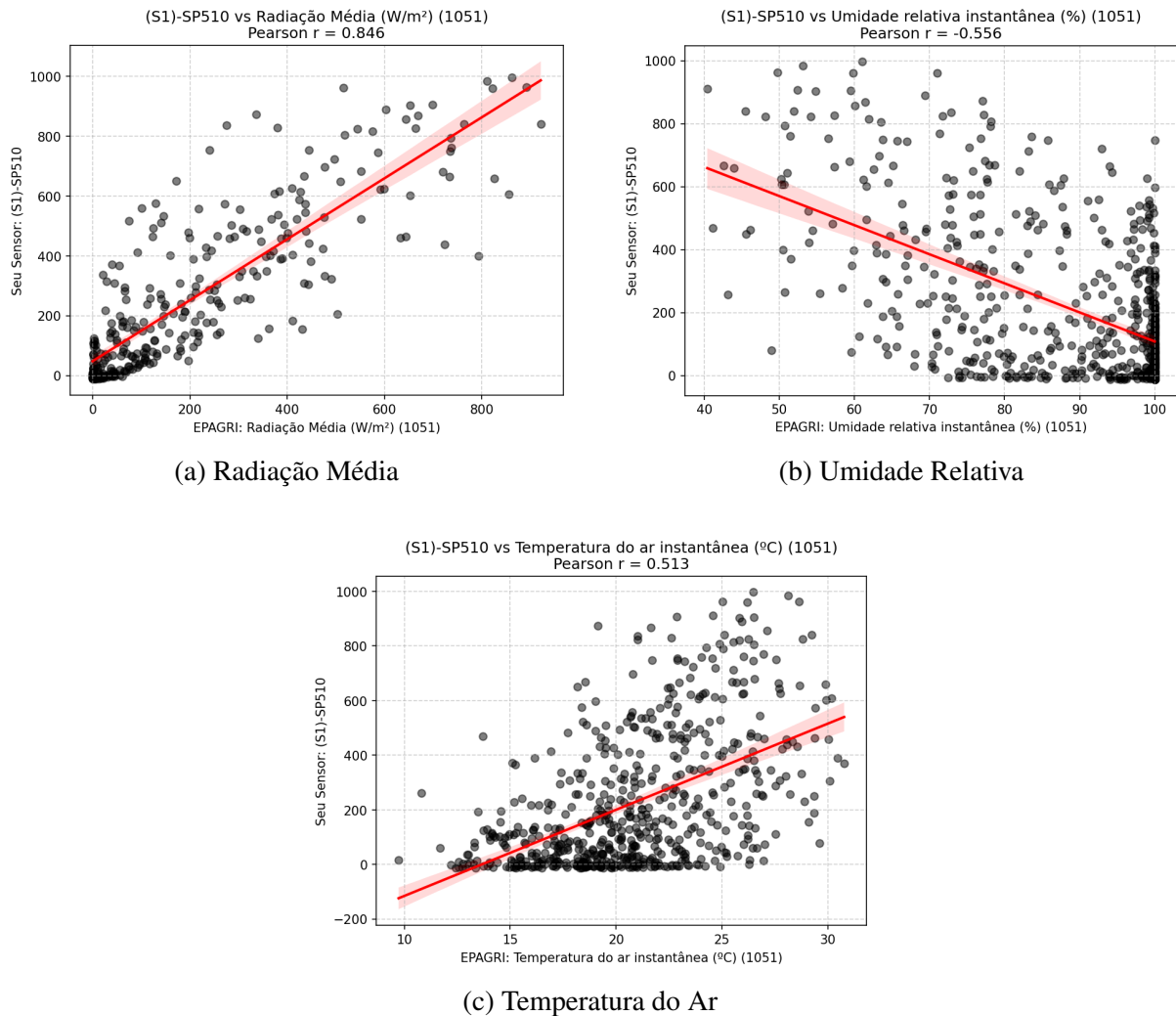
Complementarmente, os dados registraram o acoplamento físico do sensor com as dinâmicas atmosféricas locais de Joinville: observou-se uma correlação negativa moderada com a Umidade Relativa Instantânea ($r = -0,5562$), ilustrada na Figura 21(b), o que reflete a queda natural da umidade nos horários de maior pico solar. Por fim, a Figura 21(c) expõe a correlação positiva moderada de $r = 0,5134$ com a Temperatura do Ar Instantânea, evidenciando graficamente como o ganho de irradiância solar dita o aquecimento da atmosfera ao longo do dia.

De maneira análoga, o sensor de irradiância baseado em fotodiodo de silício SP215 exibiu uma convergência muito forte com o padrão meteorológico oficial. O coeficiente de correlação obtido para a Radiação Média foi de $r = 0,8395$, cujo espalhamento de pontos e linha de tendência linear correspondente são apresentados na Figura 22(a). As respostas desse segundo dispositivo frente às demais variáveis ambientais consolidaram a coerência do sistema experimental, registrando uma correlação negativa com a Umidade Relativa de $r = -0,5371$, demonstrada na Figura 22(b), e uma correlação positiva com a Temperatura Instantânea de $r = 0,5126$, visível na Figura 22(c).

A sutil diferença numérica de apenas 0,0062 a favor do Sensor 1 sugere que o modelo por termopilha possui uma calibração de fábrica ligeiramente mais estável ou melhor resposta ao ângulo de incidência dos raios solares para o período avaliado, embora ambos os sensores demonstrem plena aptidão para o monitoramento de campo.

No que tange ao monitoramento térmico, após a filtragem de dados brutos para a remoção de ruídos de leitura, o sensor de temperatura integrado ao protótipo apresentou uma correlação positiva muito forte com o termômetro de referência da estação oficial, registrando um índice de

Figura 21 – Diagramas de dispersão e coeficientes de correlação para o Sensor (S1)-SP510 frente às variáveis da EPAGRI: (a) Radiação Média, (b) Umidade Relativa e (c) Temperatura do Ar.

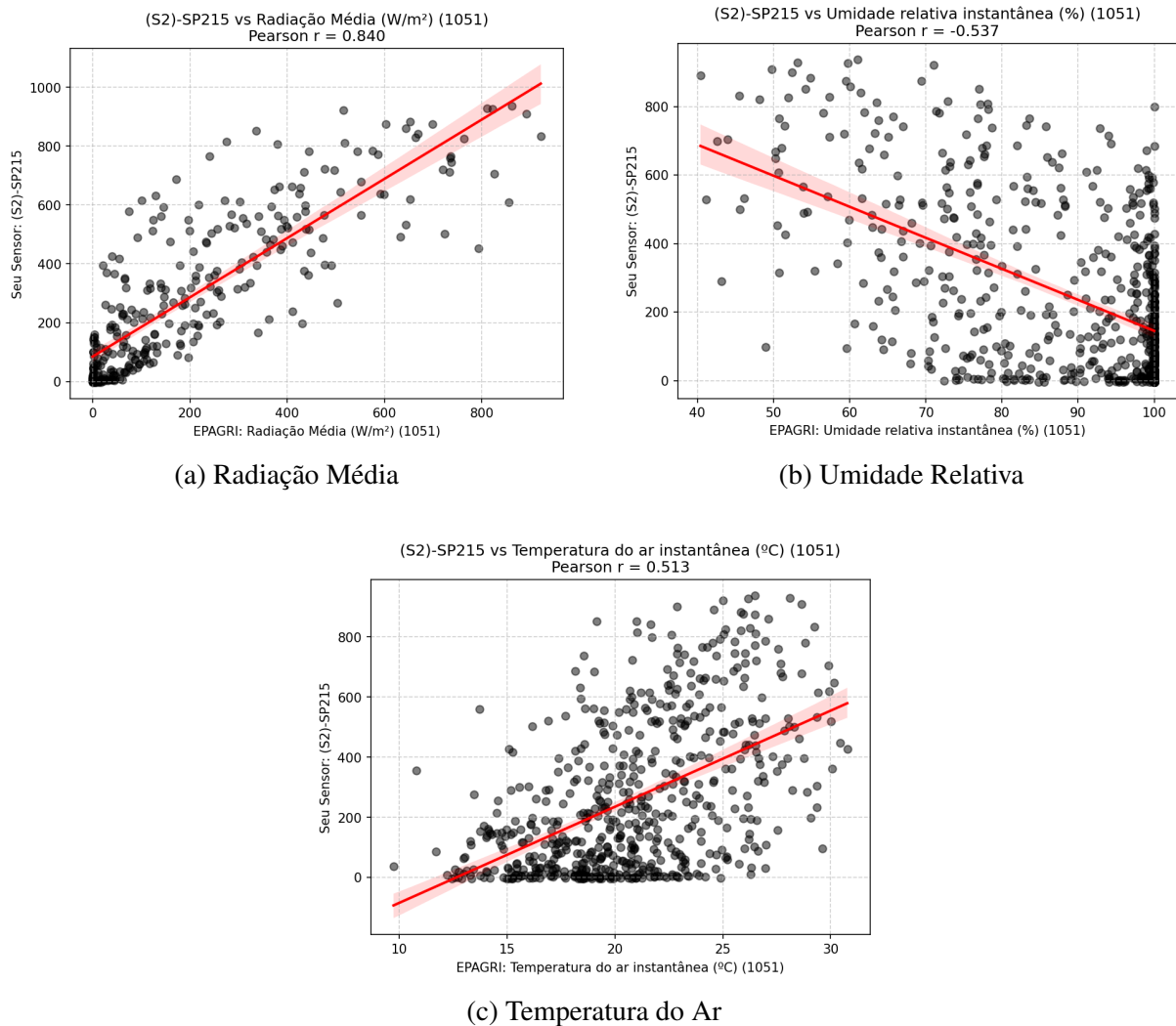


Fonte: Autoria própria (2026).

$r = 0,753$, conforme exposto na Figura 23. Essa forte associação linear valida a estabilidade e a acurácia do circuito eletrônico desenvolvido para o acompanhamento das flutuações climáticas diárias. Contudo, a análise do diagrama de dispersão revela um deslocamento sistemático e uma maior amplitude nos registros do dispositivo experimental (eixo Y) em comparação à referência homologada (eixo X), com picos que ultrapassam os 50°C enquanto a estação registra máximas próximas a 30°C.

Essa divergência de amplitude é fisicamente explicada pelas severas disparidades microclimáticas e de condições de instalação existentes entre os dois pontos de medição. Enquanto o termômetro da estação EPAGRI opera sob condições normatizadas de campo aberto, instalado sobre solo gramado e resguardado por um abrigo meteorológico de persianas dupla-persianadas que garante ventilação constante e proteção total contra a radiação solar direta (EPAGRI/CIRAM, 2026; World Meteorological Organization, 2018), o protótipo operou exposto à radiação solar

Figura 22 – Diagramas de dispersão e coeficientes de correlação para o Sensor (S2)-SP215 frente às variáveis da EPAGRI: (a) Radiação Média, (b) Umidade Relativa e (c) Temperatura do Ar.



Fonte: Autoria própria (2026).

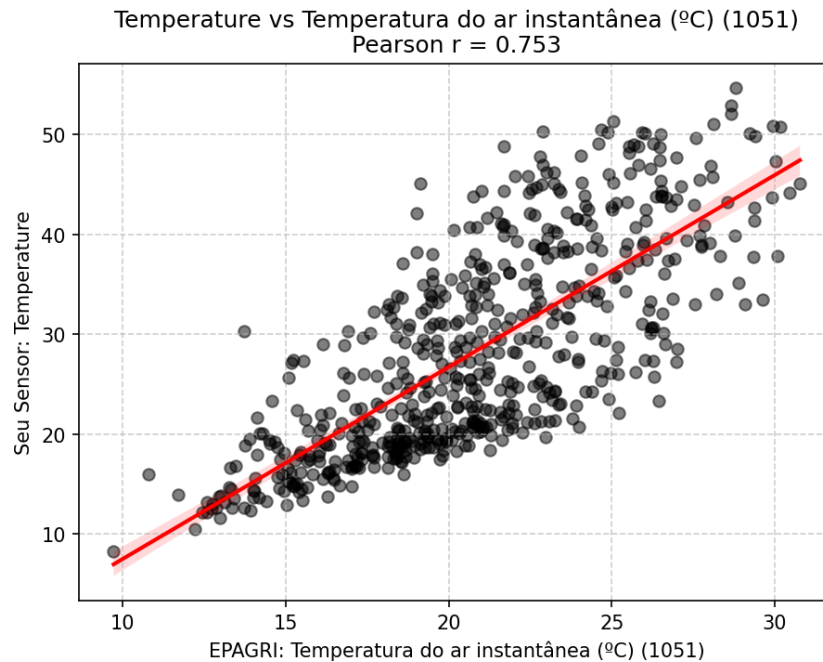
direta e posicionado sobre a superfície de um telhado metálico urbano.

Cabe destacar que o propósito do protótipo não é registrar a temperatura ambiente do ar à sombra, mas sim mensurar o estresse térmico real ao qual um módulo fotovoltaico (PV) está efetivamente sujeito. Como a elevação da temperatura aumenta a agitação térmica no semicondutor e reduz a eficiência global de conversão das células solares, capturar o intenso ganho térmico local provocado pela radiação direta e pela condução do telhado fornece um panorama físico muito mais realista para as análises de geração de energia (Dubey; Sarvaiya; Seshadri, 2013).

Fatores locais como a alta condutividade térmica e a baixa inércia do elemento metálico de cobertura, combinadas com a irradiação térmica infravermelha emitida pela própria superfície do telhado para o invólucro do circuito, provocam um superaquecimento localizado pronunciado. Esse fenômeno microclimático justifica o ganho térmico proporcional registrado pelo protótipo,

mantendo a integridade e a forte sensibilidade linear demonstrada pelo sensor face à tendência macroclimática regional.

Figura 23 – Diagrama de dispersão e correlação entre o sensor de temperatura do protótipo e a Temperatura do Ar da EPAGRI.



Fonte: Autoria própria (2026).

Apesar da forte correlação linear obtida face à estação de referência da EPAGRI, cabe ressaltar uma variável física que acompanhou parte dos ensaios em campo a deformação do suporte estrutural primário, fabricado em polímero PLA. Como as elevadas temperaturas comprometeram a estabilidade dimensional da peça, o nivelamento e o ângulo de incidência dos piranômetros foram gradativamente alterados. Considerando que não é possível determinar o exato instante cronológico em que o material começou a ceder, eventuais flutuações atípicas ou dispersões isoladas nos registros podem ser um reflexo direto dessa alteração geométrica, e não apenas de fenômenos atmosféricos. Contudo, a integridade da tendência macroclimática e os altos índices de correlação observados, superiores a 0,83, atestam que, no contexto geral da análise exploratória, essa interferência mecânica não comprometeu de forma crítica a coerência dos resultados.

4.2 ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA INTERNA E RESPOSTA ESPECTRAL INTER-SENSORES

Ao isolar a análise comparativa direta entre os dois sensores de irradiância, sp510 e sp215, determinou-se um coeficiente de correlação de Pearson extremamente elevado ($r = 0,9948$). Como pode ser observado graficamente através da densidade de pontos alinhada na Figura 24, este índice confirma a excelente repetibilidade do hardware e a estabilidade do circuito de leitura

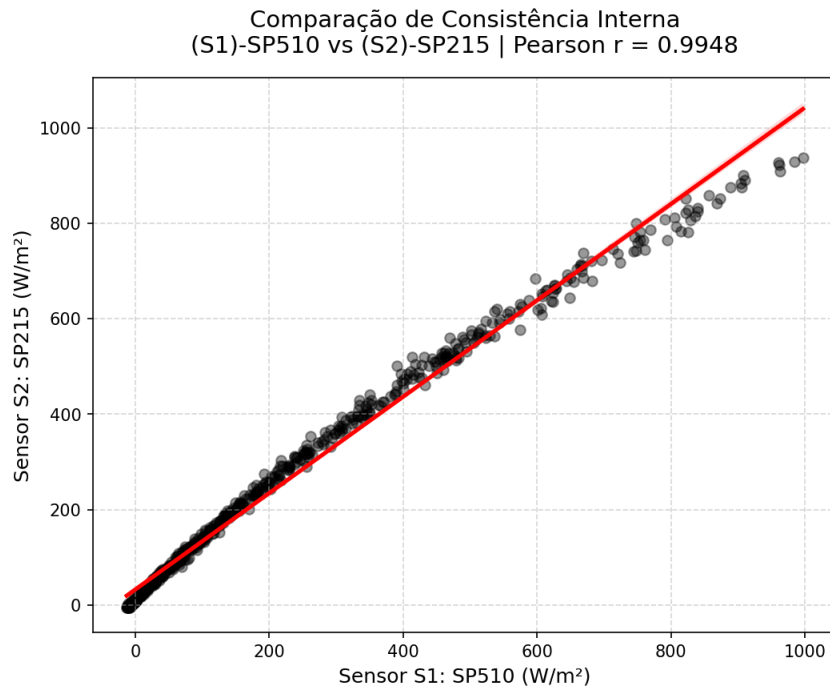
eletrônica, demonstrando que ambos os dispositivos respondem de forma síncrona e harmônica ao mesmo estímulo de luz solar.

Contudo, a inspeção visual detalhada da distribuição dos pontos na Figura 24 revela uma sutil e bem definida distorção não linear, manifestando-se na forma de uma parábola convexa (voltada para baixo). Este padrão geométrico caracteriza um laço de histerese diurna clássico na instrumentação solar (Vignola; Michalsky; Stoffel, 2020). Esse comportamento óptico e físico decorre diretamente das tecnologias distintas de transdução física empregadas na fabricação de cada instrumento. O modelo SP510 baseia-se em uma termopilha de corpo negro, cujo princípio de absorção térmica confere uma resposta espectral ampla e linear, conforme detalhado anteriormente. Em contrapartida, o modelo SP215 emprega um fotodiodo de célula de silício, possuindo uma banda espectral restrita com picos de sensibilidade seletiva, conforme também já apresentado.

A curvatura ascendente observada na faixa intermediária de irradiância, tipicamente compreendida entre 400 W/m^2 e 600 W/m^2 em dias de céu limpo, reflete o comportamento dos sensores durante os períodos de meia-manhã e meia-tarde. Nesses intervalos horários, sob condições de baixa nebulosidade, o Sol encontra-se em um ângulo zenital elevado, forçando os raios solares a percorrerem uma maior distância através da atmosfera terrestre, o que eleva a Massa de Ar física. Esse aumento de trajetória provoca o espalhamento de comprimentos de onda curtos, luz azul e UV, gerando uma iluminação solar temporariamente enriquecida na faixa do infravermelho próximo (Vignola; Michalsky; Stoffel, 2020). Como o silício do sensor SP215 (eixo Y) é altamente responsivo a essa faixa exata, este sensor superestima a leitura da energia disponível nesses cenários específicos, forçando os pontos a se projetarem verticalmente acima da linha média de tendência linear. É importante ressaltar que em dias nublados ou com alta atenuação por nuvens, essa dispersão tende a se comportar de forma distinta devido ao espalhamento difuso uniforme.

Por outro lado, no platô superior da Figura 24, que representa irradiâncias de topo alcançadas em condições de céu aberto (acima de 800 W/m^2), o fenômeno se inverte, promovendo um achatamento horizontal da parábola para a direita. Esta região do gráfico descreve as condições próximas ao meio-dia solar, ápice onde o Sol atinge o zênite local e a radiação atravessa a menor camada atmosférica possível. Nessas condições de radiação direta, há uma incidência significativa de ondas térmicas longas. A termopilha do sensor SP510 (eixo X) absorve integralmente esse espectro térmico infravermelho devido à sua sensibilidade plana por corpo negro, enquanto o chip semiconductor do SP215 apresenta limitação física para computar tais comprimentos de onda. Consequentemente, o SP510 registra valores proporcionalmente superiores, deslocando a curva horizontalmente para a direita. A simetria observada no fechamento do arco nas extremidades diurnas consolida a precisão analítica do arranjo e ilustra as assinaturas espectrais da dinâmica atmosférica diária.

Figura 24 – Diagrama de dispersão comparativo direto entre o Sensor S1 (SP510) e o Sensor S2 (SP215), evidenciando o laço de histerese diurna decorrente do desvio espectral atmosférico.



Fonte: Autoria própria (2026).

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA INTER-SENSORES DO PROTÓTIPO

Para compreender a dinâmica termodinâmica do hardware desenvolvido, realizou-se a análise de correlação interna entre a temperatura registrada pelo sensor integrado do protótipo e os níveis de irradiância computados pelos sensores SP510 e SP215. Os resultados revelaram coeficientes de correlação de Pearson extremamente elevados, atingindo $r = 0,894$ para o Sensor 1, termopilha, e $r = 0,905$ para o Sensor 2, fotodiodo de silício. Essas associações lineares forte e muito forte evidenciam um elevado acoplamento térmico do sistema, demonstrando que o aquecimento interno do invólucro do protótipo é ditado de forma direta e proporcional pela intensidade da radiação solar global incidente.

Este comportamento físico complementa e valida a discussão anterior acerca da divergência de temperatura observada em relação à estação meteorológica oficial da EPAGRI, onde o protótipo registrou máximas próximas a 50°C frente aos 30°C da referência. O elevado índice de Pearson obtido internamente comprova que esse ganho térmico não decorre de derivas aleatórias do sensor ou de ruídos elétricos no circuito, mas sim de um fenômeno físico real de transferência de calor por condução e radiação. À medida que os sensores de irradiância registram o aumento da energia solar, a estrutura física do protótipo absorve essa energia radiante, convertendo-a em calor que eleva a temperatura interna do gabinete plástico urbano.

Além disso, a sutil diferença entre os coeficientes, com o sensor baseado em silício apresentando uma correlação ligeiramente superior em comparação ao modelo por termopilha,

encontra sustentação na física dos semicondutores. Conforme discutido no laço de histerese espectral, o fotodiodo de silício possui uma sensibilidade seletiva e acentuada na faixa do infravermelho próximo. Como essa mesma faixa do espectro solar é a principal responsável pelo efeito térmico direto, promovendo o aquecimento imediato das superfícies, o comportamento dinâmico do sensor de silício mostra-se diretamente proporcional à elevação de temperatura do próprio invólucro, superando a resposta espectral plana e baseada no balanço térmico lento do sensor por termopilha. Esse alinhamento de métricas consolida a robustez dos dados coletados e a previsibilidade física do comportamento do hardware em campo.

4.3.1 Dinâmica Atmosférica Intermitente e o Impacto da Nebulosidade Global

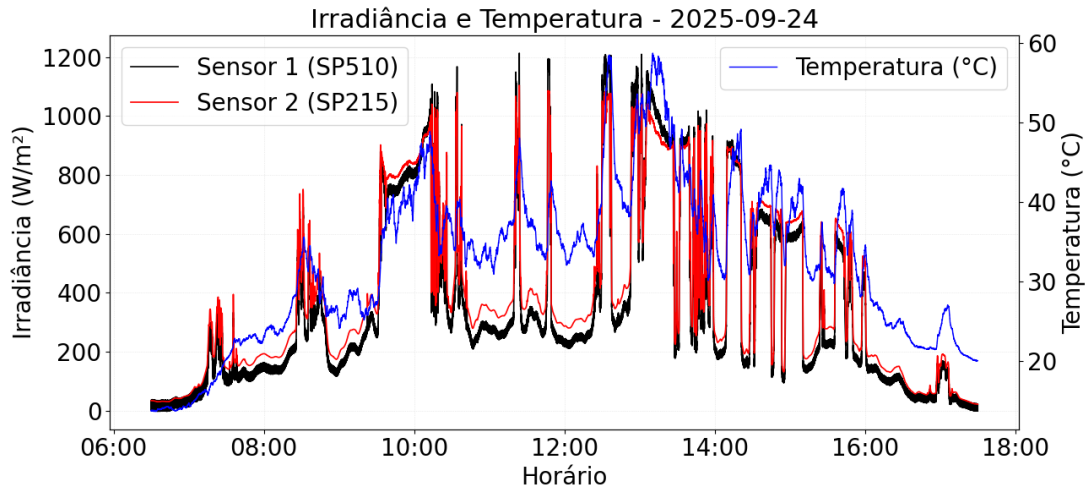
Ao longo das campanhas de medição em campo, o protótipo foi exposto a diversas condições atmosféricas que alteraram drasticamente o perfil de captação dos transdutores. Um cenário de especial interesse para a análise do comportamento dinâmico do hardware ocorre em períodos marcados por forte instabilidade climática regional. Como pode ser observado no recorte temporal apresentado na Figura 25, correspondente ao dia 24 de setembro de 2025, o comportamento das curvas de irradiância afasta-se completamente do padrão parabólico e suavizado típico de um dia ensolarado sem nuvens.

Nesse registro, manifesta-se uma alternância violenta e contínua entre vales profundos de sombreamento e recuperações rápidas da potência radiante incidente. Essa assinatura serrilhada e de alta frequência reflete o trânsito veloz de formações nebulosas sobre a área urbana de testes, ocludando intermitentemente o disco solar. O aspecto físico mais marcante dessa dinâmica são os picos agudos que se projetam imediatamente antes e depois dos bloqueios de luz, instantes nos quais as leituras rompem os limiares esperados e chegam a ultrapassar a marca de 1.200 W/m^2 .

Esse fenômeno, discutido no referencial teórico deste trabalho, consiste no efeito de borda de nuvem. Nessas zonas de transição, a radiação direta que escapa da obstrução soma-se à radiação difusa intensificada pelo espalhamento óptico nas microgotículas de água periféricas da nuvem, gerando picos transientes de sobreirradiância na superfície metálica de testes.

É fundamental destacar que o comportamento exibido na Figura 25 não se limitou a um evento isolado, mas representou um padrão sistemático identificado em diversos outros dias do monitoramento com características de céu parcialmente encoberto. A detecção consistente e precisa dessas flutuações rápidas e picos severos de potência corrobora a excelente sensibilidade e o reduzido tempo de resposta dos sensores SP510 e SP215 projetados.

Figura 25 – Perfil diário de irradiância e temperatura para o dia 24 de setembro de 2025, evidenciando flutuações severas e picos de sobreirradiância.



Fonte: Autoria própria (2026).

4.4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS ALGORITMOS DE ESTIMATIVA DE COBERTURA DE NUVENS

Para validar a eficiência do algoritmo baseado na escala de cores vermelho e azul desenvolvido no ambiente Google Colab, foi realizado o processamento em lote de uma amostragem contendo 134 fotografias do horizonte local. Essas capturas foram realizadas ao longo de vários dias e sob diferentes ângulos de inclinação do dispositivo, permitindo mapear o comportamento do algoritmo frente a variações geométricas e de luminosidade diária. As imagens foram obtidas utilizando um dispositivo móvel equipado com um sensor de câmera de 50 MP, abertura de diafragma de $f/1.8$, distância focal de 24 mm e tamanho de sensor de $1/1.56''$, garantindo um padrão de alta resolução e sensibilidade óptica para as análises. Essa base de dados foi dividida em quatro categorias críticas de cobertura de céu, garantindo-se uma população mínima de 25 imagens para cada cenário.

A metodologia adotada para classificar a assertividade do algoritmo consistiu em uma análise qualitativa comparativa direta entre a cena real e os produtos gerados pelo código. O critério para categorizar um resultado como satisfatório baseou-se na capacidade da máscara em delimitar fielmente a geometria macro das massas de nuvens visíveis na fotografia. Caso o modelo computacional realizasse a falsa detecção de céu limpo como área nublada, ou ignorasse por completo formações nubladas expressivas, o resultado da amostragem era computado como insatisfatório.

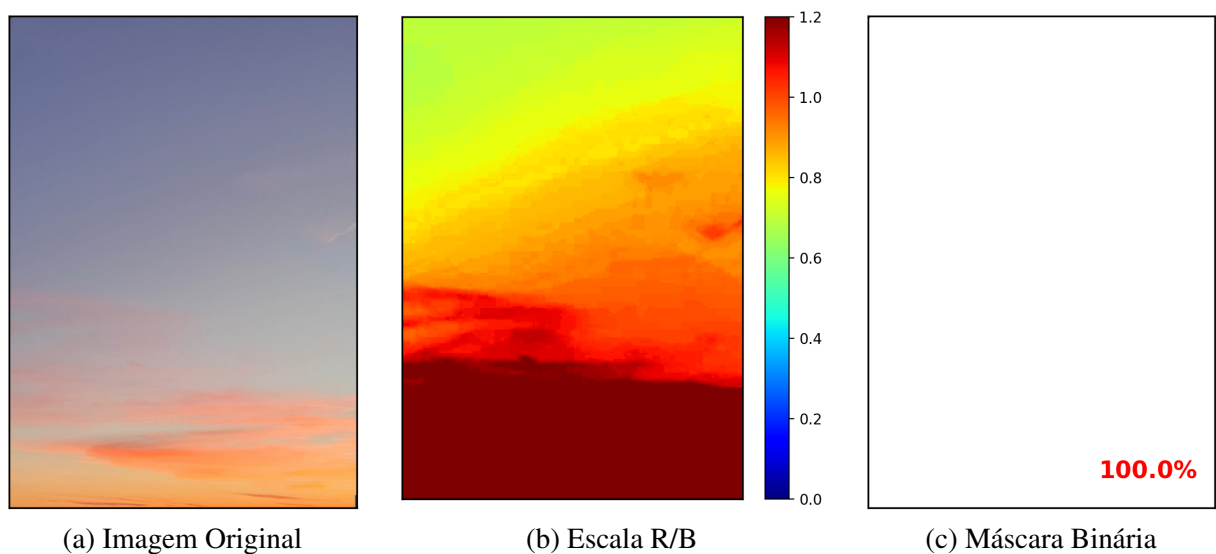
Durante esse processo de auditoria visual, observou-se que nuvens de baixíssima espessura óptica e formações translúcidas tênues operaram no limiar de detecção da escala. Embora o olho humano pudesse identificar sutilmente essas névoas na imagem original, o algoritmo tendeu a desconsiderá-las na máscara binária final devido ao gradiente cromático reduzido. Contudo, essa limitação foi classificada como tolerável, uma vez que tais formações delgadas não

provocaram alterações mensuráveis no balanço energético do sistema fotovoltaico monitorado.

Para fins de padronização visual nos cenários destacados graficamente a seguir, os resultados são apresentados em painéis triplos sequenciais, onde a imagem "a" representa a captura original em campo, a imagem "b" exibe o mapeamento térmico gerado pela escala cromática vermelho e azul, e a imagem "c" ilustra a máscara binária resultante do limiar de corte, ferramenta responsável por isolar as massas gasosas e calcular a porcentagem final da quantidade de nuvens.

A primeira classe avaliada compreendeu o cenário de pôr do sol, a qual apresentou uma taxa de acerto de 0%. Esse resultado adverso decorre da assinatura espectral típica desse período do dia, no qual a atmosfera é enriquecida com tons avermelhados e alaranjados devido à dispersão física da luz. Essa alteração cromática eleva artificialmente os valores do canal vermelho mesmo em pixels de céu completamente limpo. Como consequência, o modelo matemático é induzido ao erro, interpretando o crepúsculo como se fosse uma massa de nuvens densas e saturando completamente a máscara binária resultante, conforme exemplificado no painel de falha crítica da Figura 26, onde a coloração do pôr do sol induziu o sistema a classificar erroneamente o cenário como 100% de cobertura de nuvens, representada pela cor branca.

Figura 26 – Painel de processamento incorreto para o cenário de pôr do sol, evidenciando a saturação errônea da máscara devido aos tons avermelhados do crepúsculo.



Fonte: Autoria própria (2026).

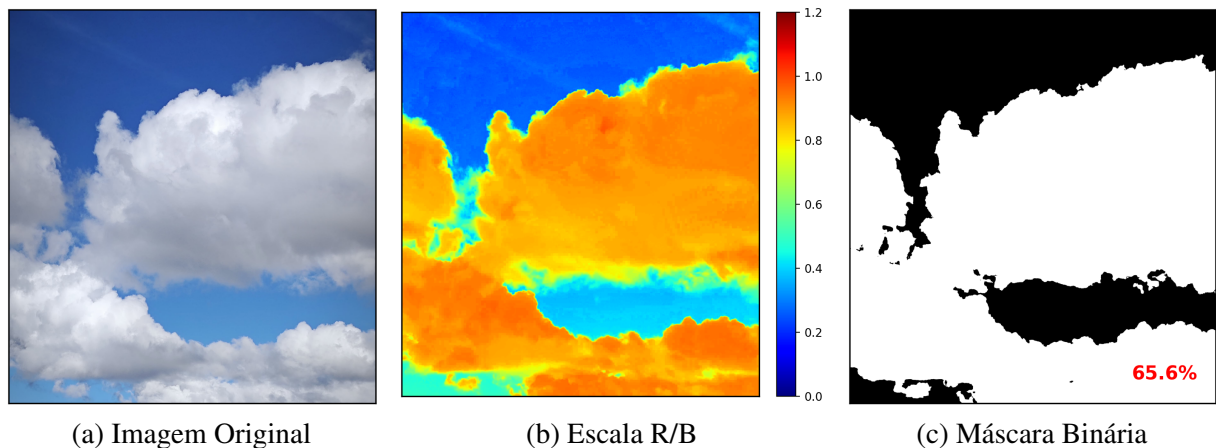
Em contrapartida, a segunda categoria analisada, composta por imagens de céu limpo, sem sol direto e sem nuvens na linha de visada, obteve uma taxa de eficiência de 100% de acertos através da escala. Nessas condições estáveis, o contraste entre o azul de fundo do céu e a ausência de estruturas esbranquiçadas permitiu uma segregação linear de excelente qualidade pelo limiar estabelecido, validando o modelo matemático para dias ideais de alta irradiância.

A terceira categoria englobou os cenários de céu encoberto por nuvens sem a presença do disco solar visível no campo de captura, alcançando um índice de assertividade de 70%. Este

requisito populacional apresentou elevada complexidade intrínseca, visto que englobou múltiplos perfis de nebulosidade, variando desde céus totalmente homogêneos e densos, que configuram nuvens grossas com alto espalhamento óptico, até coberturas parciais translúcidas.

Durante a análise detalhada, observou-se que a principal razão para algumas fotos apresentarem resultados errôneos nesta classe foi a forte influência do brilho solar adjacente, mesmo quando o disco solar central não se posicionava de forma explícita dentro do enquadramento. O comportamento bem-sucedido desta classe visual, quando livre dessa interferência solar limítrofe, é apresentado no painel da Figura 27. Nesse cenário, o algoritmo segmentou com precisão as bordas e a densidade das formações nebulosas, mapeando uma cobertura efetiva de 65,6% de nuvens, área branca, em estrita consonância com a distribuição visual observada na imagem original.

Figura 27 – Painel de processamento bem-sucedido para o cenário de céu com nuvens e sem sol direto, exibindo a correta segmentação da maior parte da massa nebulosa.

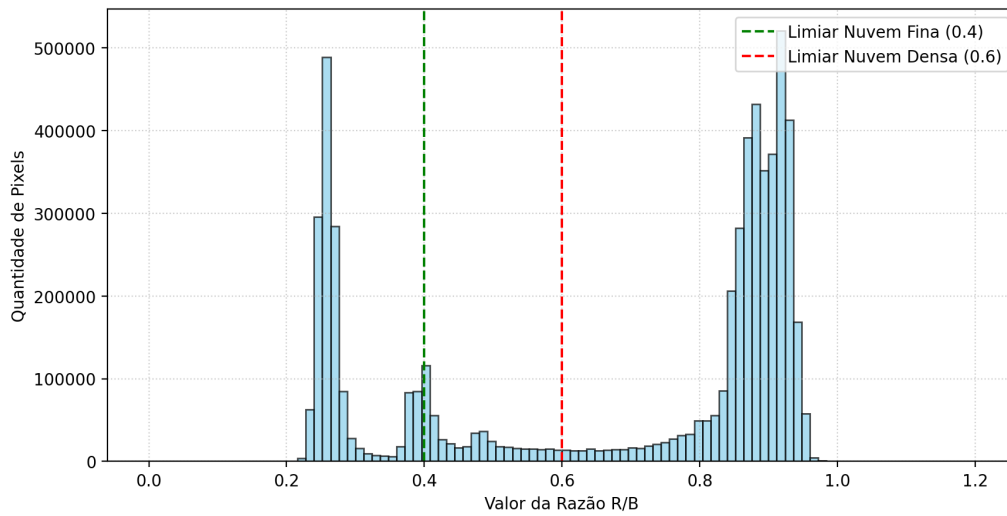


Fonte: Autoria própria (2026).

Para evidenciar a capacidade do algoritmo em discriminar quantitativamente os diferentes regimes de cobertura de céu, a Figura 28 apresenta o histograma de distribuição estatística dos pixels para esse cenário de sucesso. A análise gráfica demonstra de forma clara a separação da população de pixels em três zonas operacionais bem definidas pelos limiares estabelecidos. Os pixels situados abaixo do limiar de 0,4 representam as regiões de céu limpo, enquanto o intervalo entre 0,4 e 0,6 quantifica as nuvens finas e translúcidas de menor espessura óptica. Por fim, o acúmulo de pixels à direita da linha tracejada vermelha, superior a 0,6, mapeia matematicamente o núcleo das nuvens densas e opacas. Essa distribuição evidencia a eficiência da escala na estratificação precisa do perfil de nebulosidade, fornecendo dados numéricos robustos para a correlação com as quedas transientes de irradiância solar.

Por fim, a quarta categoria avaliou o cenário composto por céu com nuvens associado à presença do sol direto brilhando no campo de visão, cujo índice de acerto decaiu para 25%. Durante a análise detalhada desta classe, observou-se que as falhas severas de segmentação ocorreram predominantemente em imagens sob forte influência da iluminação solar adjacente.

Figura 28 – Distribuição estatística dos pixels por faixas de nebulosidade para o cenário de céu encoberto por nuvens e sem sol direto.



Esse forte clarão nas bordas das nuvens constitui uma manifestação visual direta do efeito de borda e do severo incremento de radiação difusa provocado pelas formações nebulosas. Como as nuvens atuam quebrando o vetor de radiação direta e espalhando a luz em múltiplos ângulos, a densidade de radiação difusa atinge níveis máximos nas zonas adjacentes ao Sol. Esse espalhamento frontal intenso gera uma zona de saturação esbranquiçada de alto brilho que mimetiza as propriedades ópticas de uma nuvem espessa para a razão computacional, induzindo o algoritmo a classificar incorretamente o fundo azul do céu limpo como área nublada.

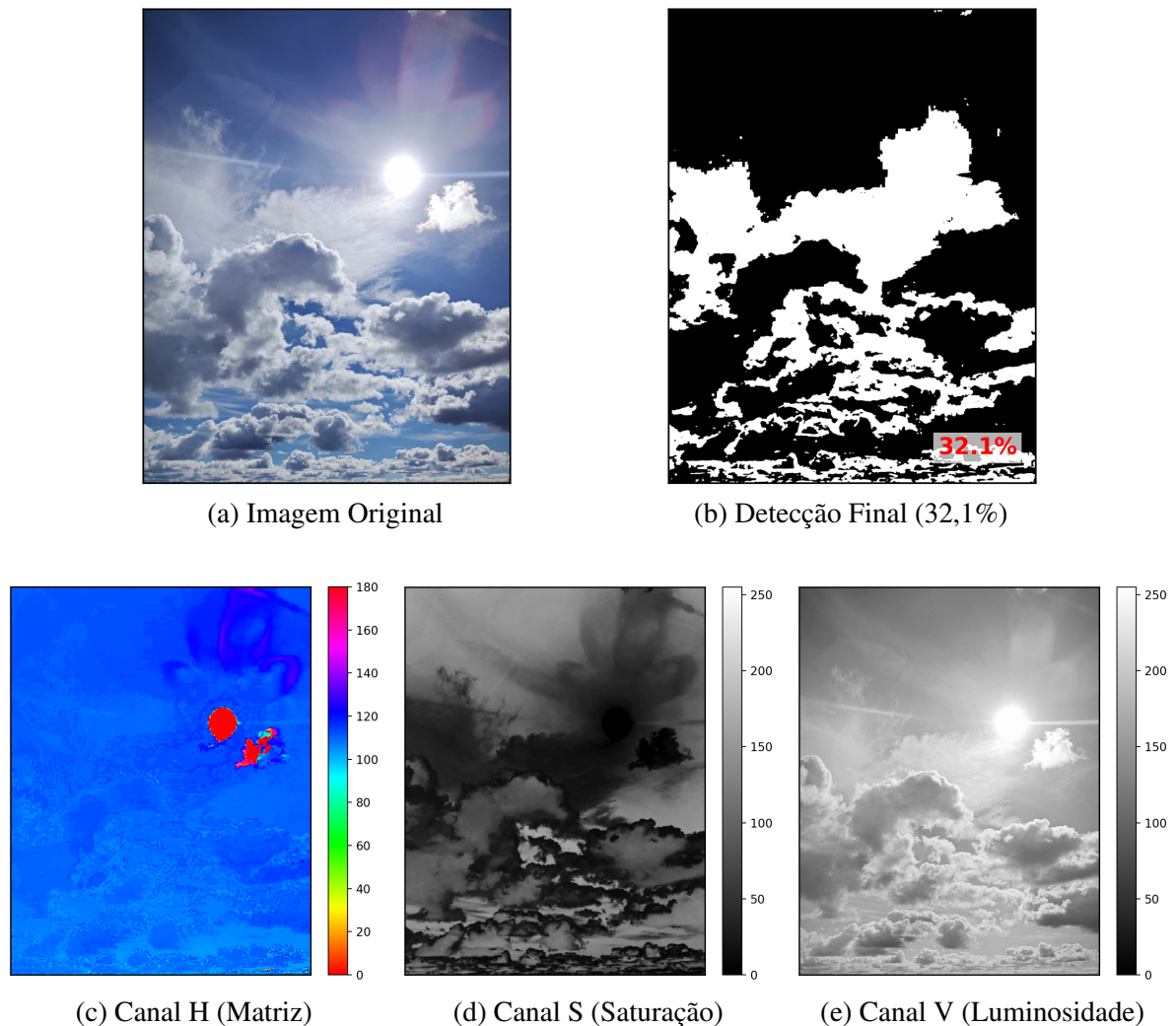
4.4.1 Análise Exploratória e Segmentação no Domínio HSV

Com o objetivo de investigar uma abordagem alternativa para a segmentação de nebulosidade, um método computacional baseado no espaço de cores HSV foi desenvolvido e aplicado nesse trabalho sobre a mesma base de dados composta por 134 fotografias. Essa análise exploratória buscou mapear o comportamento e as respostas desse algoritmo frente a variações geométricas e de luminosidade diária, permitindo avaliar como o modelo discrimina os constituintes da cena. A calibração dos limiares operativos nesse domínio foi realizada de maneira empírica através de ajustes iterativos, buscando estabelecer um ponto de equilíbrio técnico entre a sensibilidade de detecção e a rejeição de falsos positivos causados por fenômenos de brilho transiente.

Os resultados globais obtidos por meio do espaço HSV apresentaram tendências de distribuição parcialmente similares ao modelo anterior, contudo, exibindo um comportamento analítico singular e especializado. A dinâmica de decomposição desse modelo e a resposta da máscara binária correspondente são apresentadas no painel da Figura 29.

A análise detalhada do painel de resultados revela que o método baseado no espaço HSV manifesta uma limitação operacional ao desconsiderar o núcleo central e opaco das massas

Figura 29 – Painel de processamento adaptativo utilizando o espaço de cores HSV, evidenciando a decomposição da imagem nos canais de matriz, saturação e valor para a segmentação de nuvens densas.



Fonte: Autoria própria (2026).

gasosas mais densas, tendendo a classificar incorretamente o miolo dessas formações como áreas de céu limpo. Além disso, o algoritmo exibe baixa sensibilidade para rastrear nuvens muito fracas ou estratificadas de forma homogênea quando estas não se encontram sob forte iluminação.

Em contrapartida, o modelo atua de forma satisfatória na identificação do efeito de borda das nuvens, mapeando com propriedade as transições geométricas e as zonas translúcidas impactadas pelo espalhamento luminoso. Contudo, observa-se na Figura 29b uma ambiguidade analítica inerente ao processo, a presença do disco solar e de sua região periférica imediata também é incorporada à máscara binária devido ao elevado gradiente de luminosidade do canal V e à perda de saturação do canal S nessa zona. Como consequência, gera-se uma incerteza a respeito do limite exato onde cessa o corpo do Sol e onde se inicia o verdadeiro efeito de borda provocado pela nuvem adjacente.

Para contornar essa restrição técnica, projeta-se como solução metodológica a união desse

sistema de processamento digital com o algoritmo de determinação astronômica desenvolvido nas etapas iniciais deste trabalho, o qual calcula as coordenadas exatas do Sol com base na localização geográfica da câmera, no ângulo de inclinação do dispositivo, na data e no horário de aquisição da fotografia. Ao fundir os códigos, torna-se computacionalmente viável aplicar uma máscara de exclusão geométrica sobre a região delimitada como disco solar, isolando-o e deixando na imagem apenas a assinatura pura das zonas de nebulosidade.

No cenário atual do projeto, a validação experimental dessa união de códigos encontrou restrições temporais e físicas. Devido ao período do ano em que as análises finais foram concentradas, correspondente ao inverno local, a trajetória e a inclinação solar sazonal impediram o posicionamento do astro dentro do campo de visão útil da câmera instalada na localização fixa atual. Complementarmente, a aplicação retroativa sobre as imagens históricas que continham o Sol revelou-se inviável, visto que tais capturas foram obtidas sob diferentes condições de inclinação manual, horários dispersos e coordenadas geográficas distintas, carecendo do sincronismo de metadados rígidos exigido pelo modelo astronômico. Apesar dessa impossibilidade de teste imediato, o acoplamento teórico de ambos os algoritmos consolida-se como uma estratégia robusta para viabilizar um monitoramento especializado.

Vale ressaltar que a análise detalhada nos tópicos anteriores utilizou estritamente o escopo amostral das 134 fotografias obtidas por meio do dispositivo móvel celular. Contudo, o algoritmo desenvolvido também foi testado de forma independente utilizando as imagens capturadas pela unidade de câmera do Raspberry Pi. Nessa configuração de hardware, em certas épocas do ano, o sensor óptico não recebe a incidência da luz solar direta e nem o pôr do sol de maneira centralizada em seu campo de visão, registrando apenas, e de forma sutil, as variações cromáticas de fim de tarde no céu superior. Assim, os resultados práticos obtidos com a câmera do Raspberry Pi revelaram-se muito similares e compatíveis com os padrões identificados nas fotos do celular. Essa convergência demonstra que o sistema computacional possui o mesmo desempenho satisfatório em ambos os dispositivos e pode ser empregado com sucesso em futuras expansões do projeto, as quais poderiam incorporar uma lente do tipo olho de peixe para englobar uma visão hemisférica total da abóbada celeste ao longo de todo o ano.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como premissa o estudo, a coleta e a análise de dados de irradiância solar no município de Joinville (SC), dando continuidade à operação de uma infraestrutura de monitoramento preexistente. Para viabilizar essa investigação e observar a dinâmica atmosférica, a pesquisa valeu-se de um sistema já consolidado, centralizado em um microcomputador Raspberry Pi 4. Esse equipamento gerenciou a operação simultânea de dois piranômetros distintos baseados em termopilha (SP510) e fotodiodo de silício (SP215), além de um sensor digital de temperatura (DS18B20).

No que tange à robustez física e à confiabilidade eletrônica do protótipo, adequações estruturais foram implementadas para mitigar falhas observadas durante as campanhas em campo. A substituição do suporte de polímero PLA por uma estrutura em aço inoxidável buscou estabilizar o posicionamento dos sensores frente ao estresse térmico, enquanto a confecção de uma nova PCI reduziu instabilidades na aquisição dos sinais.

Outro avanço prático fundamental deste trabalho foi a elaboração e documentação de uma metodologia de calibração para a nova placa de circuito impresso (PCI) de aquisição de sinais. Diante da ausência de diretrizes prévias, foi essencial estruturar um procedimento de testes seguro para adequar os sinais dos sensores aos limites suportados pelo conversor analógico-digital.

No âmbito do software e do controle lógico, o sistema foi amplamente reestruturado para assegurar estabilidade e otimizar o fluxo de dados. A implementação de uma rede virtual privada (VPN) para acesso remoto direto, aliada à automação da inicialização do sistema operacional e ao armazenamento seguro dos códigos em repositório remoto, garantiu a resiliência do protótipo contra quedas de energia e falhas de hardware. Paralelamente, a adoção de uma janela de aquisição dinâmica e a conversão preditiva dos registros fotográficos para o formato WebP reduziu expressivamente a ociosidade do sistema durante a noite e o consumo de espaço de memória em nuvem, consolidando a autonomia contínua da operação.

A avaliação metrológica atestou a consistência dos dados coletados, revelando uma correlação linear forte ($r > 0,83$) das leituras dos sensores SP510 e SP215 em comparação com a estação meteorológica de referência da EPAGRI. Internamente, o confronto entre os dois piranômetros do sistema registrou alta repetibilidade ($r = 0,9948$), evidenciando de forma prática o laço de histerese diurna decorrente das diferenças em suas respectivas respostas espectrais.

Cabe ressaltar que as sutis divergências observadas frente à estação oficial podem ser atribuídas à diferença na resolução temporal dos sistemas. Enquanto os dados de referência são disponibilizados de forma consolidada a cada hora, o protótipo adota uma taxa de amostragem de um segundo. Essa alta frequência de aquisição comprova-se fundamental, uma vez que o trânsito de nuvens é um fenômeno altamente dinâmico e rápido; taxas maiores de amostragem tendem a suprimir dados críticos e mascarar as flutuações transientes e os picos de irradiância que impactam diretamente a geração fotovoltaica.

Para viabilizar a correlação dos dados solarimétricos com as dinâmicas atmosféricas,

realizou-se a integração de um módulo de captura óptica. A instalação de uma câmera embarcada, com acionamento sincronizado aos horários de iluminação solar local, permitiu o registro visual automatizado e contínuo do estado do céu.

A partir das fotografias obtidas, procedeu-se com a estimativa da fração de cobertura de nuvens mediante técnicas de processamento digital de imagens. Verificou-se que o método da Razão Vermelho/Azul (R/B) mostrou-se adequado para identificar céu limpo e ou com nebulosidade sem sol direto, embora sensível aos tons avermelhados do crepúsculo e sobre forte luminosidade de sol. Em paralelo, a segmentação no espaço de cores HSV apresentou maior robustez justamente para mapear essas transições geométricas e o efeito de borda, todavia, com a dificuldade em identificar o núcleo central e opaco das nuvens mais espessas.

Por fim, a avaliação em campo demonstrou a eficiência do hardware sob forte instabilidade climática. O sistema detectou com exatidão as flutuações severas causadas pela rápida dinâmica das nuvens, incluindo o registro do efeito de borda de nuvem, que gerou picos transitentes superiores a 1.200 W/m^2 . A captura consistente desses eventos instantâneos atesta a alta sensibilidade e o reduzido tempo de resposta do protótipo, comprovando sua capacidade de mapear variações abruptas que afetam diretamente a geração fotovoltaica.

Em suma, otimização deste protótipo não apenas resulta uma base de dados de alta resolução para a região de Joinville, mas também demonstra como o sensoriamento óptico do céu é uma ferramenta aliada para compreender o comportamento das nuvens e o seu impacto direto na radiação solar. À medida que a matriz energética se torna cada vez mais dependente de fontes renováveis variáveis, a imprevisibilidade meteorológica desponta como um desafio crítico. Sistemas como o desenvolvido neste estudo fornecem os subsídios necessários para a evolução de modelos de previsão de curtíssimo prazo, oferecendo a operadores da rede elétrica e a grandes produtores as ferramentas visuais e matemáticas para antecipar variações abruptas de potência, equilibrar as cargas da rede com segurança e maximizar o aproveitamento da geração fotovoltaica.

A partir da avaliação do protótipo e das análises realizadas, propõem-se os seguintes aprimoramentos técnicos e operacionais como trabalhos futuros:

- Substituir a lente atual da câmera por um modelo hemisférico para capturar a abóbada celeste completa;
- Unir o modelo astronômico à segmentação de imagens para realizar o mascaramento automático do disco solar;
- Aprimorar a identificação e a classificação da densidade das nuvens nas imagens combinando os métodos visuais atuais com algoritmos de aprendizado de máquina;
- Implementar uma taxa de amostragem dinâmica que ajuste a frequência de coleta de dados de acordo com a instabilidade climática do momento;

- Estender o período de coleta, analisando o comportamento da irradiância solar durante um ano;
- Rastrear o ponto de máxima potência do sistema por meio de simulações e testes, utilizando a base de dados;
- Disponibilizar a base de dados para o público geral, promovendo o acesso de dados reais para mais estudos.

REFERÊNCIAS

- ABREU, Samuel Luna de. **Estudo de métodos diretos e indiretos de estimativa de irradiação solar global diária horizontal a partir de observações superficiais do clima**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, 2000. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/79188>. Citado na página 31.
- AGGARWAL, Charu C. An introduction to outlier analysis. In: _____. **Outlier Analysis**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 1–34. ISBN 978-3-319-47578-3. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-47578-3_1. Citado na página 33.
- ALGARNI, Salem et al. Contribution of renewable energy sources to the environmental impacts and economic benefits for sustainable development. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 56, p. 103098, 2023. ISSN 2213-1388. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138823000917>. Citado na página 14.
- ALLEY, Olivia J. et al. Best practices in pec water splitting: How to reliably measure solar-to-hydrogen efficiency of photoelectrodes. **Frontiers in Energy Research**, v. 10, p. 884364, 2022. Disponível em: <https://docs.nrel.gov/docs/fy23osti/82320.pdf>. Citado na página 16.
- ANALOG DEVICES. **AD620: Low Cost, Low Power Instrumentation Amplifier Data Sheet**. [S.l.], 2020. Acedido em: 20 de junho de 2026. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad620.pdf>. Citado na página 47.
- APOGEE INSTRUMENTS. **SP-215: Silicon-cell Pyranometer 0 to 5 V Output Owner's Manual**. [S.l.], 2022. Acedido em: 20 de junho de 2026. Disponível em: <https://www.apogeeinstruments.com/content/SP-212-215-manual.pdf>. Citado na página 48.
- APOGEE INSTRUMENTS. **SP-510 and SP-610: Upward and Downward-facing Thermopile Pyranometers Owner's Manual**. [S.l.], 2026. Acedido em: 20 de junho de 2026. Disponível em: <https://www.apogeeinstruments.com/content/SP-510-610-manual.pdf>. Citado na página 47.
- Atitude Reflexiva. **Dispersão da luz e o azul do céu**. 2016. Disponível em: <https://atitudereflexiva.wordpress.com/2016/12/09/>. Citado na página 52.
- BALFOUR, John; SHAW, Michael; NASH, Nicole Bremer. **Introdução ao Projeto de Sistemas Fotovoltaicos**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. ISBN 978-85-216-3123-1. Citado 3 vezes nas páginas 16, 17 e 25.
- BAMISILE, Olusola et al. The environmental factors affecting solar photovoltaic output. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 208, p. 115073, 2025. ISSN 1364-0321. Citado na página 23.
- BCN3D Technologies. **Technical Data Sheet: PLA**. [S.l.], 2026. Acessado em: 19 de maio de 2026. Disponível em: <https://www.bcn3dtechnologies.com/en/3d-printer/filaments/#pla>. Citado na página 40.
- BEDAQUE, Paulo; BRETONES, Paulo Sérgio. O sol está sempre a pino ao meio-dia? **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, n. especial (Produtos e Materiais Didáticos), 2019.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/Kj38SXGXYjSg5YmzxBvbHtQ/?lang=pt>. Citado na página 22.

BETINI, Roberto Cesar; CASTAGNA, Annemarlen Gehrke; TIEPOLO, Gerson M. O emprego verde e o desenvolvimento sustentável. **Anais do Congresso “Energia para o Século XXI: Sociedade e Desenvolvimento”**, p. 1–11, 2012. Disponível em: <https://utfpr-ct-static-content.s3.amazonaws.com/labens.ct.utfpr.edu.br/wp-content/uploads/2016/06/Betini-et-al-CBPE-2012.pdf>. Citado na página 15.

CALÇA, Marcus Vinícius Contes. **Deteção de outliers e preenchimento de lacunas em medidas das irradiâncias solares espectrais usando princípios físicos e técnicas de inteligência artificial**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas – FCA, Botucatu, SP, Brasil, dez. 2022. Tese de Doutorado. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/9e7ba274-141d-48a0-b251-5694a0c89a86>. Citado na página 33.

CAMPOS, Mayara Soares. Programa para o cálculo da variação da direção de incidência dos raios solares ao longo do ano. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA (ABENGE). **Anais do XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia – COBENGE 2013**. Gramado, RS, Brasil, 2013. Disponível em: https://turing.pro.br/anais/COBENGE-2013/pdf/117056_1.pdf. Acesso em: [data de acesso]. Citado na página 24.

CEPEL; CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. 2014. Disponível em: https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 15 set. 2025. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 25.

CHOW, C. W. et al. Intra-hour solar forecasting using a total sky imager. **Solar Energy**, Elsevier, v. 85, n. 11, p. 2881–2893, 2011. Citado na página 49.

COSSOLI, Pedro Ariel et al. Micro-inversores: principais topologías. **Revista EITT**, Universidad Nacional del Nordeste, v. 2, p. 14–21, 2015. Acesso aberto sob a licença CC BY-NC-ND 2.5 Argentina. Disponível em: <https://revistas.unne.edu.ar/index.php/eitt/article/view/276>. Citado na página 28.

DUBEY, Swapnil; SARVAIYA, Jatin Narotam; SESHADRI, Bharath. Temperature dependent photovoltaic (pv) efficiency and its effect on pv production in the world – a review. **Energy Procedia**, v. 33, p. 311–321, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213000829>. Acesso em: [data de acesso]. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 64.

Ember. **Global Electricity Review 2025**. [S.l.], 2025. Accessed: 2025-10-03. Disponível em: <https://ember-energy.org/app/uploads/2025/04/Report-Global-Electricity-Review-2025.pdf>. Citado na página 15.

EPAGRI/CIRAM. **Dados Meteorológicos da Estação de Joinville (Código 1051)**. Florianópolis: [s.n.], 2026. Plataforma telemática de dados ambientais. Acesso para validação de dados experimentais. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 63.

EPE. **Resumo do Relatório do Balanço Energético Nacional 2025 (ano base 2024)**. 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/en/press-room/news/>

epe-publishes-the-summary-report-brazilian-energy-balance-2025. Acesso em: 30 set. 2025. Citado 3 vezes nas páginas 13, 14 e 15.

FERREIRA, Willian José; RICHETTO, Kátia Celina da Silva; ALVALÁ, Plínio Carlos. Cloud brightness evaluation from ground-based total sky images using the hsv color space parameter. INPE / UNITAU, São José dos Campos, SP / Taubaté, SP, 2023. Correspondence email: willian.jferreira@unitau.br. Citado 3 vezes nas páginas 53, 55 e 56.

FIGUEIRA, Henrique Horst. **Requisitos dinâmicos de controle para o estágio de conversão C.C.–C.C. aplicado em sistemas fotovoltaicos**. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, 11 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/22694>. Citado na página 30.

Fraunhofer ISE. **Photovoltaics Report**. Freiburg, Alemanha, 2026. Acessado em: 22 jun. 2026. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>. Citado na página 17.

FRÖHLICH, Claus. Solar irradiance variability since 1978: Revision of the pmod composite during solar cycle 21. **Space Science Reviews**, Springer, v. 125, n. 1, p. 53–65, 2006. Citado na página 21.

GAZOLI, Jonas Rafael et al. Microinversor monofásico para sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica. **Universidade Estadual de Campinas, Campinas**, 2011. Citado na página 27.

Global Carbon Project. **Fossil Fuel CO₂ Emissions Increase Again in 2024**. 2024. <https://globalcarbonbudget.org/fossil-fuel-co2-emissions-increase-again-in-2024/>. Acessado em: 02 out. 2025. Citado na página 14.

GOETZBERGER, Adolf; HEBLING, Christopher; SCHOCK, Hans-Werner. Photovoltaic materials, history, status and outlook. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 40, n. 1, p. 1–46, 2003. ISSN 0927-796X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X0200092X>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

GOLDSTEIN, E. Bruce. **Sensation and Perception**. 9. ed. Belmont, CA: Cengage Learning, 2013. Citado na página 56.

GOMES, Wesley Freire. **A crise na expansão do mercado de energia eólica**. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal do Ceará (UFC), Centro de Tecnologia, Fortaleza, CE, 2025. Citado na página 34.

GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E. **Processamento Digital de Imagens**. 3. ed. São Paulo: Pearson Universidades / Addison Wesley Brasil, 2009. ISBN 9788576054016. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 58.

Google LLC. **An image format for the Web | WebP**. 2021. Google for Developers. Acessado em: 21 jun. 2026. Disponível em: <https://developers.google.com/speed/webp>. Citado na página 58.

GÓMEZ, J. M. R. Rodríguez et al. A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 3, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0342>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

IEA. **Renewables 2024: Analysis and forecast to 2030**. 2024. <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>. Acesso em: 9 set. 2025. Citado na página 15.

IEA. **Global Energy Review 2025**. [S.l.]: International Energy Agency Paris, France, 2025. Citado na página 13.

International Organization for Standardization. **ISO 9060: Solar energy — Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation**. Geneva, 2019. Citado na página 60.

IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report – Summary for Policymakers**. 2023. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/summary-for-policymakers/>. Acessado em: 02 out. 2025. Citado na página 14.

ISO. **ISO 9060:2018 — Solar energy — Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation**. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. Citado na página 29.

JENČO, Marián. Determination of the solar angle of incidence using an equivalent surface and the possibility of applying this approach in geosciences and engineering. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 14, n. 9, 2025. ISSN 2220-9964. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2220-9964/14/9/323>. Citado na página 22.

KLUIJ, Victoria Catalina. **Análise da dinâmica solar de Joinville com uso de base de dados da irradiância solar local**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica)) — Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Centro de Ciências Tecnológicas, Departamento de Engenharia Elétrica, Joinville, 2025. Citado 3 vezes nas páginas 36, 42 e 47.

KNABBEN, Gustavo Carlos. **Microinversor fotovoltaico não isolado de dois estágios**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, SC, Brasil, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/178588>. Acesso em: [data de acesso]. Citado 3 vezes nas páginas 16, 20 e 23.

LANGFORD, Michael; FOX, Anna; SMITH, Richard Sawdon. **Langford's Basic Photography: The Guide for Serious Photographers**. 9. ed. Oxford, UK: Focal Press, 2010. Citado na página 56.

LIMA, Andrei da Cunha. **Missão universal: Medidor de irrediência rápida**. 2024. Apresentação interna utilizada como material de apoio ao estudo. Citado na página 86.

MAGARREIRO, Clarisse; FREITAS, Sara; BRITO, Miguel Centeno. Radiação e energia solar. **Gazeta da Física**, v. 39, n. 1/2, p. 57–59, 2016. Disponível em: <https://www.spf.pt/magazines/GFIS/119/article/993/pdf>. Acesso em: 07 out. 2025. Citado na página 20.

MAHDI, Hussain Al et al. A review of photovoltaic module failure and degradation mechanisms: Causes and detection techniques. **Solar**, v. 4, n. 1, p. 43–82, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-9941/4/1/3>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

MARARAKANYE, Ndamulelo; BEKKER, Bernard. Renewable energy integration impacts within the context of generator type, penetration level and grid characteristics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 108, p. 441–451, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119301856>. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.

MCKINNEY, Wes. **Data Structures for Statistical Computing in Python**. [S.l.]: SciPy, 2010. 51–56 p. Citado na página 60.

MELLIT, A.; KALOGIROU, S. A.; PAVAN, A. M. Machine learning and deep learning techniques for photovoltaic systems: A review. **Applied Energy**, Elsevier, v. 221, p. 224–244, 2018. Citado na página 49.

MEYDBRAY, Jenya; EMERY, Keith A.; KURTZ, Sarah. Pyranometers and reference cells: What's the difference? **PV Magazine**, n. March, p. 108–110, 2012. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/54498.pdf>. Citado na página 30.

Ministério de Minas e Energia (MME). **Desafios da expansão da geração eólica e solar**. 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/>. Acesso em: 23 jun. 2026. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.

MME. **Brasil, líder mundial na transição energética**. 2023. <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/BrasilLiderMundialnaTransicaoEnergeticaMinisteriodeMinaseEnergia.pdf>. Acesso em: 03 out. 2025. Citado na página 15.

MUKAKA, M. M. Statistics corner: A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. **Malawi Medical Journal**, v. 24, n. 3, p. 69–71, 2012. Citado na página 34.

NEVES, Guilherme Marques. **Influência do espectro da radiação solar em módulos fotovoltaicos**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 2016. Citado na página 21.

ONS. **Termo de Referência - TDR do Subprojeto 24: Previsão de Geração de Fonte Solar: Estudo de variáveis influentes e desenvolvimento de modelo de previsão**. Brasília, DF, 2022. Citado na página 35.

ONS. **Relatório aponta necessidade de aumento dos cortes de geração eólica e solar para manter segurança do sistema**. Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2024. Disponível em: <https://www.ons.org.br/>. Acesso em: 23 jun. 2026. Citado na página 35.

ONS; MME; GIZ. **Avaliação e diagnóstico do sistema de previsão da irradiância solar e geração solar fotovoltaica de sistemas de mini e microgeração (MMGD) - Sumário Executivo**. Brasília, DF, 2024. Citado na página 35.

OPTICS, G2V. **Calibrated Spectral Irradiance**. 2025. Acesso em: 31 out. 2025. Disponível em: <https://g2voptics.com/calibrated-spectral-irradiance.com>. Citado na página 21.

PAULA, João Frederico Souza De et al. Confecção e análise de um piranômetro fotovoltaico de baixo custo. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS)**. Natal, RN: ABENS – Associação Brasileira de Energia Solar, 2020. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/763>. Citado na página 17.

PEARSON, Karl. Note on regression and inheritance in the case of two parents. **Proceedings of the Royal Society of London**, Royal Society, v. 58, p. 240–242, 1895. Citado na página 33.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80 p. Acesso em: 15 out. 2025. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 30.

PIACENTINI, Rubén D. et al. Extreme solar total irradiance due to cloud enhancement effect observed at rosario, argentina. **Atmospheric Research**, Elsevier, v. 102, n. 1-2, p. 143–147, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 35.

Portal Solar. **Energia solar lidera investimentos em transição energética no Brasil**. 2023. Acesso em: [inserir data de acesso]. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/energia-solar-lidera-investimentos-emtransicao-energetica-no-brasi>. Citado na página 27.

RABAEY, Jan M.; CHANDRAKASAN, Anantha; NIKOLIĆ, Borivoje. **Digital Integrated Circuits: A Design Perspective**. 2. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2003. Citado na página 42.

RAMPINELLI, Giuliano Arns. **Estudo de características elétricas e térmicas de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. 254 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2010. Acesso em: 17 de nov. de 2023. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/27935/000764646.pdf?sequence=1>. Citado na página 27.

Raspberry Pi Forum. **SD card overcurrent / failure discussion**. 2026. Acedido em: 20 de junho de 2026. Disponível em: <https://forums.raspberrypi.com/viewtopic.php?t=253104>. Citado na página 41.

RASPBERRY PI FOUNDATION. **Raspberry Pi Camera Modules Documentation**. [S.l.], 2026. Acedido em: 20 de junho de 2026. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/documentation/accessories/camera.html>. Citado na página 49.

Raspberry Pi Ltd. **Raspberry Pi Documentation - Computers**. 2026. Acedido em: 20 de junho de 2026. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>. Citado na página 41.

RealVNC. **VNC Viewer Comparison**. 2026. Acedido em: 19 de junho de 2026. Disponível em: <https://www.realvnc.com/en/vnc-viewer-comparison/>. Citado na página 43.

RIBEIRO, David A. et al. Detecção e análise aliasing em transdutores acelerômetros em processo de aquisição de sinais de vibração mecânica. —, —, n. —, p. 14 p., 2021. Citado na página 33.

RINKESH. **Causes, Effects and Solutions of Depletion of Natural Resources**. 2020. <https://www.conserve-energy-future.com/causes-effects-solutions-depletion-natural-resources.php>. Acessado em: 02 out. 2025. Citado na página 13.

ROHDE, Robert A.; COSTA, Jucá. **Espectro da Radiação Solar na Terra**. 2007. Disponível no Wikimedia Commons. Acesso em: 23 jun. 2026. Disponível em: <https://wikimedia.org>. Citado na página 21.

SANTOS, Anderson C.; SILVA, Jean F. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), **Influência da cor da tinta na temperatura interna de edifícios de alvenaria de tijolos: um estudo de caso**. 2024. Acessado em: 19 de junho de 2026. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/32643/1/influenciatintatemperaturaedificio.pdf>. Citado na página 39.

SCHENKEL, Gabriela. **Monitoramento e análise de um sistema fotovoltaico conectado à rede com uso de microinversor**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2015. Citado na página 24.

SEPUD. **Joinville Cidade em Dados 2021 – Ambiente Natural**. 2021. Acessado em: 11 nov. 2025. Disponível em: <https://www.joinville.sc.gov.br/wp-content/uploads/2021/12/Joinville-Cidade-em-Dados-2021-%E2%80%93-Ambiente-Natural.pdf>. Citado na página 30.

SILVA, Ronaldo Claret Ribeiro da. **Conhecendo os Aços Inoxidáveis: Propriedades Mecânicas dos Aços Inoxidáveis**. [S.l.], 2023. Módulo de Treinamento 2. Disponível em: <http://www.abinox.org.br>. Citado na página 40.

SMITH, John. **Astral: Calculations for the position of the sun and moon**. 2026. Acedido em: 20 de junho de 2026. Disponível em: <https://sffjunkie.github.io/astral/>. Citado na página 44.

SOARES, Daniel dos Santos F. **Impactos da Dinâmica Atmosférica na Flutuação de Potência em Usinas Fotovoltaicas**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2014. Citado na página 22.

Tailscale Inc. **WireGuard® vs. Tailscale: Which VPN Alternative is Better for You?** 2026. Acessado em: 22 jun. 2026. Disponível em: <https://tailscale.com/compare/wireguard>. Citado na página 43.

TAPAKIS, R.; CHARALAMBIDES, A. G. Equipment and methodologies for cloud detection and classification: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 38, p. 652–683, 2014. Citado na página 24.

TeamViewer. **Is there a bandwidth requirement in TeamViewer?** 2022. <https://community.teamviewer.com/English/discussion/124567/hi-everyone-i-would-like-to-ask-if-there-is-a-bandwidth-requirement-in-teamviewer>. Acesso em: 03 jun. 2026. Citado na página 43.

TEXAS INSTRUMENTS. **ADS1015: Ultra-Small, Low-Power, 12-Bit Analog-to-Digital Converter with Internal Reference Data Sheet**. [S.l.], 2015. Acedido em: 20 de junho de 2026. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1015.pdf>. Citado na página 47.

UNFCCC. **Paris Agreement**. 2015. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. Acessado em: 02 out. 2025. Citado na página 14.

UNFCCC. **Conference of the Parties (COP)**. 2025. Acesso em: 2 out. 2025. Disponível em: <https://unfccc.int/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop>. Citado na página 14.

VIGNOLA, Frank; MICHALSKY, Joseph; STOFFEL, Thomas. **Solar and Infrared Radiation Measurements**. 2nd. ed. Boca Raton: CRC Press, 2020. ISBN 9781138096332. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 66.

VILELA, Waldeir Amaral. **Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar**. Tese (Tese de Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, Brasil, 2010. Citado na página 29.

VILLARREAL, Maria José Charfuelan. **Implicações na transição energética do setor elétrico do Estado de São Paulo e do Brasil de acordo com relações de causalidade entre o consumo de energia elétrica e o PIB no período 2004–2019**. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, 2022. Citado na página 15.

VITTI, Diego Christofolletti; ALVARES, Leandro Miranda. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), **Avaliação da Eficiência de Sistemas Fotovoltaicos**. Brasília, DF: [s.n.], 2006. Acessado em: 22 janeiro. 2026. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/903/1/2006_VittiLeandroAlvares.pdf. Citado na página 16.

WALLACE, Gregory K. The jpeg still picture compression standard. **Communications of the ACM**, Association for Computing Machinery, v. 34, n. 4, p. 30–44, abr. 1991. Citado na página 58.

WANG, Zhou et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. **IEEE transactions on image processing**, IEEE, v. 13, n. 4, p. 600–612, 2004. Citado na página 52.

WEATHERSPARK. **Clima característico em Joinville, Santa Catarina, Brasil durante o ano**. 2021. Acessado em: 11 nov. 2025. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/30040/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Joinville-Santa-Catarina-Brasil-durante-o-ano#Figures-SolarEnergy>. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

World Meteorological Organization. **Guide to Instruments and Methods of Observation: WMO-No. 8**. Geneva: WMO, 2018. Volume I – Measurement of Meteorological Variables. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 63.

YANG, Jun et al. An rgb channel operation for removal of the difference of atmospheric scattering and its application on total sky cloud detection. **Atmospheric Measurement Techniques**, Copernicus GmbH, v. 10, p. 1191–1201, 2017. Citado na página 55.

YASMEEN, R. Energy uncertainty, geopolitical conflict, and militarization: A comparative analysis of renewable and non-renewable energy sources. **Energy**, Elsevier, 2024. Citado na página 14.

ZEQIANG, B. et al. Research on performance test method of silicon pyranometer. In: **Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Electronic Measurement Instruments**. S.l.: IEEE, 2013. Citado na página 30. Citado na página 29.

ZUBIC, Nikola; GEHRIG, Mathias; SCARAMUZZA, Davide. State space models for event cameras. In: **Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition**. [S.l.: s.n.], 2024. p. 5819–5828. Citado na página 56.

ANEXO A – ESQUEMÁTICO GERAL DO SISTEMA

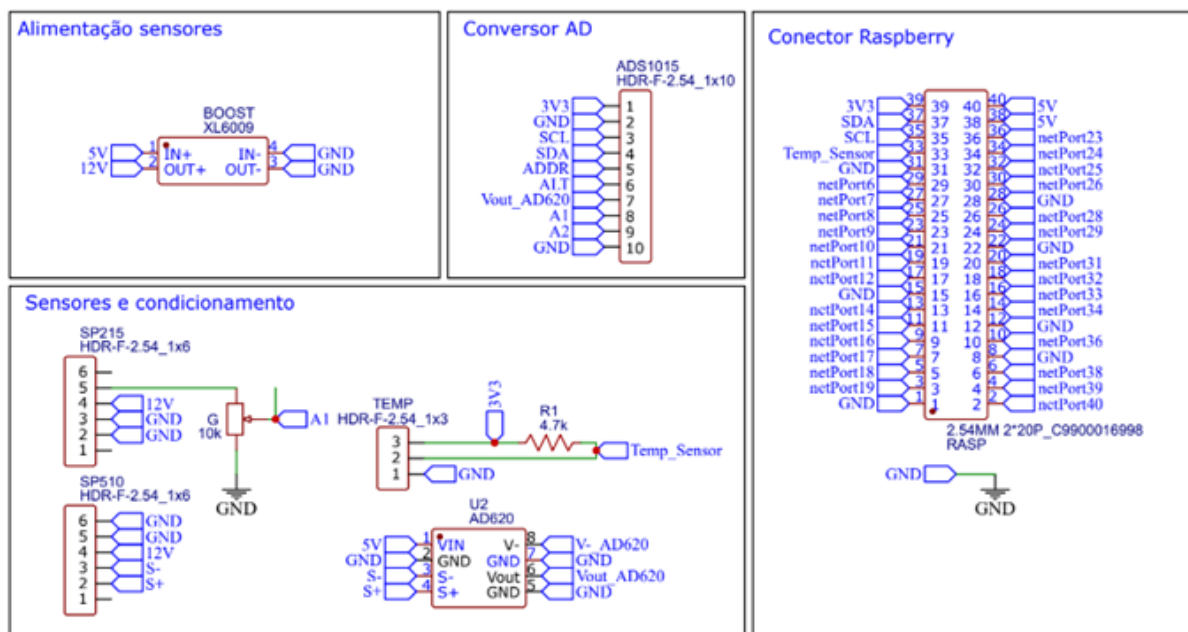


Figura 30 – Esquemático do circuito eletrônico utilizado.

Fonte: Fonte: Adaptado de Lima (2024).