

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

VICTORIA CATALINA KLUJ

**ANÁLISE DA DINÂMICA SOLAR DE JOINVILLE COM USO DE BASE DE DADOS
DA IRRADIÂNCIA SOLAR LOCAL**

JOINVILLE

2025

VICTORIA CATALINA KLUJ

**ANÁLISE DA DINÂMICA SOLAR DE JOINVILLE COM USO DE BASE DE DADOS
DA IRRADIÂNCIA SOLAR LOCAL**

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

2025

Kluj, Victoria Catalina

Análise da dinâmica solar de Joinville com uso de base de dados da irradiância solar local / Victoria Catalina Kluj. - Joinville, 2025.

95 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Alessandro Luiz Batschauer.

.
Monografia - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Departamento de Engenharia Elétrica, Joinville, 2025.

1. Banco de dados. 2. Dinâmica solar. 3. Fotovoltaico. 4. Piranômetro. I. Batschauer, Alessandro Luiz . II. , . III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Análise da dinâmica solar de Joinville com uso de base de dados da irradiância solar local.

VICTORIA CATALINA KLUJ

**ANÁLISE DA DINÂMICA SOLAR DE JOINVILLE COM USO DE BASE DE DADOS
DA IRRADIÂNCIA SOLAR LOCAL**

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, 09 de julho de 2025

Dedico este trabalho aos meus pais, minha base e inspiração diária. Com valores, me ensinaram a persistir e é da força de vocês que vem o meu esforço. Tudo é, e sempre será, por vocês!

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Jorge Adrian e Patricia, que fizeram, e continuam fazendo, o possível e impossível por mim, pela minha formação e para que nunca me falte nada. Vocês são meu maior exemplo, minha força, meu espelho, meus pilares e minha fonte de amor. Obrigada por todas as abdições, por toda a paciência, por me incentivarem, por me apoiarem e por nunca desistirem dos meus sonhos. Vocês são a minha sorte e tornaram toda minha jornada até aqui inesquecível. Minha gratidão é imensurável, só estou onde estou, e sou o que sou, graças a vocês.

Ao meu irmão, Mateus Adrian, que, em momentos de tensão, é minha paz e alegria. Obrigada por entender minhas ausências, por me apoiar mesmo sem compreender todas as minhas escolhas e por ser meu porto seguro. É por você que eu escolho ser melhor todos os dias.

Aos meus avós maternos, Geraldo Hermes e Rosângela, pelas ligações aos domingos, pelas comidas aconchegantes, pelo carinho, pela confiança e pelo apoio, especialmente quando nem eu acreditava em mim. Aos meus avós paternos, Jorge Daniel e Maria Teresa, que, mesmo à distância, estão sempre presentes na minha caminhada. Obrigada por todo o amor, cuidado e dedicação. À todos meus familiares, que sempre foram folego e apoio ao longo dessa trajetória. Sou muito abençoada por ter vocês.

Gratidão especial ao meu avô Geraldo e a minha mãe Patricia, minhas referências de sabedoria, que em meio às suas demandas, pararam para ler e revisar este trabalho mais de uma vez, corrigindo meus erros gramaticais e dando sugestões de melhoria, ainda que sem conhecimento algum da parte técnica.

À minha bisavó, Atelvina, que com seus 90 anos reza por mim todos os dias, nunca soltou minha mão e sempre me olhou nos olhos dizendo o quanto se orgulha da “Vica” dela. Você é meu maior amor e meu tudo. Celebro sua vida todos os dias.

À minha madrinha, Regina, que em muitos dias, foi a única pessoa com uma palavra de conforto e consolo. Você é parte de mim e de tudo o que conquisto. Minha confidente, minha maior apoiadora. Obrigada por sempre me lembrar de quem eu sou e do que sou capaz.

Às minhas amigas de infância, que mesmo distantes, estiveram presentes entendendo meus não em prol deste momento. Às minhas irmãs de coração, que sempre estiveram nas alegrias e nas tristezas desse longo processo. As minhas colegas de apartamento, que em muitos dias foram sinônimo de casa. Aos meus amigos de intercâmbio, que foram peça fundamental para que em meio ao fim dessa jornada cansativa, eu conseguisse ver o mundo com os olhos cheios de alegria. Às minhas parcerias de faculdade: se escrevo esses agradecimentos, sem dúvidas foi por ter o apoio e o ombro de vocês quando necessário. Sou grata por ter tido vocês comigo.

A todos os meus amigos e colegas que fizeram minha caminhada ser única. Lembrarei sempre de cada palavra e aprendizado que foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Ao Julio Albien, a pessoa que me inspirou a cursar Engenharia Elétrica. Obrigada por escutar todos os meus questionamentos, me responder, guiar e incentivar sempre. Você é uma referência de ser humano para mim e foi peça fundamental na minha escolha de profissão.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alessandro Luiz Batschauer, que desde o primeiro dia aceitou embarcar nessa aventura da reta final da graduação, acreditando no meu potencial e na minha entrega. Obrigada por confiar em mim, por todo o apoio, pelos ensinamentos, pelas trocas e por tornar o caminho mais leve. Você é símbolo de admiração para mim, como profissional, pessoa e pai. Meu eterno muito obrigada.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Yales Rômulo de Novaes e Prof. Dr. Felipe Joel Zimann, minha gratidão por aceitarem participar deste momento e pelas contribuições que permitem enriquecer este trabalho.

A Universidade do Estado de Santa Catarina, pelas oportunidades que me proporcionou: de estudar em uma boa graduação, conhecer bons profissionais, fazer amizade com pessoas que levarei para a vida e, principalmente, por permitir que eu realize meu sonho de ser engenheira.

Ao grupo GEPOC, em especial ao Andrei da Cunha Lima, que me estendeu a mão e auxiliou, dia e noite, durante todo o processo de escrita e desenvolvimento do presente projeto.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido por meio da Chamada CNPq/MCTI/FNDCT Nº 18/2021, vinculada ao projeto "Requisitos Dinâmicos de Controle e Técnicas de Seguimento do MPP para Sistemas Fotovoltaicos", processo nº 408246/2021-9, que tornou possível a realização deste trabalho.

A mim, por não desistir, por aguentar, por sonhar e por seguir em frente em tantos momentos em que fui colocada à prova. Obrigada, eu do passado, por me orgulhar tanto da tua maneira de viver a vida, por dar sempre a sua melhor versão e por colocar amor em tudo que faz. Essa entrega final é a prova de que nós conseguimos.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a Deus, que nunca falhou comigo e esteve ao meu lado todos os dias, nos mais felizes e nos mais difíceis. Obrigada por me fazer entender o processo e a minha missão, por me dar sabedoria e discernimento, e por colocar as pessoas certas em meu caminho, para que a jornada até aqui fosse incrível e a mais especial possível.

“A curva do crescimento nunca é uma linha reta”
(Karen Horney)

RESUMO

O aproveitamento da radiação solar, especialmente para fins energéticos, vem crescendo de maneira exponencial, especialmente no que se refere à geração de energia fotovoltaica. Entre os motivos que impulsionam esse avanço estão: a preocupação com o esgotamento dos recursos naturais; a redução dos custos das tecnologias para a implementação de sistemas de geração fotovoltaica; e os diversos incentivos, ao redor do mundo, em implementar sistemas de geração próximos ao lugar de consumo. Por essa razão, observa-se também a instalação de painéis solares em locais não ótimos, frequentemente expostos a diversas condições climáticas e operacionais, as quais atuam diretamente no rendimento desse tipo de geração de energia, fazendo com que a taxa de conversão diminua. Por conseguinte, existe a busca incessante por contornar essas adversidades. Dessa forma, este trabalho desenvolve um sistema para coleta de dados solarimétricos com elevada taxa de aquisição (1 Hz) e realiza uma análise da dinâmica solar por meio de uma base de dados construída a partir de medições com piranômetros termoelétrico e fotoelétrico. O estudo busca mapear a dinâmica das variações na irradiância solar e compreender como a taxa de aquisição influencia na análise dessas variações, permitindo o desenvolvimento de emuladores fotovoltaicos e algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) mais eficazes.

Palavras-chave: Banco de dados. Dinâmica solar. Fotovoltaico. Piranômetro.

ABSTRACT

The harnessing of solar radiation, especially for energy purposes, has been growing exponentially, particularly with regard to photovoltaic energy generation. Among the reasons driving this progress are concerns about the depletion of natural resources, the reduction in the costs of technologies for the implementation of photovoltaic generation systems, and the various incentives around the world to implement generation systems close to the place of consumption. For this reason, solar panels have also been installed in non-optimal locations, often exposed to diverse climatic and operational conditions that directly affect the performance of this type of energy generation, leading to a decrease in the conversion rate. Therefore, there is a constant effort to overcome these adversities. In this context, the present work develops a solarimetric data acquisition system with a high sampling rate (1 Hz) and focuses on the analysis of solar dynamics and its variations, through the construction of a database of solar irradiance collected by thermoelectric and photoelectric pyranometers. The study aims to map these variations and to understand how different acquisition rates influence the analysis, enabling the development of photovoltaic emulators and more effective maximum power point tracking (MPPT) systems.

Keywords: Database. Solar dynamics. Photovoltaic. Pyranometer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comparação temporal Dia da Sobrecarga da Terra.	18
Figura 2 – Mix de geração de energia global.	19
Figura 3 – Capacidade instalada da geração de energia fotovoltaica no Brasil.	20
Figura 4 – Representação da esfera de Dyson.	21
Figura 5 – Radiação solar.	25
Figura 6 – Espectro eletromagnético.	27
Figura 7 – Irradiância espectral solar.	28
Figura 8 – Piranômetro termoeletrico.	29
Figura 9 – Piranômetro fotoeletrico.	30
Figura 10 – Faixa espectral piranômetros.	31
Figura 11 – Representação Efeito Fotovoltaico.	32
Figura 12 – Hierarquia fotovoltaica.	33
Figura 13 – Representação de curva I-V do módulo MF00350.	36
Figura 14 – Dispositivo para aquisição de dados a) vista superior (caixa aberta) e b) vista traseira (caixa fechada).	38
Figura 15 – Diagrama do sistema de aquisição completo.	39
Figura 16 – Diagrama de conexões - piranômetro SP-510.	40
Figura 17 – Diagrama de conexões - piranômetro SP-215.	41
Figura 18 – Posicionamento correto dos piranômetros.	41
Figura 19 – Conversor ADC - ADS1015.	42
Figura 20 – Conversor ADC - ADS1115.	42
Figura 21 – Módulo amplificador de instrumentação com AD620.	43
Figura 22 – Trimpot multivoltas - 3296W.	44
Figura 23 – Sensor de temperatura - termopar tipo K.	45
Figura 24 – Sensores de temperatura - NTC e PTC.	45
Figura 25 – Sensor de temperatura - HDC1080.	46
Figura 26 – Sensor de temperatura - DS18B20.	46
Figura 27 – Diagrama de bloco - Sensor DS18B20.	46
Figura 28 – Microcontrolador - ESP32.	47
Figura 29 – Microcontrolador - STM32.	47
Figura 30 – Microcontrolador - Arduino.	47
Figura 31 – Microcomputador - Beaglebone Green.	48
Figura 32 – Microcomputador - Raspberry PI 4.	48
Figura 33 – Conversor <i>Boost</i> - XL6009E1.	49
Figura 34 – Identificação das conexões entre os componentes da placa modular.	50
Figura 35 – Fluxograma instalação sistema operacional.	51
Figura 36 – Placa Raspberry.	51

Figura 37 – Área de trabalho Raspberry Pi OS.	52
Figura 38 – Habilitação dos barramentos de comunicação.	52
Figura 39 – Configurações específicas do projeto.	53
Figura 40 – Lógica do dispositivo.	54
Figura 41 – Instalação e configuração para acesso remoto.	55
Figura 42 – Bloco J - UDESC Joinville.	56
Figura 43 – Caixa protetora do dispositivo a) caixa aberta e b) caixa fechada.	57
Figura 44 – Suporte para os piranômetros a) cotas inventor e b) finalizado.	57
Figura 45 – Instalação do sistema de aquisição a) sistema completo e b) sensores de irradiância nivelados.	58
Figura 46 – Comparação dos dados adquiridos durante os dias.	60
Figura 47 – Comparação entre os sensores no dia 5 (2025-05-25) a) Recorte 1 e b) Recorte 2.	63
Figura 48 – Recorte para comparação dos sensores no dia 11 (2025-05-31).	65
Figura 49 – Comparação entre os sensores dia 12 (2025-06-01) a) Recorte 1 e b) Recorte 2.	66
Figura 50 – Comparação das derivadas dos sensores nos diferentes dias.	70
Figura 51 – Energia diária acumulada.	73
Figura 52 – Esquemático do circuito eletrônico utilizado.	93
Figura 53 – Esquemático do módulo amplificador de instrumentação AD620.	94
Figura 54 – Esquemático do conversor boost XL6009.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo das condições climáticas	62
Tabela 2 – Correlação entre os piranômetros SP-510 e SP-215	68
Tabela 3 – Valores máximos e mínimos das derivadas de irradiância dos piranômetros SP-215 e SP-510	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Analog-to-Digital Converter (Conversor Analógico-Digital)
AM	Air Mass (Massa de Ar)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
API	Application Programming Interface (Interface de Programação de Aplicações)
ARM	Advanced RISC (Reduced Instruction Set Computer) Machine (Máquina Avançada com Conjunto Reduzido de Instruções)
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CC/CC	Conversor Corrente Contínua para Corrente Contínua
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
EUA	Estados Unidos da América
FDI	Fator de Dimensionamento do Inversor
FV	Fotovoltaico
GEPAE	Grupo de Estudos e Pesquisas em Automação e Energia
GEPOC	Grupo de Eletrônica de Potência e Controle
GFN	Global Footprint Network (Rede Global de Pegada Ecológica)
GPIO	General Purpose Input/Output (Entrada/Saída de Propósito Geral)
GOV	Governo Federal
GW	Gigawatt
I ² C	Inter-Integrated Circuit (Circuito Integrado Interconectado)
IEA	International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional de Normalização)
IV	Infravermelho
LABREN	Laboratório de Estudos de Irradiação e Recursos Energéticos Renováveis
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência)
NEO	New Energy Outlook (Perspectiva de Nova Energia)

NTC	Negative Temperature Coefficient (Coeficiente de Temperatura Negativo)
OMM	Organização Meteorológica Mundial
OS	Operating System (Sistema Operacional)
PTC	Positive Temperature Coefficient (Coeficiente de Temperatura Positivo)
PWM	Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)
RAM	Random Access Memory (Memória de Acesso Aleatório)
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol (Protocolo Simples de Transferência de Correio)
SPI	Serial Peripheral Interface (Interface Periférica Serial)
TW	Terawatt
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina
UV	Ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcento
Ω	Ohm
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
GB	Gigabyte
MB	Megabyte
Hz	Hertz
GHz	Gigahertz
Si	Silício
nm	Nanômetro
r_{xy}	Coefficiente de correlação
λ	Comprimento de onda
V	Tensão elétrica (Volt)
mV	Milivolt
μV	Microvolt
I	Corrente elétrica (Ampère)
W/m^2	Watt por metro quadrado
Wh/m^2	Watt-hora por metro quadrado
$\text{W}/\text{m}^2/\text{s}$	Watt por metro quadrado por segundo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS	22
1.1.1	Objetivo Geral	22
1.1.2	Objetivos Específicos	22
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	CONCEITOS DA RADIAÇÃO SOLAR	24
2.1.1	Radiação Solar Direta	24
2.1.2	Radiação Solar Difusa	25
2.1.3	Radiação Solar Refletida (Albedo)	25
2.2	ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR	26
2.3	PIRANÔMETRO	29
2.3.1	Classificação dos Tipos de Piranômetros	29
2.3.2	Piranômetro Termoelétrico	29
2.3.3	Piranômetro Fotoelétrico	30
2.4	FUNDAMENTOS DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	31
2.4.1	Efeito Fotovoltaico	32
2.4.2	Funcionamento do Pannel Fotovoltaico	33
2.4.3	Inversor em Sistema Fotovoltaico	33
2.5	DINÂMICA SOLAR	34
2.5.1	Dinâmica Solar Natural	34
2.5.2	Dinâmica Solar com Múltiplas Mudanças	35
3	DESENVOLVIMENTO	38
3.1	ARQUITETURA DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO	40
3.1.1	Sensores de Irradiância Solar	40
3.1.2	Conversor Analógico-Digital (ADC)	42
3.1.3	Amplificador de Instrumentação	43
3.1.4	Divisor de Tensão	44
3.1.5	Sensor de Temperatura	44
3.1.6	Microprocessador	47
3.1.7	Alimentação do Sistema	49
3.2	CONEXÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO	49
3.3	CONFIGURAÇÃO DO AMBIENTE DO MICROCOMPUTADOR	50
3.4	PROGRAMAÇÃO DO MICROCOMPUTADOR PARA AQUISIÇÃO DOS DADOS	53

3.5	INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	56
4	RESULTADOS	59
4.1	BASE DE DADOS COLETADOS	59
4.2	IRRADIÂNCIA SOLAR E TEMPERATURA DIÁRIA	59
4.3	CORRELAÇÃO ENTRE SENSORES DE IRRADIÂNCIA	67
4.4	ANÁLISE DA DINÂMICA SOLAR	69
4.5	ENERGIA DIÁRIA ACUMULADA (WH/M ²)	73
5	CONCLUSÃO	75
5.1	TRABALHOS FUTUROS	76
	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICE A – CÓDIGO MAIN (LÓGICA DO DISPOSITIVO) . . .	83
	APÊNDICE B – ANÁLISE DA BASE DE DADOS COM PYTHON . .	88
	ANEXO A – ESQUEMÁTICO GERAL DO SISTEMA	93
	ANEXO B – ESQUEMÁTICO DO AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO	94
	ANEXO C – ESQUEMÁTICO DO CONVERSOR BOOST	95

1 INTRODUÇÃO

O Dia da Sobrecarga da Terra (*Earth Overshoot Day*, em inglês) marca anualmente o momento em que o uso dos recursos naturais disponíveis para todo um ano, chega ao seu limite. Esse cálculo, realizado desde 1971 pela Global Footprint Network (GFN), organização ambiental sem fins lucrativos, reflete o uso excessivo dos recursos naturais (Hein, 2023). A seguinte fórmula estima o dia em questão:

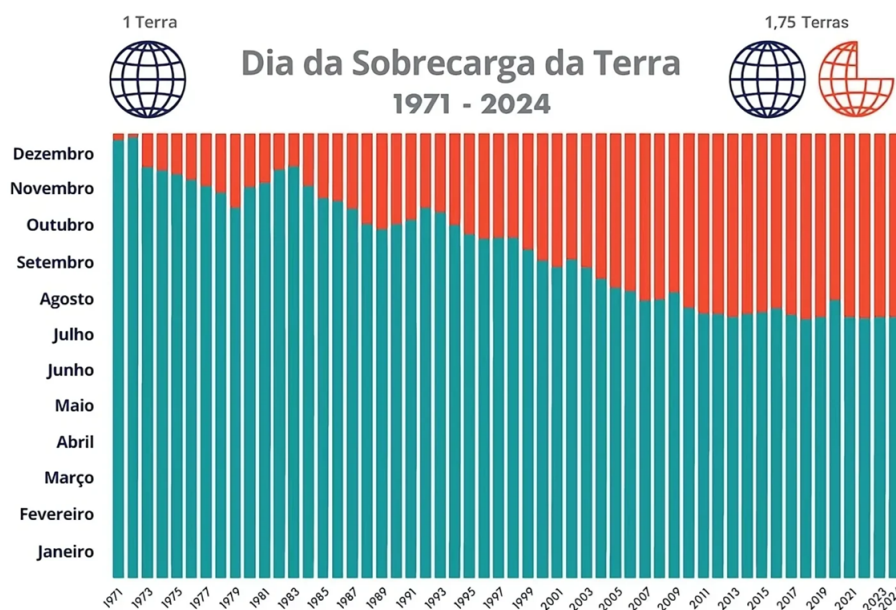
$$\text{Earth Overshoot Day} = \left(\frac{\text{biocapacidade do planeta}}{\text{pegada ecológica da humanidade}} \right) \times 365 \quad (1)$$

Assim, considera-se a proporção entre a capacidade dos ecossistemas de regenerar os recursos naturais e a quantidade de recursos que são consumidos em um ano. Como, tanto o consumo quanto a capacidade de regeneração, variam anualmente, a data do *Overshoot Day* muda de acordo com essas flutuações (Habitability, 2025).

Ao longo dos anos, observa-se na Figura 1 que o *Overshoot Day* tem ocorrido cada vez mais cedo, gerando crescente preocupação. No gráfico, as partes azuis apontam os dias anteriores ao Dia da Sobrecarga da Terra e as partes em vermelho representam os períodos de déficit ambiental de cada ano (Habitability, 2025).

Em 2023, por exemplo, consumiram-se os recursos previstos para 365 dias em pouco mais de sete meses. Isso significa que, a partir dessa data, a humanidade passou a operar em débito ecológico, suprimindo suas necessidades por meio da exploração de estoques não renováveis, da degradação ambiental acumulada e da sobrecarga de ecossistemas (Hein, 2023).

Figura 1 – Comparação temporal Dia da Sobrecarga da Terra.



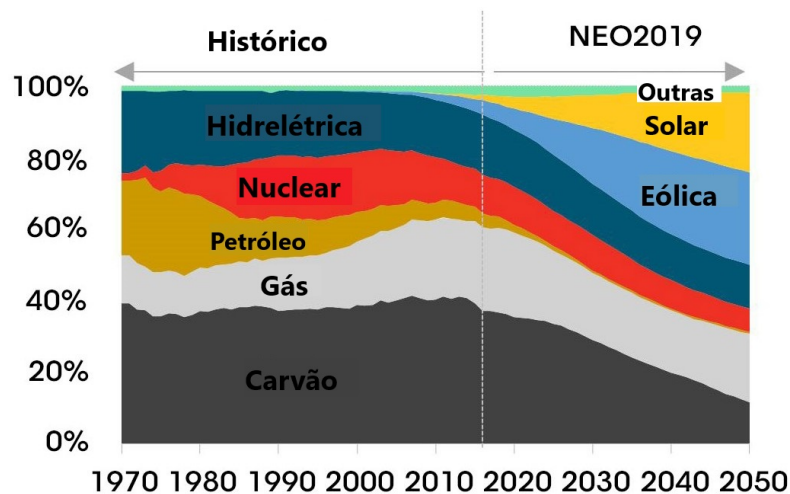
Fonte: Habitability (2025).

Embora os efeitos não sejam imediatos ou visíveis em todos os lugares, o padrão visto contribui, de forma crescente, para crises ambientais, mudanças climáticas e desigualdade no acesso a recursos. Segundo a organização, o cenário só não é mais grave devido ao avanço das energias renováveis (Hein, 2023).

Contextualizando a afirmação da GFN, por meio do relatório *New Energy Outlook 2019* (NEO 2019), da Bloomberg New Energy Finance, visualiza-se o crescimento das energias renováveis. Conforme a empresa, a redução dos custos das tecnologias eólica, solar e de armazenamento de baterias, ajuda a impulsionar a massiva inserção de fontes renováveis na rede de energia global (BNEF, 2019).

O panorama apresentado na Figura 2 permite observar que, em 2050, aproximadamente 50% da rede de energia global será alimentada pela energia solar e eólica.

Figura 2 – Mix de geração de energia global.



Fonte: Bloomberg New Energy Finance (2019) adaptada pela autora.

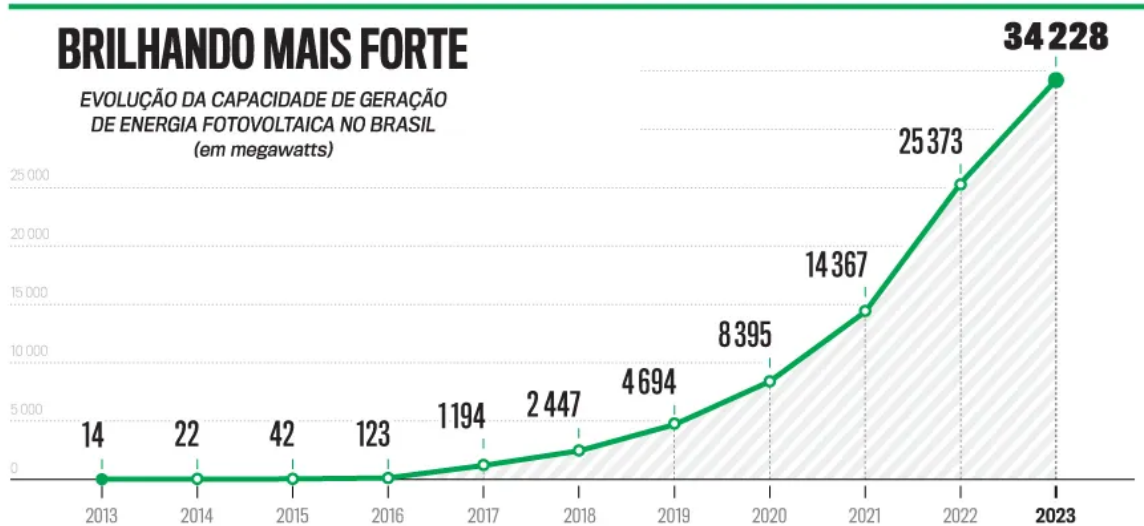
Nessa perspectiva, o mundo se vê com a necessidade de avançar nos estudos para elevar a capacidade de gerar energia elétrica por meios renováveis. Conforme um relatório divulgado pela Agência Internacional de Energia (IEA), a capacidade global de energia renovável, adicionada aos sistemas energéticos, cresceu 50% em 2023, totalizando quase 510 gigawatts (GW), sendo a energia solar fotovoltaica responsável por três quartos das novas adições (IEA, 2024).

Além disso, analisando os pontos levantados sobre o Brasil no relatório, este registrou que o aumento na capacidade de geração de energia por fontes renováveis alcançou recorde histórico no último ano e destacou que a implantação de energia solar fotovoltaica até 2028 deve mais que dobrar, em comparação com os últimos cinco anos (IEA, 2024). Dito isso, na Figura 3, é visualizada a capacidade de geração de energia fotovoltaica como um crescimento exponencial.

Outrossim, os estudos da capacidade de geração de energia fotovoltaica ultrapassam os limites terrestres. Em entrevista ao podcast "The Joe Rogan Experience", Elon Musk afirmou que acredita que toda a demanda energética dos Estados Unidos poderia ser suprida com o auxílio de uma planta fotovoltaica gigantesca nos céus. O projeto comentado pelo bilionário, consiste

em escolher um ponto morto, cobri-lo com painéis solares, os quais estariam constantemente alimentados diretamente pela energia solar e, assim, abastecer todo os EUA (Sales, 2024).

Figura 3 – Capacidade instalada da geração de energia fotovoltaica no Brasil.



Fonte: Veja (2023).

Contudo, os estudos sobre utilizar o espaço como ambiente para a geração de energia iniciaram há anos. Em 1964, Nikolai Kardashev, propôs a Escala de Kardashev categorizando as civilizações do Universo com base no consumo de energia, desenvolvimento tecnológico e capacidade de aproveitamento dos recursos disponíveis no ambiente (Oliveira, 2023).

Assim, a humanidade atual encontra-se na comunidade Tipo 0, visto que ainda não conseguiu aproveitar a totalidade dos recursos energéticos do seu planeta. A civilização do Tipo 1, é capaz de aproveitar todos os recursos energéticos do seu planeta. Então, a partir da civilização do Tipo 2, a sociedade alcançaria um desenvolvimento a nível estelar (Oliveira, 2023).

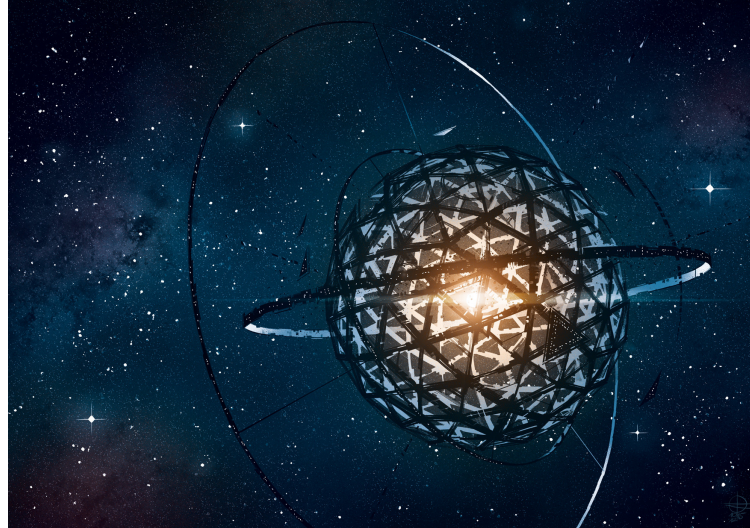
Corroborando com isso, em 1960, o físico e matemático Freeman Dyson, publicou o artigo "Busca por fontes estelares artificiais de radiação infravermelha", propondo uma "biosfera artificial", posteriormente nomeada de "Esfera de Dyson" por Kardashev (Williams, 2023). O projeto consistia em uma colossal estrutura esférica com uma infinidade de coletores de energia solar, situada ao redor de uma estrela, que capturaria a luz e radiação emitidas, utilizando a energia liberada pelo corpo celeste, para alimentar uma civilização (Solar, 2024).

Portanto, para alcançar a civilização 2, proposta por Kardashev, seria necessário construir uma Esfera de Dyson com painéis solares circundando o Sol, como a Figura 4, dominando toda a energia produzida pelo mesmo, aproximadamente $4 \times 10^{26} \text{ W/m}^2$ (Williams, 2023).

Ainda que as propostas gerem entusiasmo, por um lado, a Esfera de Dyson, é altamente complexa do ponto de vista tecnológico, ainda inviável, e por outro lado, a ideia de Elon Musk (referente à geração de energia fora da Terra) tem grandes pontos a serem examinados. Entre as principais questões a serem consideradas, destacam-se: o desafio de trazer a energia gerada a Terra, o problema da estabilidade da rede, as perdas no caminho e o custo de tamanha imple-

mentação. Dito isso, todos os aspectos supracitados, tem um tópico em comum: a interferência causada pela distância entre o local de geração e o de consumo.

Figura 4 – Representação da esfera de Dyson.



Fonte: Energia Inteligente (2024).

Enquanto ideias de geração de energia fora do planeta permanecem ineficazes e, por razões similares, a geração em locais inóspitos e distantes dos centros consumidores enfrenta grandes limitações, observa-se um movimento contrário: o aumento da geração próxima ao ponto de consumo. Nesse viés, placas solares têm sido instaladas em locais usualmente considerados não ideais, devido ao sombreamento e à variação da dinâmica solar.

Como exemplo, a empresa brasileira Randon Caminhões e Ônibus, um dos maiores fabricantes de implementos rodoviários e veículos comerciais da América Latina, lançou a linha Randon Solar, a qual conta com a tecnologia de painéis solares colocados na parte externa de um caminhão frigorífico, direcionando a energia captada para a refrigeração interna do baú, garantindo a conservação da carga reduzindo o uso do combustível (Randon, 2024).

Em virtude, também, das vias não ótimas para a implementação, nas quais as placas fotovoltaicas são expostas a diversas condições climáticas (como irradiância, massas de ar e temperatura), e condições operacionais (como composição e ângulo de incidência da luz), as quais atuam diretamente no rendimento desse tipo de geração de energia, há uma busca incessante por um melhor aproveitamento dessa tecnologia, contornando adversidades como o sombreamento, por exemplo (Solar, 2020b).

Por conseguinte, quando comparada à geração de energia por aerogeradores, que no Brasil tem uma taxa de conversão de mais de 40%, a taxa de conversão da geração por meio de painéis solares ainda é pequena (Governo Federal, 2023a). A eficiência média dos módulos fotovoltaicos comerciais está atualmente em torno de 20%, podendo ser ligeiramente abaixo ou acima disso. Isso significa, que apenas um quinto da energia recebida do Sol é transformada em energia elétrica, desconsiderando os períodos noturnos, em que a geração é nula (Solar, 2020b).

Entretanto, para o aproveitamento de energia em locais não ótimos, sujeitos a muitos sombreamentos com elevada dinâmica, é necessário que esta dinâmica seja adequadamente mapeada. Atualmente, a maior parte dos bancos de dados disponibilizados tem foco na formação de dados para uma geração ótima de energia, em áreas com elevada incidência solar e livres de interferências. Desse modo, a maioria dos bancos existentes apresentam baixas taxas de aquisição ou não representam corretamente ambientes com intensa variabilidade de irradiância.

O mapeamento dessas variações é fundamental para o desenvolvimento de emuladores fotovoltaicos, bem como para os sistemas de controle e rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT-*Maximum Power Point Tracking*), adaptados a cenários reais. A resolução refinada na aquisição dos dados, obtida pelos piranômetros, permite a captação das flutuações na irradiância solar, viabilizando a criação de algoritmos de controle mais eficazes e a avaliação da viabilidade de instalação de sistemas fotovoltaicos em locais com condições variadas.

Nesse contexto, justifica-se de forma fundamental o desenvolvimento deste projeto, que propõe a elaboração de uma base de dados com uma elevada taxa de aquisição, voltada à análise da dinâmica solar em ambientes com nível de sombreamento significativo. Assim, o estudo permite a compreensão do comportamento da taxa de aquisição dos piranômetros e como deve ser ajustada a depender da dinâmica solar local. Essa abordagem é essencial para o desenvolvimento de conversores mais eficientes, além de fontes de alimentação programáveis e estratégias de MPPT mais adaptativas, contribuindo para o avanço da geração fotovoltaica em cenários não ideais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é a contribuição para o avanço dos estudos relacionados à geração de energia fotovoltaica. Para tanto, o estudo trata do desenvolvimento de uma análise da dinâmica solar, e suas variações, em Joinville por meio da construção de uma base de dados da irradiância solar local.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos que delineiam tal propósito são:

- Implementar um sistema para registros de dados solarimétricos.
- Construir uma base de dados com os valores de irradiância solar obtidos.
- Disponibilizar dados em serviço nuvem para compartilhamento com institutos parceiros.
- Compreender se a taxa de aquisição do projeto capta as variações climáticas.
- Desenvolver uma análise da dinâmica solar.

- Examinar a taxa de conversão da luz do Sol em energia.
- Estudar as possíveis melhorias do projeto.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do trabalho discorre pelas etapas de construção de uma base de dados e análise desta. A organização segue uma lógica que reflete a evolução natural de implementação da sede de coleta de dados, a realização da base e a verificação dos dados obtidos. A estrutura divide-se em cinco capítulos:

1. Introdução: contextualizar o tema, justificar a escolha do estudo e delinear os objetivos do trabalho.
2. Revisão Bibliográfica: aprofundar os conceitos e tecnologias relacionadas ao desenvolvimento do estudo.
3. Desenvolvimento: relatar da elaboração e implementação da sede de coleta dos dados de irradiância solar até a criação do banco de dados.
4. Resultados: abordar as seções que orientam a análise efetiva da dinâmica solar.
5. Conclusão: sintetizar os resultados alcançados, ressaltar os desafios encontrados e elencar direções para futuras pesquisas e aprimoramentos.

Segue-se essa estrutura buscando fornecer uma visão clara e organizada, permitindo o acompanhamento da evolução do estudo, a compreensão dos fundamentos e aplicações da Engenharia Elétrica ao longo de cada etapa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem por objetivo apresentar o estudo prévio realizado no desenvolvimento da análise apresentada neste trabalho, a fim de estabelecer os conceitos e métodos fundamentais empregados, relacionados a análise da dinâmica solar focada em melhorar a eficiência da geração de energia por meio de painéis solares.

2.1 CONCEITOS DA RADIAÇÃO SOLAR

O Sol é o provedor de quase toda a luz que ilumina o planeta Terra, direta ou indiretamente. A iluminação natural e a luz do dia são radiações eletromagnéticas na região visível que chegam do Sol. Salienta-se, que a radiação que atinge a superfície do planeta a cada duas horas, fornece mais energia do que a quantidade que é usada pela população da Terra durante um ano inteiro (CEPEL; CRESESB, 2014). Nessa situação, entende-se como radiação solar, toda a energia proveniente do sol que incide na Terra, a qual é fonte de vida, mas também de produção de eletricidade, alimentando o mundo (Magarreiro; Freitas; Brito, 2016).

Contudo, há uma grande confusão ao avaliar o potencial da energia solar fotovoltaica em uma determinada região. Sob essa perspectiva, quando refere-se à quantidade de energia por metro quadrado na superfície, ou seja, ao fluxo de potência, utiliza-se o termo irradiância solar (W/m^2). Ainda, para abordar a energia que incide sobre um local durante um intervalo de tempo, usa-se o termo irradiação solar (Wh/m^2) (Melo, 2012).

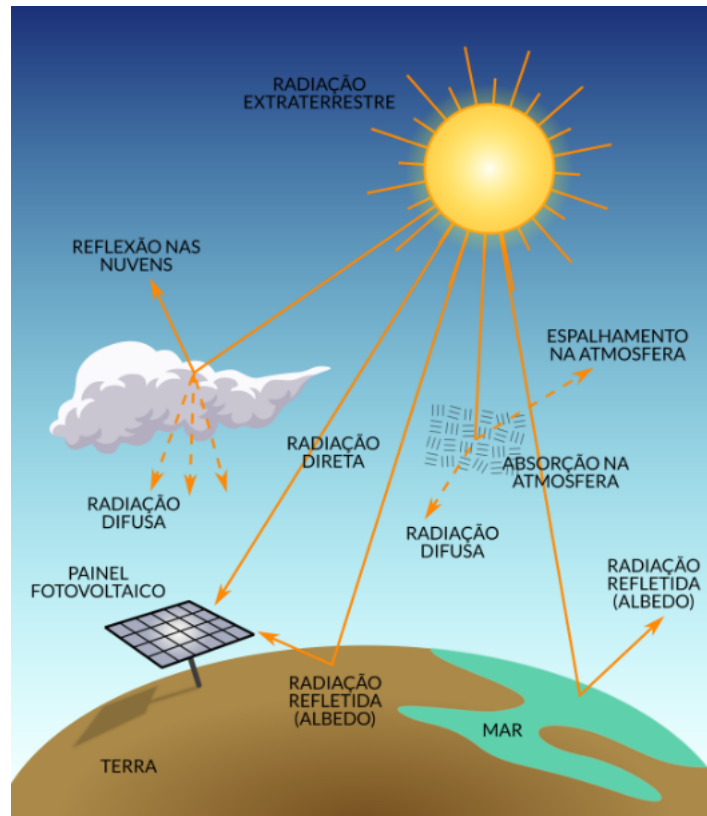
A radiação solar que atinge a terra, no topo da camada atmosférica, é denominada radiação extraterrestre. O valor da irradiância extraterrestre que chega sobre uma superfície perpendicular aos raios solares na distância média Terra-Sol é relativamente constante, sendo aproximadamente de 1.367 W/m^2 (CEPEL; CRESESB, 2014). Considerando que o raio médio da Terra é de 6.371 km, e que o valor da irradiância correspondente ao da constante solar está incidindo sobre a área projetada da Terra, conclui-se que a potência total disponibilizada pelo Sol à Terra, no topo da atmosfera, é de aproximadamente 174 mil TW (terawatts) (Silva, 2019).

Apesar disso, nem toda radiação do topo da atmosfera, chega a superfície. Logo, para calcular a irradiância global, é necessário considerar diversos processos atmosféricos, como dispersão e absorção da luz por gases e partículas na atmosfera. Além disso, variações locais, como vapor de água, nuvens e poluição, também influenciam a radiação solar. Esses fatores alteram o ângulo de incidência dos raios solares, conforme ilustrado na Figura 5. Como resultado, para um observador na superfície, a radiação solar se divide em três componentes principais: a radiação direta, difusa e refletida (Magarreiro; Freitas; Brito, 2016).

2.1.1 Radiação Solar Direta

A radiação solar direta, também conhecida como radiação de feixe, é emitida diretamente do Sol, sem sofrer nenhuma interferência. Por ser uma incidência direta, produz sombras nítidas.

Figura 5 – Radiação solar.



Fonte: Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná (2016).

Por exemplo, em um dia totalmente nublado, praticamente não há radiação direta (Solar, 2020c).

2.1.2 Radiação Solar Difusa

A radiação solar difusa inclui a radiação solar de todas as direções do céu e não possui uma direção definida, visto que partículas do ar acabam por dispersar o seu caminho na superfície, conhecido também como fenômeno de espalhamento pela atmosfera terrestre (Solar, 2020c). Seguindo o exemplo comentado anteriormente, mesmo em dias totalmente sem nuvens, pelo menos 20% da radiação que atinge a superfície é difusa, já em dias nublados a radiação é 100% difusa (CEPEL; CRESESB, 2014).

2.1.3 Radiação Solar Refletida (Albedo)

A radiação solar refletida, ou albedo como pode ser chamada, resulta da reflexão da radiação solar na superfície inclinada, ou seja, é a radiação refletida pelo ambiente com relação à horizontal, proveniente de materiais que refletem a luz solar, dependendo, portanto, das propriedades ópticas da superfície (Magarreiro; Freitas; Brito, 2016).

Pelos fatores supracitados, da potência total disponibilizada pelo Sol à Terra, chegam efetivamente à superfície terrestre cerca de 95,7 mil TW. Uma vez que, aproximadamente 55% da irradiância solar que incide no topo da atmosfera é refletida (4%) e absorvida (51%) pela

superfície terrestre (CEPEL; CRESESB, 2014). Os 45% restantes são absorvidos ou refletidos pela camada atmosférica, a qual tem o coeficiente de espessura denominado "Massas de Ar"(AM, do inglês Air Mass) (Lima, 2024b). Desta forma, também, a massa de ar tem relação direta com a variação dos comprimentos de onda da radiação solar incidente.

2.2 ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar, pode ser entendida como a radiação eletromagnética emitida pelo Sol. Desse modo, a radiação eletromagnética refere-se à propagação de energia por ondas geradas por cargas elétricas em oscilação e que viajam no ar ou no vácuo na velocidade da luz, sem precisar de meio físico para ser transportada (Halliday; Resnick; Walker, 2012).

As cargas oscilatórias estão presentes em toda a natureza. O corpo humano, por exemplo, através do movimento constante de átomos e moléculas, emite ondas eletromagnéticas, assim como todos os corpos no universo cuja temperatura é superior a 0 Kelvin. Assim, a emissão dessas ondas ocorre devido à agitação térmica das partículas carregadas, como elétrons e prótons, que ao se moverem geram campos elétricos e magnéticos variáveis, produzindo radiação eletromagnética (Halliday; Resnick; Walker, 2012).

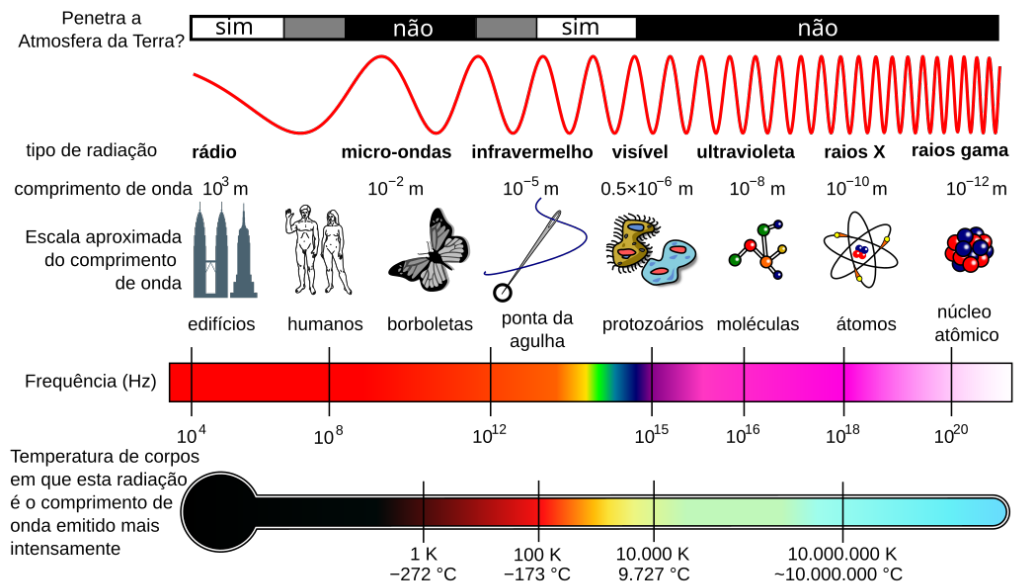
Exemplificando, ao lançar uma pedra em um lago calmo com vegetações ao redor, a pedra é a fonte das ondas circulares que se formam, e a perturbação que essas ondas circulares geram na vegetação, é a energia transportada pela onda, do lugar onde jogou-se a pedra até o local da vegetação. Desse modo, pode-se dizer que as ondas são perturbações que se propagam pelo espaço sem transporte de matéria, apenas de energia (Asth, 2024).

Destarte, observa-se na Figura 6, que à medida que aumenta a velocidade de oscilação das partículas de um corpo, a frequência da radiação emitida também se eleva, resultando em um incremento na temperatura. A temperatura, por sua vez, é o fator determinante para o comprimento de onda da radiação emitida. Sendo assim, as cores mais quentes (vermelho e laranja) representam maior comprimento de onda e as mais frias (azul e violeta), tem comprimento de onda menores (Santos; Pereira, 2013).

Entretanto, esta relação da medição da temperatura de cor é um pouco confusa. Ao visualizar a Figura 6 e comparando-se a temperatura da luz azul e da laranja, embora a primeira seja considerada “fria”, esta tem mais Kelvin que a segunda, considerada “quente”. Em resumo, a temperatura de cor não tem relação com a temperatura física emitida pela fonte, mas sim com a aparência da luz visível (Lab, 2024).

De modo geral, a radiação solar é composta pelos raios solares: infravermelho, luz visível e ultravioleta. A radiação infravermelha (IV), é caracterizada por seu comprimento de onda de 740 nanômetros (nm) a 1 milímetro. Seu nome se deve a sua frequência de onda, que vai um pouco além do que nossos olhos podem detectar no lado vermelho do arco-íris, e tem pouca energia, apenas produzindo agitação térmica (Hisatomi, 2024).

Figura 6 – Espectro eletromagnético.



Fonte: Wikipedia (2022).

Grande parte da energia está associada à transmissão de calor, por meio da sensação de aumento da temperatura. A maioria dos objetos quentes produz essa radiação e metade da energia produzida pelo sol é infravermelha, sendo que a maior parte é absorvida pela atmosfera (Hisatomi, 2024).

A luz visível, ou região visível, pode ser definida como sendo a radiação que pode ser percebida a olho nu. Isso acontece porque os fótons dessa radiação são capazes de atingir o olho humano. Nessa conformidade, o comprimento de onda varia entre 380 nm e 740 nm (nanômetros), sendo classificado pelas cores do arco-íris (que vão do violeta ao vermelho). Posto isto, essa luz é limitada pela região do infravermelho no extremo de maiores comprimentos de onda e pela região ultravioleta, no de menores comprimentos (Santos; Pereira, 2013).

A radiação ultravioleta (UV), corresponde à radiação com comprimento de onda de 200 a 380 nm (nanômetros), aproximadamente, e representa cerca de 9% de toda energia solar que atinge a Terra. Dessa forma, por ser a radiação mais energética emitida pelo Sol, é capaz de romper certas ligações químicas, sendo considerada a mais perigosa para a saúde humana. Os raios ultravioleta são classificados em três categorias: UVA, UVB e UVC (Hisatomi, 2024).

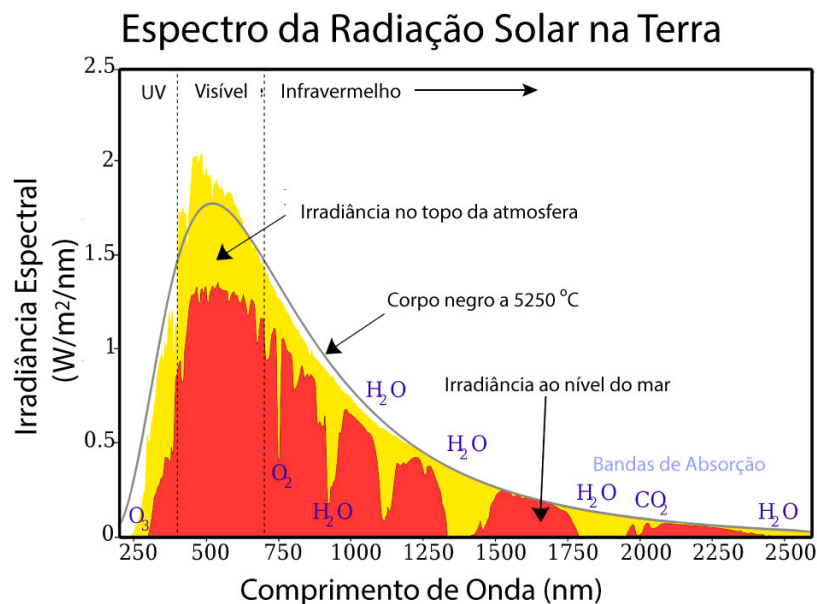
Os raios UVA têm a maior incidência no planeta Terra e incidem de forma uniforme durante todos os dias em todas as estações do ano, mesmo durante épocas de baixa luminosidade (Hisatomi, 2024). Em razão disso, mesmo na sombra uma pessoa pode estar exposta à radiação ultravioleta (UV), devido a claridade natural do sol (Governo Federal, 2023b).

Ainda, como comentado anteriormente, o espectro extraterrestre apresenta diferenças significativas daquele encontrado na superfície terrestre. Isso acontece porque a atmosfera também exerce influência na distribuição espectral da radiação solar, que causa atenuações e distorções em seu formato (Neves, 2016).

Desse modo, o espectro solar no topo da atmosfera terrestre é composto aproximadamente por 9% de radiação ultravioleta (UV), 46% de radiação visível e 45% de radiação infravermelha (IV) (Vilela, 2010). Dentro da faixa ultravioleta, destaca-se que as radiações com comprimento de onda inferior a 300 nm representam apenas 1,2% da energia total emitida pelo Sol. Da mesma forma, as radiações com comprimento de onda superior a 2.400 nm, na região do infravermelho, correspondem a apenas 4% da energia total do espectro solar (Neves, 2016).

A Figura 7 compara o espectro de irradiância solar, diferenciando-se o comprimento de onda e a frequência, no topo da atmosfera (AM0), de um corpo negro a 5250 °C e na superfície terrestre a nível do mar (AM1.5), essa última sendo padrão internacional (Lima, 2024b).

Figura 7 – Irradiância espectral solar.



Fonte: Cursos de Engenharia Elétrica UFRJ (2024).

Dito isso, ainda que exista um padrão internacional, o espectro solar que chega à superfície terrestre varia de acordo com a hora do dia, dia do ano e a localidade. Os parâmetros utilizados para gerar o espectro "padrão", foram baseados em características representativas aos Estados Unidos da América (EUA) durante o período de um ano, o que gera limitações de aplicabilidade para outras localidades. Desse modo, é de se esperar que o espectro gerado para a América do Norte não corresponda para regiões na América do Sul (Neves, 2016).

Nesse cenário, infere-se a importância da medição e análise da irradiância solar, posto que conhecer do recurso solar é a variável que apresenta maior relevância para o desenvolvimento de um projeto de sistema de aproveitamento da energia solar (CEPEL; CRESEB, 2014).

2.3 PIRANÔMETRO

Quando fala-se de instrumentos de medição aplicados à geração de energia elétrica, comumente associasse apenas as grandezas elétricas como tensão, corrente, resistência e potência. Entretanto, ao tratar de energias renováveis, como a solar (fotovoltaica, heliotérmica e térmica), deve-se pensar em como mensurar a fonte, no caso a radiação solar (Solar, 2020a).

O piranômetro é o dispositivo que permite medir a irradiância solar, cuja radiação solar é a principal fonte de geração de energia (ISO, 2018). Este tipo de dispositivo é utilizado em diversas aplicações na área de energia solar, tratamento UV, pesquisas atmosféricas, etc. Assim, nos parques de energia solar, os piranômetros são usados para medir o potencial energético de uma área, ajudando a identificar os ângulos ideais para maximizar a captação da irradiação solar e garantir a maior eficiência possível na conversão fotoelétrica, além de estimar a eficácia de um painel solar (Solar, 2020a).

2.3.1 Classificação dos Tipos de Piranômetros

Os piranômetros são padronizados pela norma ISO 9060:2018, a qual prevê duas categorias: os piranômetros termopilha e os piranômetros fotoelétricos.

2.3.2 Piranômetro Termoelétrico

Os piranômetros termoelétricos, ou termopilha como são conhecidos, Figura 8, são constituídos por um conjunto de termopares em série, contendo um lado posicionado em uma superfície enegrecida voltada para o Sol e o outro voltado para o interior do instrumento ou sob uma superfície de cor clara (Fraidenraich; Lyra, 1995).

Figura 8 – Piranômetro termoelétrico.



Fonte: Apogee (2024).

A termopilha é revestida com uma tinta preta especial para simular a resposta de um “corpo negro”, de modo que a energia radiante solar incidente é praticamente toda absorvida e convertida em calor (INPE, 2017).

A diferença de temperatura, que surge mediante o efeito “Seeback”, nas juntas dos termopares expostos em condições diferentes à radiação solar produz uma tensão elétrica proporcional à radiação incidente (Fraidenraich; Lyra, 1995).

Por ser necessária a conversão intermediária da energia fototérmica, a principal limitação do piranômetro termopilha é o tempo de resposta, considerado lento quando comparado ao sensor fotoelétrico (ISO, 2018).

Atualmente, o piranômetro de termopilha é o instrumento com menor incerteza para medir a radiação solar, apresentando desvios inferiores a 1% dependendo de sua classificação. Por essa razão, esses instrumentos são frequentemente utilizados em pesquisas de campo que exigem um alto nível de precisão (INPE, 2017).

Assim sendo, são comumente empregados em calibrações, devido à sua capacidade de medir a radiação solar em quase todo o espectro, variando de 300 nm a 3.000 nm, conforme ilustrado na Figura 10 (Freire, 2008).

2.3.3 Piranômetro Fotoelétrico

Os piranômetros do tipo fotovoltaico ou fotoelétrico, Figura 9, são mais robustos que os anteriores e são compostos por uma célula fotovoltaica de silício de pequena dimensão, usada como sensor, a qual é posicionada sob um difusor e exposta à radiação solar. Pelo efeito fotovoltaico, a célula produz uma corrente elétrica que, sob determinadas condições, é proporcional à intensidade da radiação incidente (Fraidenraich; Lyra, 1995).

Figura 9 – Piranômetro fotoelétrico.



Fonte: Apogee (2024).

Nos dias atuais, são os dispositivos mais utilizados para a medição da radiação solar. Sua principal vantagem em relação aos piranômetros termoelétricos é o baixo custo, além de não exigirem correção espectral, uma vez que o piranômetro fotovoltaico é uma célula fotovoltaica de silício cristalino com uma faixa espectral entre 400 nm e 1.100 nm, semelhante à dos módulos fotovoltaicos (Zeqiang B.and Wenhua; Yizhuo; Xiaolei H.and Wei, 2013).

Por não apresentar resposta espectral plana, Figura 10, a não linearidade acarreta em incertezas distintas para observações realizadas em condições de céu claro e céu totalmente nublado. Outrossim, esse equipamento é mais sensível a ruídos, quando comparado ao apresentado anteriormente (INPE, 2017).

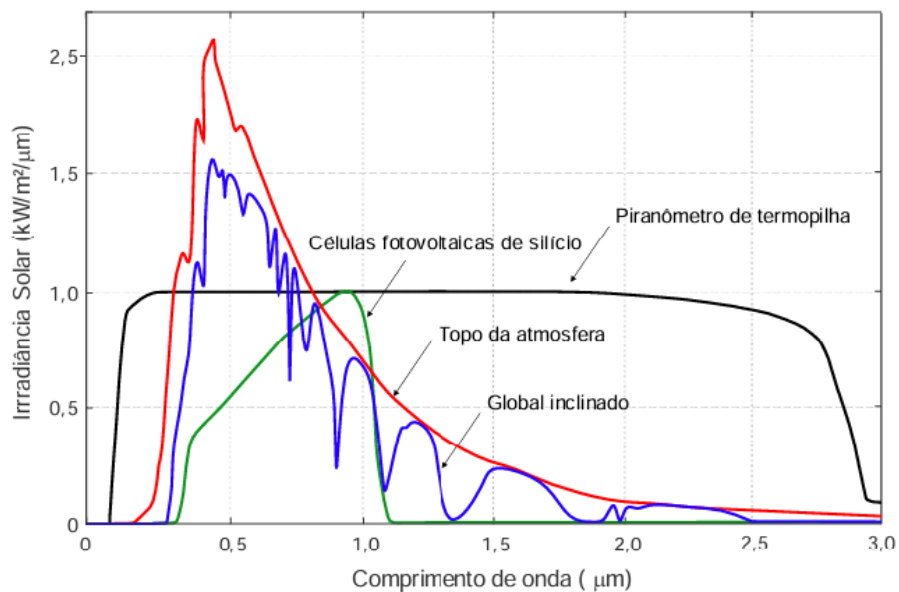
Isso acontece, pois o funcionamento dos piranômetros fotoelétricos é puramente elétrico, uma vez que utilizam fotodiodos para conversão entre irradiância solar e o sinal elétrico. Por esse

motivo, promove uma resposta rápida, quase instantânea, ao estímulo luminoso, sendo bastante útil para detecção de rápidas flutuações (Vilela, 2010).

Por outro lado, sua desvantagem está ligada a limitação da faixa espectral, que fornece menor precisão em comparação as medidas de um piranômetro termoeletrico, o qual responde até 3.000 nm (CEPEL; CRESESB, 2014).

A Figura 10 mostra uma comparação das faixas espectrais do piranômetro fotoelétrico (cuja curva é representada pela curva típica do silício cristalino) e do piranômetro termoeletrico.

Figura 10 – Faixa espectral piranômetros.



Fonte: (MEYDBRAY; EMERY; KURTZ, 2012), adaptado por (FIGUEIRA, 2020).

Nas estações de medida os piranômetros são comumente instalados na horizontal, de forma que obtenham a irradiância global horizontal, composta por uma componente direta e várias componentes difusas, conforme mencionado previamente, recebidas pelo hemisfério acima do plano que se encontra o piranômetro (Ineichen; al., 1992).

A partir do histórico dessas medições pode-se viabilizar a instalação de sistemas fotovoltaicos em uma determinada região, garantindo o máximo aproveitamento do recurso ao longo do ano, uma vez que podem ser previstas as variações da intensidade da irradiação solar de acordo com a localização geográfica (CEPEL; CRESESB, 2014).

2.4 FUNDAMENTOS DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

No Brasil, desde a criação da Resolução Normativa n° 687 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a qual trata do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) pelo usuário, a implementação de energia fotovoltaica começou a expandir-se significativamente (ANEEL, 2015).

Uma importante consideração que deve ser feita é que a tecnologia solar fotovoltaica é diferente da tecnologia solar térmica. Enquanto a primeira utiliza o calor através da radiação de luz visível, conforme visto na Figura 7, a segunda utiliza a radiação infravermelha para seu aquecimento (Mariano; Junior, 2022).

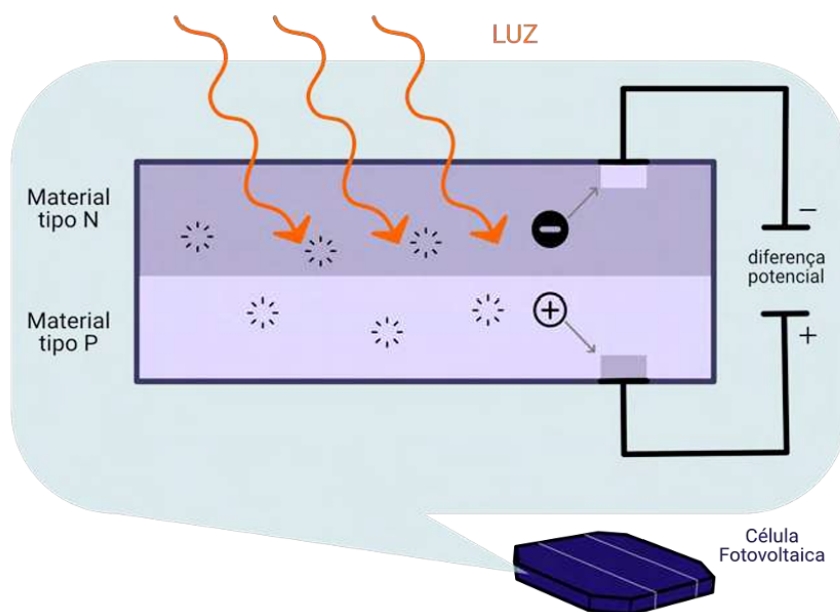
Dito isso, a geração de energia fotovoltaica se baseia na conversão da radiação solar em eletricidade, através de materiais semicondutores, resultando em um fenômeno conhecido por Efeito Fotovoltaico (Mariano; Junior, 2022).

2.4.1 Efeito Fotovoltaico

O Efeito Fotovoltaico foi observado pela primeira vez por Edmond Becquerel que verificou que placas metálicas, mergulhadas em um electrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz (Becquerel, 1839).

Como foi observado inicialmente, o Efeito é caracterizado pela formação de uma diferença de potencial (tensão elétrica) entre os terminais de uma junção P-N semicondutora quando este material é exposto à luz, gerando um campo elétrico interno que é responsável pela consolidação da conversão fotovoltaica, conforme Figura 11 (Mariano; Junior, 2022).

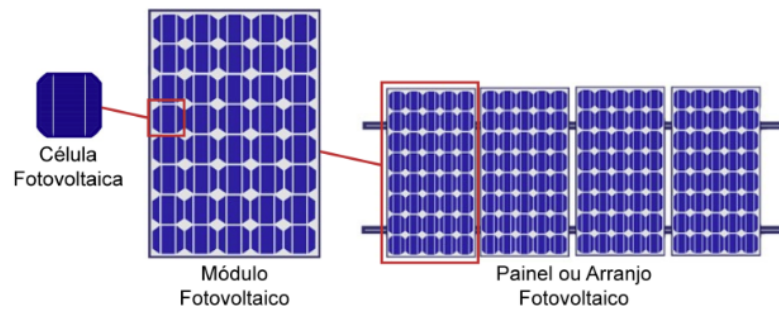
Figura 11 – Representação Efeito Fotovoltaico.



Fonte: MARIANO (2022).

Em seguida as células fotovoltaicas são interligadas e encapsuladas formando o módulo fotovoltaico, o qual atua como gerador fotovoltaico. Assim, a união dos módulos formam o que se conhece como painel fotovoltaico, Figura 12, e com outros dispositivos como acumuladores, conversores e inversores constituem um sistema fotovoltaico de geração de energia elétrica (Nascimento, 2004).

Figura 12 – Hierarquia fotovoltaica.



Fonte: MORAES (2020).

2.4.2 Funcionamento do Painel Fotovoltaico

As células que constituem um painel são fabricadas com material semicondutor, ou seja, um material com condutividade elétrica intermediária entre condutores e isolantes (Wendling, 2011). O material mais utilizado na fabricação de células solares é o silício. Porém, devido à falta de elétrons livres, o silício puro não é um bom condutor de elétrons. Por este motivo, costuma-se acrescentar ao mesmo, por processo de dopagem, certa porcentagem de fósforo e boro (Niedzialkoski, 2013).

Partindo de um silício puro, ao introduzir átomos de boro em uma metade e de fósforo na outra, é formada pelo que se chama junção P-N. Nesta junção os elétrons livres do lado N passam ao lado P onde encontram os buracos que os capturam. Isto faz com que haja um acúmulo de elétrons no lado P, tornando-o negativamente carregado, e uma redução de elétrons do lado N, tornando-o eletricamente positivo. Estas cargas aprisionadas dão origem ao campo elétrico permanente (CEPEL; CRESESB, 2014).

As células podem ser aplicadas nos módulos fotovoltaicos. Portanto, o módulo fotovoltaico é a unidade básica para o sistema de geração de energia elétrica. O módulo consiste em uma estrutura montada em um quadro de alumínio, o qual é composto por células fotovoltaicas em paralelo e em série, cobertas geralmente por vidro ou plástico, para evitar as ações do tempo e de possíveis impactos (Solenerg, 2024).

Quando ligados em um painel, os módulos geram energia elétrica nas mais variadas condições de operação. Ressalta-se que, quando os módulos são conectados em série, geralmente resultam em altas tensões, enquanto a conexão de módulos em paralelo resulta em altas correntes. Portanto, a configuração do arranjo FV visa adequar as características do sistema de acordo com as características de entrada de cada inversor (Messenger; Ventre, 2010).

2.4.3 Inversor em Sistema Fotovoltaico

O inversor é responsável por converter a energia de corrente contínua, vinda dos painéis, para corrente alternada, conforme a rede de distribuição pública (Solar, 2024). O fator de dimensionamento de inversores (FDI), relação entre a capacidade do inversor e a potência

nominal do gerador fotovoltaico, deve ser avaliado de acordo com o local de operação do sistema, uma vez que regiões mais quentes e com índices de radiação elevados tendem a exigir uma maior utilização do inversor. Devido a potência nominal do gerador fotovoltaico ser atingida poucas vezes ao longo de um ano, é comum subdimensionar o inversor (Pereira; Goncalves, 2008).

Em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, o inversor é o “coração” do sistema e é a partir dele que acontece a conversão entre a corrente contínua dos painéis e a tensão de corrente alternada da rede elétrica local. Além do mais, garante a segurança à instalação, evitando assim o fenômeno de ilha, quando parte da rede elétrica é desconectada do restante do sistema da concessionária, embora a estação continue a ser energizada por um ou mais geradores distribuídos conectados a mesma, formando um subsistema isolado (Junior, 2010).

Existem diversos modelos de inversores, para aplicações diferentes. Todavia, como este dispositivo não é o foco de estudo, não são abordados mais detalhes.

Entretanto, é importante destacar que a depender do local e da aplicação do sistema de energia fotovoltaico, são exigidas informações mais precisas, a compreensão da variabilidade diária ou instantânea da irradiação solar. Ambas variabilidades podem afetar muito a dinâmica de funcionamento do sistema, tendo importância fundamental sobre o dimensionamento dos componentes complementares e da tecnologia a ser implementada (INPE, 2017).

Nesse âmbito, a técnica de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) destaca-se como essencial para maximização da produtividade dos painéis solares. Desse modo, o monitoramento da dinâmica solar proposto neste trabalho, é fundamental no momento de projetar o controlador MPPT, uma vez que depende das variações de irradiância para ajustar o ponto de operação ideal. Outrossim, os dados coletados impactam no desenvolvimento de emuladores fotovoltaicos melhores, os quais simulam o desempenho de módulos solares em diferentes condições.

Sendo assim, evidencia-se que a compreensão da dinâmica solar é crucial para otimizar a geração de energia, dimensionar um sistema fotovoltaico e aprimorar as estratégias de controle.

2.5 DINÂMICA SOLAR

É comum, quando fala-se de dinâmica solar, generalizar seu significado à movimentação do sol. Porém, ao realizar análises detalhadas para a implementação de uma estação de geração com energia solar, por exemplo, percebe-se que a dinâmica do Sol está exposta a diversas condições. E o seu estudo pode ser dividido em dois grandes tópicos: a dinâmica solar natural e a dinâmica solar com múltiplas mudanças.

2.5.1 Dinâmica Solar Natural

A dinâmica solar natural, considerada lenta, é usualmente encontrada em arranjos FVs projetados para maximizar a geração FV com correta inclinação e orientação, sendo assim, alguns fatores influenciam diretamente essa dinâmica (Figueira, 2020).

A relação do sistema Terra-Sol ao longo dos movimentos de rotação e translação da Terra é fundamental para se estabelecer padrões para sistemas fotovoltaicos, tal qual sua influência nas variações de posição do Sol ao longo do ano e dos dias (INPE, 2017).

A rotação diária da Terra em relação ao seu eixo (norte e sul) é perpendicular ao Equador, mas não é perpendicular ao plano de órbita da Terra em relação ao Sol. A medida de inclinação do eixo da Terra em linha perpendicular ao plano da órbita é atualmente cerca de $23,5^\circ$ em média. Dito isso, essa rotação é responsável pelas estações do ano (Soares, 2014).

Além do mais, o eixo de rotação da Terra em volta de si mesmo não coincide com o eixo da órbita elíptica plana, possuindo uma defasagem de $23^\circ 27'$. Dessa forma, por um período do ano, o planeta expõe mais o hemisfério sul à luz solar e por outro período, o hemisfério norte possui maior exposição (Soares, 2014). Assim, o verão ocorre quando, devido à posição da Terra em relação ao Sol, é maior o aquecimento dessa parte do globo terrestre (Figueira, 2020).

Ademais, a posição do Sol ao longo de um dia, também interfere na dinâmica solar. A cada hora do dia, os raios solares atingem uma dada superfície sob diferentes ângulos. Devido ao movimento aparente do sol, o pico de geração ocorre próximo as 12 horas e reduz gradativamente a geração no período da tarde (Duffie; Beckman, 2013).

Consequente as diferentes latitudes e a variação de declinação solar anual, os horários de nascer e por do Sol vão sendo alterados durante o ano. Isso produz dias mais curtos no inverno e mais longos no verão, resultado da insolação por mais horas no dia (Soares, 2014).

No caso do hemisfério sul, no mês de janeiro a Terra está mais próxima do Sol, enquanto em julho está cerca de 3,3% mais longe. Uma vez que a intensidade da radiação solar incidente sobre o topo da atmosfera varia inversamente, a Terra recebe cerca de 7% mais radiação em janeiro do que em julho em função da declinação solar (Rmasey; Threlkeld; Kuehn, 1998).

Ademais, ao avaliar os fatores que alteram a dinâmica e estão relacionados a condições climáticas, existe o fenômeno de sombreamento por conta das nuvens. Os sombreamentos sobre as células, módulos, arranjos ou usinas inteiras são basicamente o mesmo fenômeno do ponto de vista do sistema elétrico da usina, onde a irradiância é reduzida de forma desigual sobre os dispositivos de geração (Villalva, 2010).

O efeito da sombra pode ser total, anulando a irradiância, ou parcial, reduzindo-a a valores abaixo da irradiância plena em um determinado instante. Do ponto de vista da potência gerada, efeitos de sombreamentos também são iguais a defeitos de conexão, sujeira e envelhecimento dos módulos (Villalva, 2010). Assim, também, há o efeito do vento, no qual o gradiente de temperaturas produzido afeta o perfil de corrente total gerada pelo módulo (Soares, 2014).

2.5.2 Dinâmica Solar com Múltiplas Mudanças

Na dinâmica solar com múltiplas mudanças, considerada rápida, o sistema FV não é projetado para maximizar a geração, mas sim para aproveitar uma área já dedicada a outra função, para incluir a geração. A integração da energia fotovoltaica com as diversas áreas das cidades a expõe cada vez mais à dinâmica solar com múltiplas mudanças (Figueira, 2020).

Sistemas FVs sujeitos a dinâmica solar com múltiplas mudanças podem ser submetidos às mais diversas formas de sombreamento, uma vez que a integração de sistemas FVs pode ser realizada em passarelas, ciclovias, rodovias, dentre outros. Nessas situações listadas, a velocidade de sombreamento pode variar de 5 km/h (velocidade média de uma pessoa caminhando) até 120 km/h (velocidade máxima permitida nas rodovias brasileiras) (Figueira, 2020).

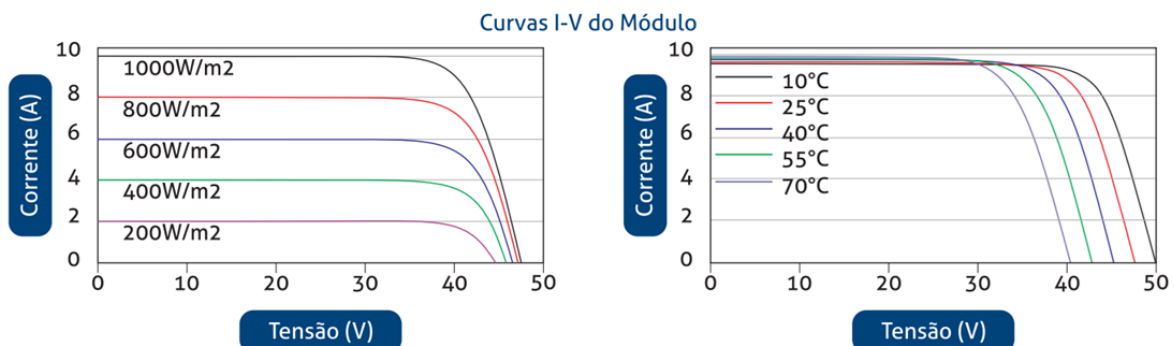
Conquanto, instalações de sistemas fotovoltaicos em áreas urbanas frequentemente estão sujeitas a sombras projetadas por elementos dos arredores como: prédios, árvores, postes, torres, ou até mesmo o relevo da região. Em alguns casos, as sombras podem ser criadas por elementos da arquitetura do próprio estabelecimento, ou por módulos adjacentes (Melo, 2012).

Nesse cenário, o sombreamento é inevitável, podendo então dispor as placas de maneira a escolher como essa sombra afeta a dinâmica. Por um lado, existe a opção de arranjar as linhas das células em paralelo com o movimento da sombra, apresentando um sombreamento uniforme em todas as séries de células, reduzindo de maneira uniforme a curva I-V do módulo. Por outro lado, arranjá-las com o movimento da sombra transversal às linhas, resulta em uma curva FV com múltiplos pontos de máxima potência (Figueira, 2020).

O sombreamento destaca-se como uma das principais limitações à eficiência dos sistemas fotovoltaicos. Como o desempenho depende diretamente da radiação incidente, ele é ideal quando a iluminação é homogênea sobre toda a superfície do módulo. Sombreamentos parciais, causados por elementos como antenas ou árvores, podem reduzir significativamente o rendimento do sistema, pois a célula menos iluminada limita a corrente e, conseqüentemente, a potência das células conectadas em série (Santos; Pereira, 2013).

Para representar a curva I-V quando exposta a vários níveis de radiação, foi escolhido o módulo fotovoltaico de 350 W, monocristalino, da fabricante EMPALUX, conforme apresentado na Figura 13. A seleção do fabricante foi aleatória, com foco apenas em selecionar um modelo de módulo adequado para projetos solares residenciais e comerciais de médio porte.

Figura 13 – Representação de curva I-V do módulo MF00350.



Fonte: EMPALUX (2025).

A Figura 13 ilustra as curvas I-V de um módulo fotovoltaico frente às variações da irradiância e da temperatura. Observa-se que a corrente aumenta com a irradiância, enquanto a elevação da temperatura reduz a tensão de saída, comprometendo o ponto de máxima potência.

Essas variações justificam a coleta das variáveis mencionadas por meio da estação de monitoramento, que utiliza duas tecnologias de piranômetros e um sensor de temperatura. A combinação desses sensores permite caracterizar a dinâmica solar local, fornecendo dados experimentais para prever o comportamento dos sistemas fotovoltaicos em diferentes condições.

Portanto, o desempenho dos sistemas fotovoltaicos está fortemente ligado à variação da irradiância solar e aos efeitos do sombreamento, influenciando na produção de energia e no funcionamento dos equipamentos. Torna-se evidente, assim, a necessidade de obter dados reais e confiáveis sobre a radiação solar no local, e o próximo capítulo apresenta o desenvolvimento do equipamento para coleta dessas informações, etapa fundamental para as análises deste trabalho.

3 DESENVOLVIMENTO

Este estudo contribui com uma iniciativa de pesquisa apoiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). A iniciativa em questão, tem como objetivo a instalação de equipamentos para o registro de dados solarimétricos precisos em três localidades do Brasil com características climáticas bastante distintas: Recife – Pernambuco, Joinville – Santa Catarina e Santa Maria – Rio Grande do Sul (Lima, 2024a).

Os dados são coletados, inicialmente, considerando a instalação de painéis na horizontal, segundo a latitude local. As equipes de pesquisa do projeto, o GEPAE – UFPE, a UDESC – SC e o GEPOC – SM são responsáveis por instalar, calibrar e testar estruturas padronizadas para a aquisição e registro dos dados de modo a produzir pelo menos um ano de dados válidos (Lima, 2024a).

Dito isso, ao analisar qualitativa e quantitativamente a variação da irradiância solar ao longo dos dias, na cidade de Joinville, busca-se entender a dinâmica solar e verificar se a taxa de aquisição estabelecida para os sensores de irradiância escolhidos, acompanham essa dinâmica.

Desse modo, a investigação se divide em etapas: construção do dispositivo para aquisição dos dados, teste do sistema completo em bancada, instalação do sistema para monitoramento em campo, assim como a subsequente coleta de dados, e por fim, a construção e análise da base de dados. Destaca-se que a construção e calibração do dispositivo para coleta dos dados, Figura 14, são realizadas pelo grupo de pesquisa GEPOC.

Figura 14 – Dispositivo para aquisição de dados
a) vista superior (caixa aberta) e b) vista traseira (caixa fechada).



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pela Autora (2025).

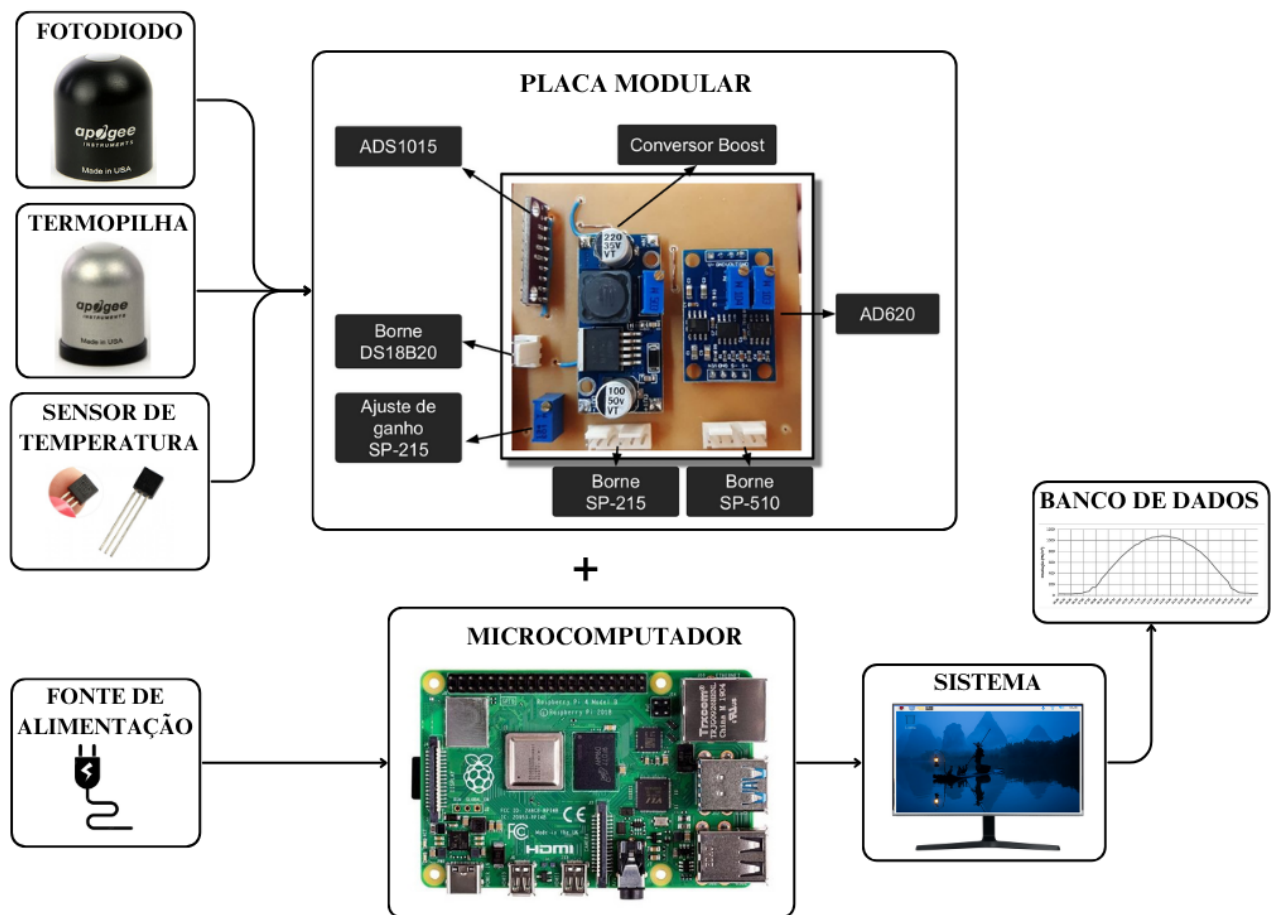
O botão vermelho presente no dispositivo tem a intenção de registrar eventos de manutenção, como a limpeza dos piranômetros. Idealiza-se que ao pressioná-lo, gere-se um marcador

para indicar que uma intervenção física é realizada no sistema. A partir disso, podem ser correlacionadas possíveis variações nos dados de irradiância com o momento da manutenção, por exemplo. No entanto, essa funcionalidade ainda não está implementada.

O sistema é composto por dois sensores de irradiância solar: um fotodiodo (SP-215) e um termoeletrico (SP-510), além de um sensor de temperatura (DS18B20). Os sinais analógicos provenientes dos piranômetros são conectados à placa modular. Por sua vez, essa é composta por um módulo amplificador de instrumentação (AD620) para ajuste de ganho, um conversor *boost* para elevação da tensão de alimentação e um conversor analógico-digital ADS1015 para digitalizar os sinais vindos dos sensores de irradiância.

A placa envia os dados para um microcomputador (Raspberry Pi 4), que realiza o controle do sistema, armazena os dados e permite o monitoramento por meio de uma interface de sistema visual. O conjunto é alimentado por uma fonte externa, garantindo o funcionamento do sistema de aquisição de dados de irradiância e temperatura. O diagrama que ilustra o sistema completo está apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Diagrama do sistema de aquisição completo.



Fonte: Elaborada pela autora (2024).

No decorrer deste capítulo, desvelam-se as seções que orientam a compreensão das características construtivas do dispositivo projetado para realizar a coleta, as configurações realizadas no microcomputador para o funcionamento eficiente do equipamento e o processamento do sistema de aquisição de dados.

3.1 ARQUITETURA DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO

O *hardware* do equipamento de aquisição de dados de irradiância solar, conta com uma placa modular, a qual é conectada a dois sensores de irradiância e um sensor de temperatura, além de um microcomputador para o processamento das informações coletadas pelos sensores.

3.1.1 Sensores de Irradiância Solar

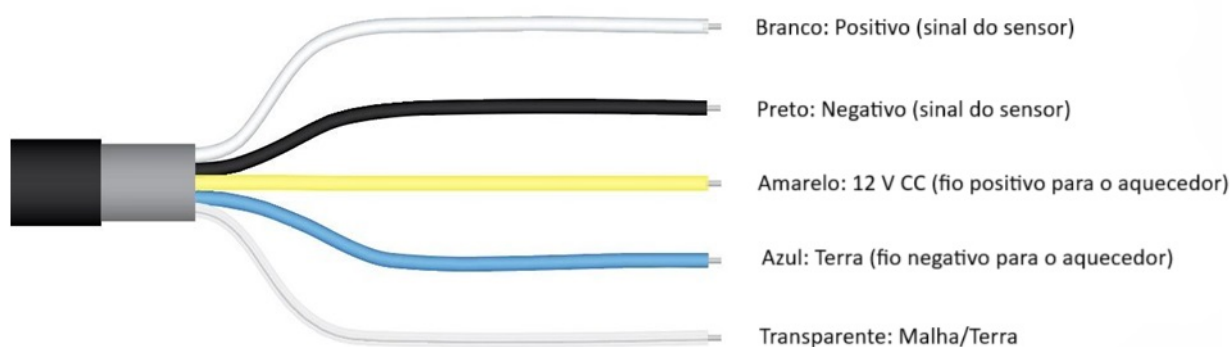
Para a construção do dispositivo de medição de irradiância solar, opta-se pela utilização de dois modelos de piranômetros: um termoeletrico e um fotoeletrico, que operam simultaneamente. Estes modelos estão demonstrados nas Figuras 8 e 9, respectivamente.

O sistema, portanto, é dotado de um sensor de irradiância a termopilha SP-510, com saída analógica variante entre 0 V e 90 mV, tempo de resposta de 0,5 segundos e intervalo espectral de 385 nm a 2105 nm.

As especificações do modelo estão em conformidade com as classificações de qualidade moderada e boa da Organização Meteorológica Mundial (OMM), bem como à classificação Classe C da norma da Organização Internacional de Padronização (ISO 9060:2018) (Apogee, 2022).

O piranômetro termoeletrico é alimentado por uma fonte de 12 V e seu respectivo diagrama de conexões é apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Diagrama de conexões - piranômetro SP-510.



Fonte: Adaptado de Apogee (2022).

O outro sensor de irradiância que compõe o sistema é o fotodiodo de silício SP-215 com saída analógica variante entre 0 V e 5 V, tempo de resposta menor que 1 milissegundo e intervalo espectral de 360 nm a 1120 nm.

As características do piranômetro de silício são compatíveis às classificações de qualidade moderada e boa da Organização Meteorológica Mundial (OMM) e a Classe C da Organização Internacional de Padronização (ISO 9060:2018). No entanto, a sensibilidade espectral limitada desses não atende à exigência necessária para a certificação da OMM (Apogee, 2021).

O piranômetro fotoelétrico também é alimentado com uma fonte de 12 V e seu respectivo diagrama de conexões está apresentado na Figura 17.

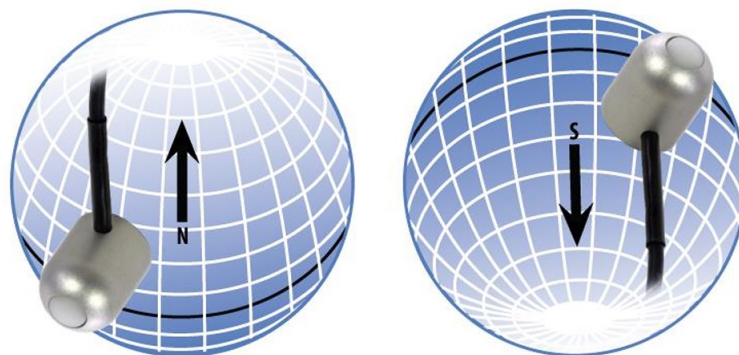
Figura 17 – Diagrama de conexões - piranômetro SP-215.



Fonte: Adaptado de Apogee (2021).

Um aspecto a ser levado em conta em ambos os piranômetros é a variação da constante de calibração em função do ângulo de inclinação, causada pelos efeitos convectivos. Ademais, para mitigar o erro de azimuth, tipicamente inferior 1%, que ocorre quando o plano de rotação azimuthal não está perfeitamente alinhado à superfície terrestre, o piranômetro deve ser instalado com o cabo apontado para o sul verdadeiro no hemisfério sul, Figura 18 (Apogee, 2021).

Figura 18 – Posicionamento correto dos piranômetros.



Fonte: Apogee (2021).

Comparando o sensor de silício com o sensor termoeletrônico observa-se que o tempo de resposta do sensor de silício é muito menor.

Ademais, a principal diferença, a qual culmina na escolha da utilização dos dois sensores de irradiância, se deve a faixa espectral coberta por cada um deles. Conforme constata-se na Figura 10, a característica espectral do sensor de irradiância fotoelétrico é semelhante à dos painéis fotovoltaicos, dado que ambos possuem o silício como principal material de composição.

Por outro lado, o sensor de irradiância termoeletrônico, amplamente utilizado em estações meteorológicas, apresenta uma faixa espectral mais ampla, permitindo captar maior quantidade de energia para a mesma situação, quando comparado ao fotoelétrico.

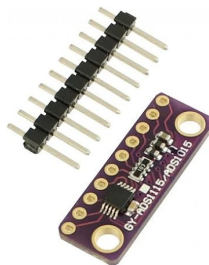
Desse modo, ao optar pelo uso combinado de ambos os sensores de irradiância, busca-se compreender as diferenças na medição de irradiância e na captação de energia que cada um apresenta em condições de campo. Isso porque a divergência espectral influencia diretamente os valores de irradiância (W/m^2) registrados. Assim, os piranômetros apresentam ganhos distintos, visto que não captam o mesmo intervalo do espectro e possuem amplitudes distintas de tensão de saída.

3.1.2 Conversor Analógico-Digital (ADC)

Para converter o sinal de saída analógico dos sensores de irradiância solar em sinais digitais, adiciona-se um conversor analógico-digital ADS1015, Figura 19.

O conversor ADC escolhido, fabricado pela Texas Instruments, tem resolução de 12 bits, alta taxa de amostragem (até 3300 amostras por segundo), baixo consumo de energia e alta precisão. Além disso, sua interface de comunicação é I²C, facilitando a integração com microcomputadores.

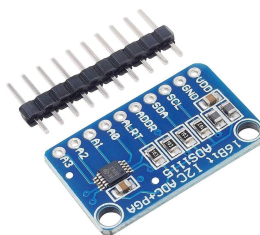
Figura 19 – Conversor ADC - ADS1015.



Fonte: Usina Info (2024).

Ressalta-se que foi considerado o uso do conversor ADS1115, Figura 20, pertencente à mesma família do ADS1015, que apresenta características bastante semelhantes e tem uma resolução superior, de 16 bits. Contudo, sua taxa de amostragem, limitada a 860 amostras por segundo, resulta em uma menor taxa de aquisição, o que leva à sua exclusão como alternativa.

Figura 20 – Conversor ADC - ADS1115.

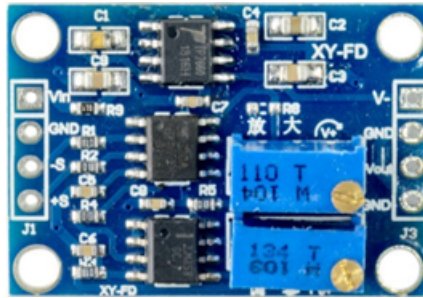


Fonte: MSS Eletrônica (2024).

3.1.3 Amplificador de Instrumentação

Uma vez realizada a escolha dos sensores, observa-se a necessidade de uma placa de condicionamento de sinais AD620, Figura 21. Essa decisão é adotada buscando amplificar o sinal do piranômetro termoelétrico, que gera uma saída em tensão na faixa de 0 V a 90 mV, proporcional à irradiância.

Figura 21 – Módulo amplificador de instrumentação com AD620.



Fonte: Naylamp Mechatronics (2025).

Conforme é observado, o módulo inclui 2 trimpots para ajustes: sendo um deles de 100 k Ω (104) para amplificar o sinal de entrada (ganho) e o outro exclusivamente para ajustar o ponto zero (offset) (UsinaInfo, 2025).

O amplificador de instrumentação AD620A, conta com um CI conversor de tensão 7660 e um amplificador operacional LM358 de ganho unitário que atua como buffer, além de diversos resistores e capacitores (ProtoSupplies, 2025).

O módulo pode ser alimentado com 3,5 V a 10 V pelo pino VIN e GND. A tensão VIN passa por um resistor e alimenta o pino +Vs do AD620 (V+). Assim, o CI 7660 converte essa tensão em uma negativa (V-) para alimentar o pino -Vs do AD620 e o LM358. A saída do AD620, passa pelo buffer cuja saída está disponível no pino VOUT. (ProtoSupplies, 2025).

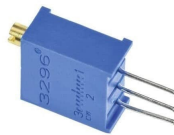
O módulo amplificador de instrumentação AD620 aceita um sinal de entrada CA ou CC de 100 μ V a 300 mV e é caracterizado por seu baixo ruído, sua precisão e a capacidade de ampliação do sinal de 1,5 a 1.000 vezes. É amplamente aplicado na área médica para amplificar sinais elétricos de baixa tensão, como os gerados pelo coração humano, que exigem um ganho significativo para seu monitoramento (UsinaInfo, 2025).

A situação do presente projeto é bastante similar, pois também necessita um amplificador de instrumentação com um ganho suficientemente elevado para garantir que o sinal seja lido adequadamente pelo conversor analógico-digital (ADC) de 3 V. Dessa forma, o papel do módulo é amplificar o intervalo de sinal de 0 a 90 mV para uma faixa de 0 V a 3 V utilizando os 12 bits disponíveis no conversor AD, consequentemente, tornando-o adequado para a aquisição de dados do sistema.

3.1.4 Divisor de Tensão

A inserção do trimpot multivoltas 3296W 10K (103), Figura 22, é motivada pela necessidade de um ajuste de ganho no sensor de irradiância SP-215. O potenciômetro possui a capacidade de variar a proporção entre as resistências de seu terminal, permitindo, assim, a geração de uma tensão de saída proporcional à tensão de entrada (Bourns, 2024).

Figura 22 – Trimpot multivoltas - 3296W.



Fonte: MakerHero (2024).

No presente projeto, o sensor fotoelétrico está condicionado a uma tensão de saída que varia entre 0 V e 5 V, entretanto é necessário reduzir essa tensão para um máximo de 3 V.

Nesse viés, a adição de um regulador de tensão resultaria em um aumento nos custos e na complexidade do sistema. Para evitar essa situação, opta-se por utilizar o divisor de tensão, que ajusta o ganho conforme necessário para alcançar a tensão desejada.

Quanto ao uso de um buffer entre o divisor e o ADC, tendo em vista que o sinal proveniente do piranômetro SP-215 passa pelo trimpot e é conectado ao canal A1 do ADS1015, considera-se desnecessário. Como o ADS1015 possui impedância de entrada alta, variando conforme a faixa de entrada selecionada (no caso de 3 V, entre 15 M Ω e 4,9 M Ω), a carga imposta pelo ADC sobre o divisor de tensão é desprezível. Isso garante que a tensão ajustada pelo trimpot seja lida corretamente pelo ADC, sem necessidade de condicionamento adicional.

3.1.5 Sensor de Temperatura

O sistema conta com a presença de um sensor de temperatura, além dos sensores de irradiância apresentados. A presença deste sensor adicional permite uma análise mais precisa da disponibilidade real de energia, uma vez que as curvas I-V dependem desta variável, além de possibilitar a compensação de variações térmicas nos sensores de irradiância, se necessário.

Essa informação é fundamental em estudos de dinâmica solar e também em aplicações como o controle MPPT, onde pequenas variações de irradiância e temperatura influenciam diretamente o ponto de operação do sistema fotovoltaico, como visto na Figura 13.

Portanto, para a leitura da temperatura, estudam-se diversas opções, as quais estão brevemente apresentadas e discutidas a seguir.

O sensor de temperatura termopar tipo K, Figura 23, composto pelas ligas alumel e cromel, com intervalo de medição entre -200 °C e 1260 °C, bem como os sensores NTC e PTC, Figura 24, os quais apresentam variação de resistência com a temperatura e um intervalo de

medição de $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, são prontamente descartados. Essa decisão se dá por ambos serem sensores analógicos e necessitarem da adição de um conversor analógico-digital (ADC) para interpretar o sinal em sistemas digitais, como os microcontroladores utilizados no projeto.

Embora o sistema já disponha de um conversor analógico-digital (ADC) para a leitura dos sensores de irradiância, a utilização adicional de sensores analógicos de temperatura implicaria no compartilhamento desse recurso, reduzindo a disponibilidade de canais e demandando o uso de multiplexação. Essa solução poderia comprometer a taxa de amostragem e a sincronização das leituras dos sensores, fatores fundamentais para este estudo.

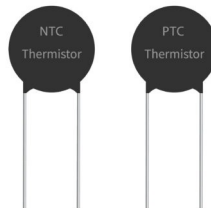
Demais do anteposto, a precisão do sensor analógico torna-se dependente da qualidade do ADC, do seu cabeamento e são mais suscetíveis a ruídos, não demonstrando ser uma boa opção para o presente trabalho.

Figura 23 – Sensor de temperatura - termopar tipo K.



Fonte: Usina Info (2024).

Figura 24 – Sensores de temperatura - NTC e PTC.



Fonte: Wattco (2024).

Por conseguinte, estudando opções de sensores de temperatura digitais, a primeira opção é o medidor de umidade e temperatura HDC1080, Figura 25, com intervalo de medida entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ e comunicação I^2C .

Por outro lado, a segunda opção é o medidor de temperatura DS18B20, Figura 26, com intervalo de medida entre $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ e comunicação One-Wire.

Sob essa perspectiva, a escolha recai sobre o sensor que melhor atende às necessidades do projeto, limitado à simples leitura de temperatura. Sendo assim, ao comparar as tecnologias de comunicação, a One-Wire se sobressai devido ao menor custo, à baixa complexidade, à facilidade de instalação e à maior eficiência energética. Por essas razões, escolhe-se o sensor de temperatura DS18B20.

3.1.6 Microprocessador

Para a escolha do processador de dados do projeto, é fundamental que o microcontrolador ou microprocessador tenha, além de um bom processamento, conectividade com Ethernet e uma memória suficiente para armazenar e gerar o banco de dados.

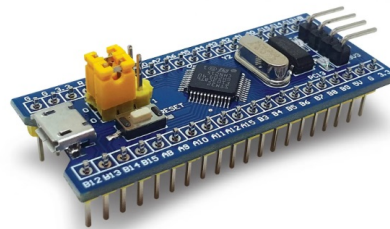
Com base nesse cenário, são avaliadas diversas soluções. O microcontrolador ESP32, Figura 28, o STM32, Figura 29, e o Arduino, Figura 30, demandam o uso de uma placa adicional para conexão Ethernet, o que torna o sistema mais complexo, além de que é necessária a inclusão de um cartão de memória externo. Por essas razões, as opções anteriores são desconsideradas.

Figura 28 – Microcontrolador - ESP32.



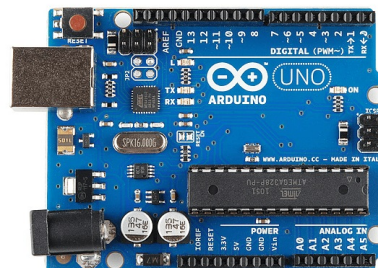
Fonte: Vida de silício (2024).

Figura 29 – Microcontrolador - STM32.



Fonte: WJ Componentes (2024).

Figura 30 – Microcontrolador - Arduino.



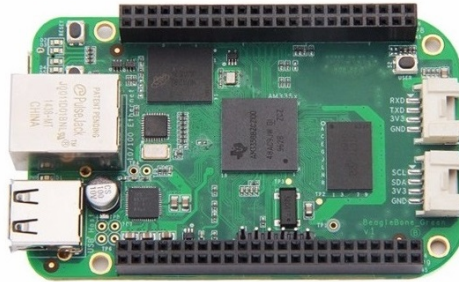
Fonte: Orient Display (2024).

Por outro lado, um computador de mesa não faz sentido, visto que seu processamento é muito maior que o necessário neste caso. Ademais, há um excesso de consumo e também custo, para a realização de uma tarefa "simples": a leitura dos sensores e o envio para a base de dados.

Outro fator limitante, para o uso de um computador de mesa neste projeto, é o seu tamanho. Como o processador precisa ser armazenado em uma caixa e mantido próximo ao ambiente onde as medições são realizadas, essa alternativa é excluída.

À luz disso, foca-se o estudo nos microcomputadores, de tal maneira, duas opções são cogitadas: Beaglebone Green, Figura 31, e Raspberry PI 4, Figura 32.

Figura 31 – Microcomputador - Beaglebone Green.



Fonte: Robu.in (2024).

Figura 32 – Microcomputador - Raspberry PI 4.



Fonte: Mouser (2024).

O Beaglebone Green é equipado com processador da família AM335x, núcleo de processador de 32 bits (ARM Cortex-A8) de 1 GHz e memória de 512 MB de RAM, além de oferecer suporte a diversas interfaces de comunicação, como Ethernet, I²C, One-Wire, entre outras.

Por outro lado, o Raspberry Pi 4 possui um processador com quatro núcleos de processamento (Quad-core) Cortex-A72 (ARM v8) de 64 bits, com até 4 GB de memória RAM. Assim como o Beaglebone Green, ele também suporta comunicação via Ethernet, I²C e One-Wire, porém, destaca-se por incluir Bluetooth e Wi-Fi integrados, que proporcionam conectividade sem fio e possibilitam interações com redes mais avançadas (Raspberry, 2024).

Com base nas configurações mencionadas e considerando que o projeto visa garantir um bom desempenho no processamento e armazenamento de dados, o Raspberry Pi 4 mostra-se a opção mais adequada. Apesar de ser um bom microcomputador, o BeagleBone é bastante limitado quando comparado ao Raspberry, que tem 4 GB de RAM e um processador mais rápido.

Ainda, outro fator considerado na escolha é o custo e a simplicidade do projeto. Como o presente trabalho não exige características de automação industrial, o Raspberry se apresenta

como uma opção mais adequada e acessível, quando comparado ao BeagleBone, especialmente para soluções de menor complexidade.

Destarte, o microcomputador escolhido dispõe de 40 pinos de GPIO (com suporte para PWM, SPI e I²C), duas saídas de vídeo HDMI (suportando resoluções de até 4K), duas portas USB 3.0, duas portas USB 2.0 e um conector USB-C, para sua alimentação que requer uma fonte de 5 V/3 A.

Por fim, uma de suas maiores vantagens é a facilidade de integração com outras plataformas, como o Google Drive, graças à sua programação baseada em Python, que amplia a compatibilidade e a versatilidade do dispositivo.

3.1.7 Alimentação do Sistema

Para atender a todos os requisitos de cargas necessárias para o projeto, escolhe-se o uso de uma fonte de 5 V. Entretanto, os sensores de irradiância são alimentados com 12 V, desse modo, para adequá-los a fonte escolhida, sem a necessidade de adicionar mais uma fonte, opta-se por um conversor CC/CC *boost* XL6009E1, Figura 33 (XLSEMI, 2024).

O conversor elevador escolhido, é desenvolvido com base no circuito integrado XL6009, que por sua vez suporta tensões de entrada de 5 V à 32 V e tem um rendimento típico de conversão de 92%, sendo capaz de chavear até 4 A de corrente.

Figura 33 – Conversor *Boost* - XL6009E1.



Fonte: Curto Circuito (2024).

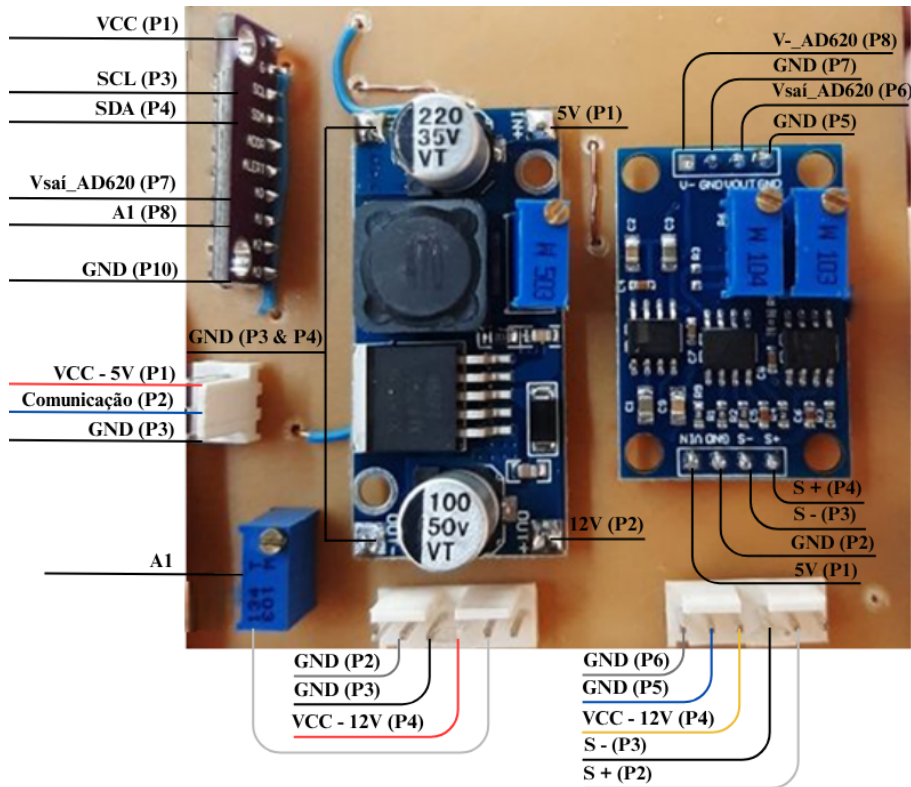
O conversor *boost* tem como seu princípio de funcionamento: elevar a tensão de entrada, a fim de obter uma tensão de saída maior que a de entrada. Portanto, o conversor é agregado unicamente para amplificar a tensão de entrada e alimentar os sensores, evitando desse modo elevar a complexidade do projeto inserindo mais de uma fonte para alimentar o projeto.

Ainda, para o bom e estável funcionamento do dispositivo, faz-se necessário o uso de um cabo USB-C 4 A, uma vez que a corrente consumida pelo Raspberry Pi 4 varia de acordo com o uso, com os periféricos conectados e com a carga de processamento, podendo chegar a 3 A.

3.2 CONEXÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO

A planta, Figura 34, tem comportamento modular e não está conectada a internet, sendo responsável pela parte física da aplicação, recebendo e enviando dados para o microprocessador.

Figura 34 – Identificação das conexões entre os componentes da placa modular.



Fonte: Elaborado pela Autora (2025).

3.3 CONFIGURAÇÃO DO AMBIENTE DO MICROCOMPUTADOR

Primeiramente, para a utilização do Raspberry Pi 4, é necessária a instalação prévia do sistema operacional, conforme apresentado no fluxograma da Figura 35.

Após a instalação, para inicializar o Raspberry Pi 4, este conecta-se diretamente à fonte de alimentação por meio do conector USB-C. Posteriormente, um LED vermelho se acende, seguido de um verde, indicando que o equipamento está conectado e energizado.

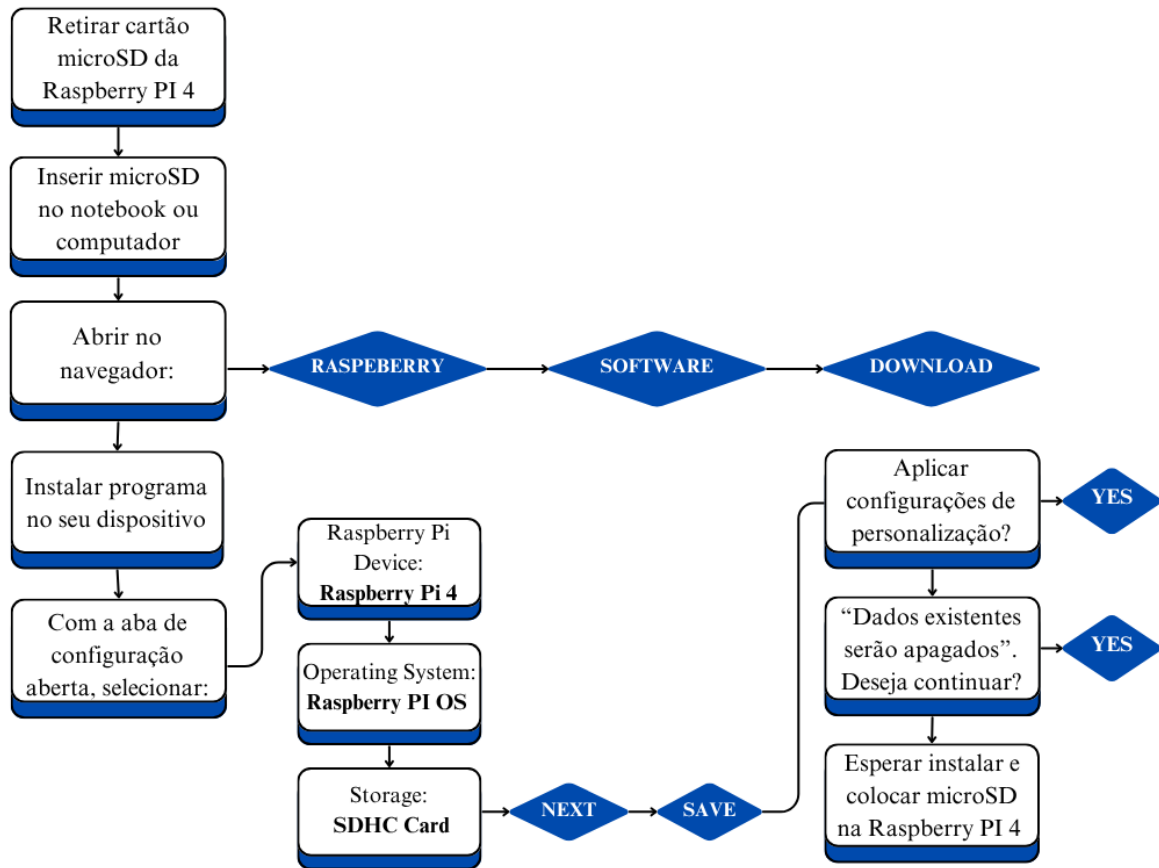
Assim, para a visualização da interface do sistema, conecta-se o Raspberry Pi a um monitor através do conector micro HDMI. Ademais, visando personalizar o microcomputador, faz necessário o uso de um teclado e um *mouse*, os quais são conectados ao Raspberry Pi 4, por meio dos canais USB-B disponíveis, Figura 36.

Com os periféricos conectados, a inicialização é sinalizada pela exibição da tela com framboesas, logo do Raspberry Pi, indicando que o sistema está carregando. Após alguns segundos, a área de trabalho do Raspberry Pi OS é exibida, conforme ilustrado na Figura 37.

Desse modo, na primeira execução do sistema, são definidos o país, o idioma e o fuso horário. Na sequência, é estabelecida a nova senha de acesso ao equipamento e realiza-se a conexão à rede Wi-Fi que é utilizada pelo dispositivo.

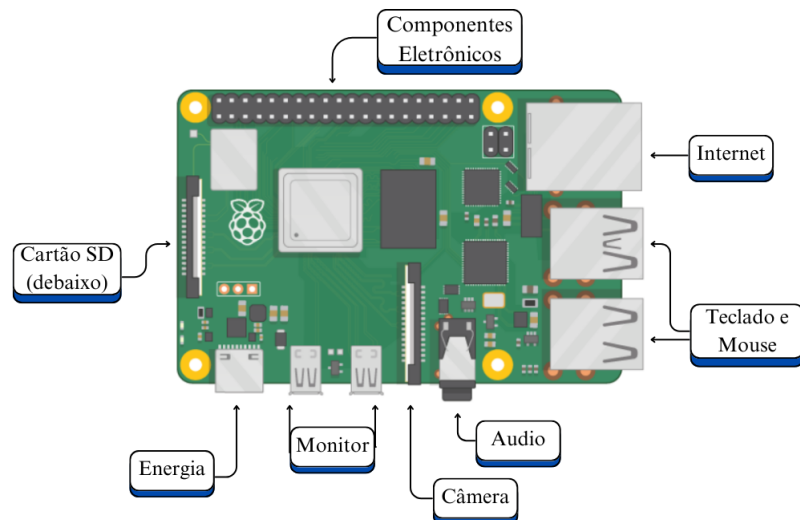
Em seguida, procede-se com a atualização do sistema operacional. Para isso, abre-se o terminal e são enviados os comandos *sudo apt-get update* e, logo após, *sudo apt-get upgrade*.

Figura 35 – Fluxograma instalação sistema operacional.



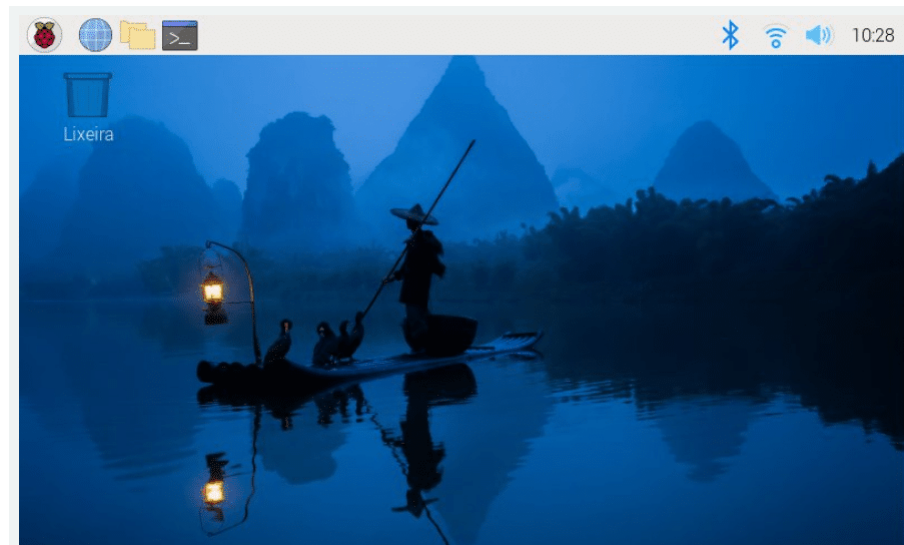
Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Figura 36 – Placa Raspberry.



Fonte: Elaborada pela Autora (2025).

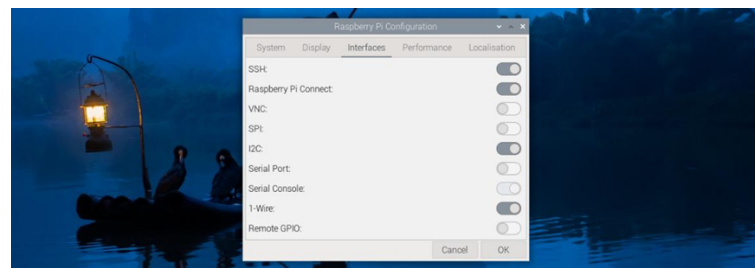
Figura 37 – Área de trabalho Raspberry Pi OS.



Fonte: Maker Hero (2024).

Ao término das atualizações, o Raspberry Pi é reiniciado para aplicação das mudanças. Assim, com as configurações iniciais concluídas, habilitam-se os barramentos de comunicação por meio do menu de configurações de interface do sistema apresentado na Figura 38.

Figura 38 – Habilitação dos barramentos de comunicação.

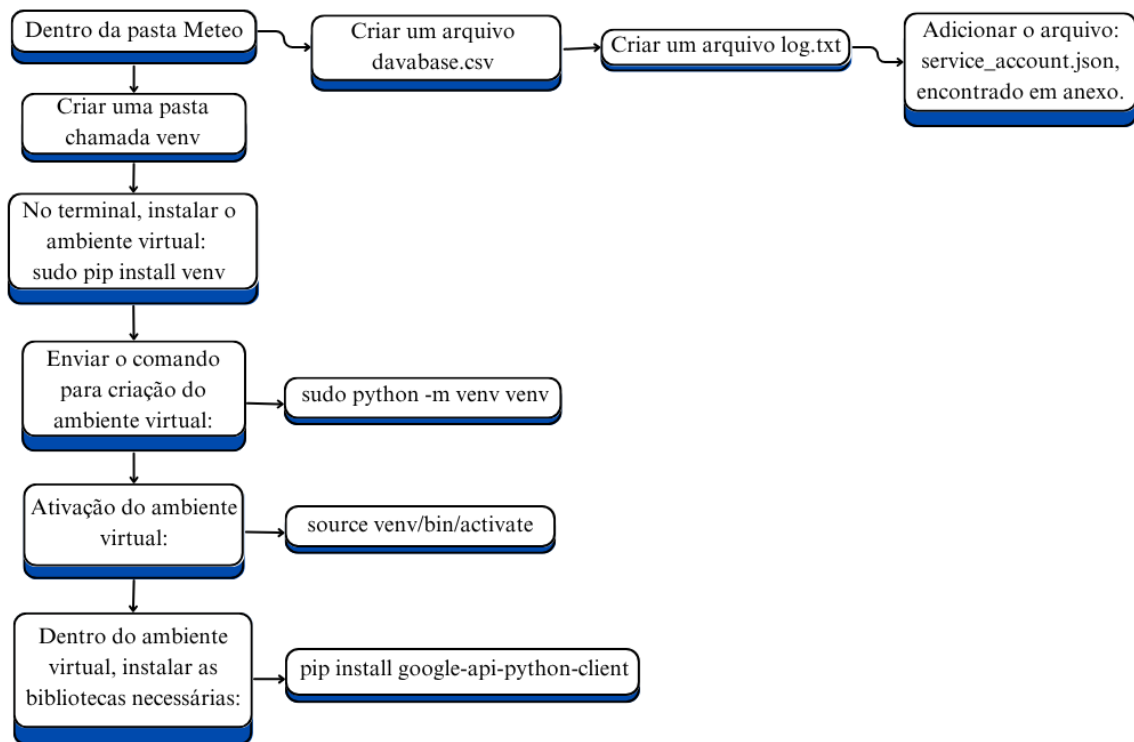


Fonte: Elaborada pela Autora (2024).

Sequencialmente, acessa-se o gerenciador de arquivos e, dentro da pasta *Documents* é criada uma pasta chamada *Meteo*, destinada a armazenar todos os arquivos do projeto da estação. Conforme explicado na Figura 39, dentro da pasta *Meteo*, cria-se um diretório chamado *venv*, onde é instalado um ambiente virtual, visando evitar conflitos com o sistema operacional e isolando as dependências do projeto.

Evidencia-se que toda a configuração do microcomputador refere-se a Raspberry Pi 4, existindo algumas variações nos procedimentos dependendo da versão do modelo Raspberry.

Figura 39 – Configurações específicas do projeto.



Fonte: Elaborado pela Autora (2025).

3.4 PROGRAMAÇÃO DO MICROCOMPUTADOR PARA AQUISIÇÃO DOS DADOS

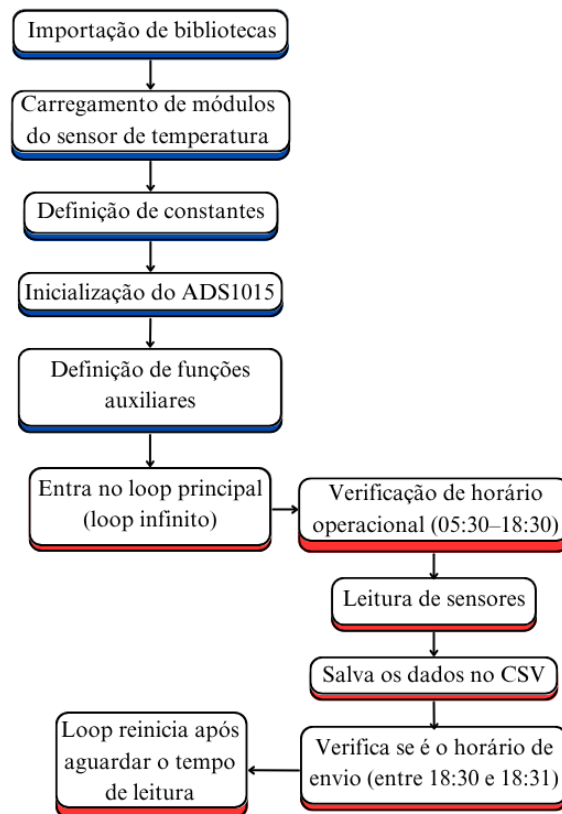
Com a finalidade do bom funcionamento da estação de coleta de irradiância solar, o Raspberry Pi é programado para receber e processar os dados adquiridos. Como o sistema utiliza um sistema Linux embarcado e vem com o Python pré-instalado, a programação adotada é bastante intuitiva.

Dentro da pasta Meteo, são adicionados dois arquivos complementares ao arquivo principal: um arquivo database.csv em branco, destinado ao armazenamento dos dados coletados, e um arquivo log.txt, responsável por registrar o dia que ocorre a última coleta. O código principal, nomeado main.py, também é inserido nesta pasta, contendo toda a lógica de controle e operação do sistema de aquisição de dados.

O código principal (main) responsável pelo controle do dispositivo, está no Apêndice A. Porém para um melhor entendimento da lógica implementada, apresenta-se o fluxograma da Figura 40.

Também, durante dois momentos do projeto são implementadas integrações distintas com serviços do Google.

Figura 40 – Lógica do dispositivo.



Fonte: Elaborado pela Autora (2025).

1. Envio automático de dados para o Google Drive

- Utiliza-se a biblioteca `google-api-python-client`;
- Implementado mediante autenticação com *service account*;
- Configuração via API do Google Drive.

2. Notificação diária por *e-mail*

- Implementado via protocolo SMTP (Simple Mail Transfer Protocol);
- Utilizando uma conta do Gmail como remetente;
- Mensagens automáticas ao final de cada ciclo de coleta.

Para permitir o envio automático dos arquivos de dados ao Google Drive, é utilizada a API da plataforma, com autenticação via conta de serviço configurada no Google Cloud Platform. Criando-se um projeto no console, ativa-se a API do Drive e gera-se uma chave de autenticação no formato JSON, renomeada como `service_account.json` e inserida na pasta do código principal.

Para conceder acesso, adiciona-se o *e-mail* da conta de serviço (disponível no campo `client_e-mail` do JSON) como editor da pasta de destino no Drive. O ID dessa pasta, extraído da URL, foi incluído no *script* na variável `PARENT_FOLDER_ID`. O envio dos arquivos é

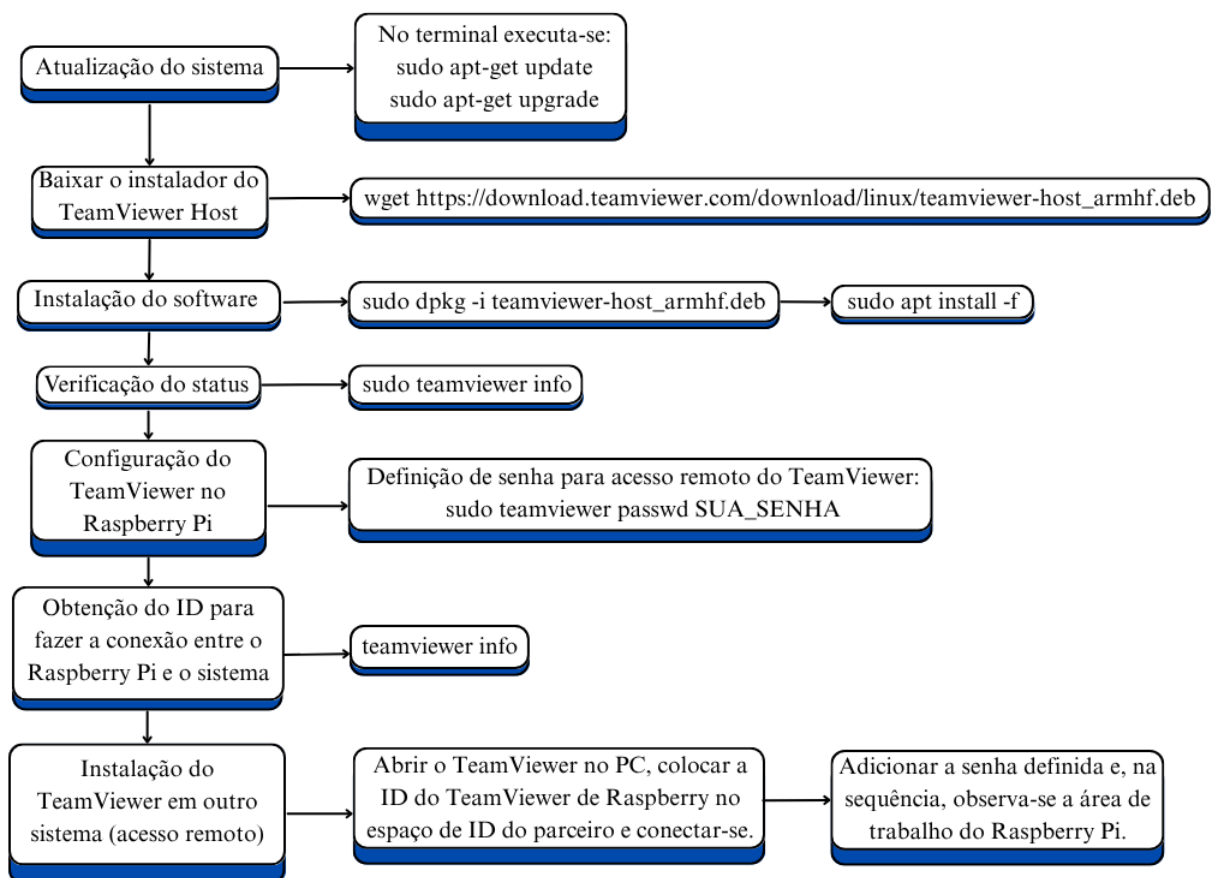
implementado em Python com a biblioteca `google-api-python-client`, permitindo a autenticação e transferência automatizada dos dados coletados, de forma segura e sem necessidade de intervenção manual.

Para o segundo tópico, faz-se necessário habilitar a verificação em duas etapas na conta escolhida para enviar o e-mail e gerar uma senha de aplicativo específica, a qual é utilizada para autenticação no *script*. O e-mail dispara diariamente entre 18:30 e 18:31, caso o arquivo correspondente ainda não tenha sido registrado no log (`log.txt`), garantindo que o aviso seja enviado apenas uma vez por dia. Essa etapa facilita o acompanhamento remoto do sistema e assegura que a coleta e o armazenamento dos dados estão sendo realizados corretamente.

Ademais, é importante destacar que existem algumas configurações que são específicas e escolhas da projetista, entre elas o período de coleta, das 5:30 às 18:30, estabelecido pelo horário que o sol se põe e amanhece no mês de maio, na cidade de Joinville.

Uma vez criado o *script*, conforme a lógica apresentada, faz-se necessária a instalação do TeamViewer para que o dispositivo possa ser configurado remotamente. Portanto, com o microcomputador conectado a internet, com monitor, teclado e *mouse* conectados, são seguidas as indicações do fluxograma da Figura 41.

Figura 41 – Instalação e configuração para acesso remoto.



Fonte: Elaborado pela Autora (2025) adaptado de Loja Mundi.

3.5 INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O dispositivo de coleta é instalado na Universidade do Estado de Santa Catarina, no Centro de Ciências Tecnológicas, localizado na cidade de Joinville, cujas coordenadas são: 26° 18' 14" S, 48° 50' 45" O.

O local exato é o telhado do bloco J, Figura 42, escolhido devido à sua posição privilegiada, que não sofre sombreamento em nenhum momento do dia, além de já contar com uma rede Wi-fi previamente instalada, um item fundamental para o bom funcionamento do dispositivo de aquisição.

Figura 42 – Bloco J - UDESC Joinville.



Fonte: Udesc Joinville (2024).

A instalação do dispositivo em campo envolve a confecção de uma caixa para proteção contra chuva e poeira, considerando sua exposição contínua às condições meteorológicas típicas da cidade de Joinville.

Destacam-se, dois fatores levados em conta: 1) a realização de furos na parte inferior da caixa, para a vazão de qualquer tipo de líquido que possa entrar; 2) a abertura de um buraco frontal para a passagem dos cabos e fios necessários para operação do sistema, conforme se observa na Figura 43.

Outro fator considerado é a inclinação do teto, o que não é ideal para os sensores de irradiância, visto a necessidade da captação dos dados no plano horizontal. Dito isso, faz-se necessária a criação de um suporte que permita um bom nivelamento dos piranômetros. A construção do suporte é feita por meio do *software* Inventor, que posteriormente é impresso e origina a peça 3D, Figura 44.

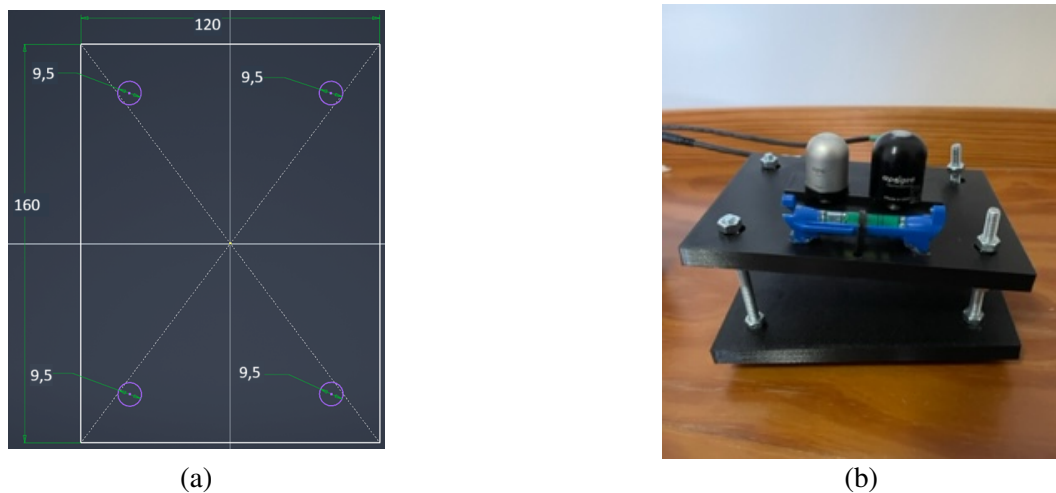
O suporte é confeccionado especialmente para este trabalho, com um distância padronizada entre os furos e detalhes pensados para melhor posicionamento dos sensores de irradiância. Tal estrutura permite a inclinação nos eixos X e Y em relação ao horizonte. O suporte juntamente com o dispositivo é montado em campo conforme mostrado na Figura 45.

Figura 43 – Caixa protetora do dispositivo a) caixa aberta e b) caixa fechada.



Fonte: Elaborada pela Autora (2025).

Figura 44 – Suporte para os piranômetros a) cotas inventor e b) finalizado.



Fonte: Elaborada pela Autora (2025).

Após a instalação do sistema, sua inicialização é realizada remotamente, por meio do software TeamViewer previamente instalado no dispositivo. Por meio deste aplicativo possibilita-se a realização do monitoramento diário, para certificação do pleno funcionamento ao longo do período de aquisição de dados.

A metodologia adotada consiste em medir as grandezas de temperatura e irradiância solar através do sistema de monitoramento implementado e, uma vez com as medições realizadas e armazenadas, são aplicadas as métricas de avaliação, possibilitando a análise dos dados coletados.

Figura 45 – Instalação do sistema de aquisição a) sistema completo e b) sensores de irradiância nivelados.



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pela Autora (2025).

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos pelo dispositivo de coleta de dados da irradiância solar. O protótipo submetido a um ambiente real, mostra as variações e cenários encontrados durante quase três semanas no outono do sul do Brasil. Portanto, valida-se na prática: o sistema de aquisição de dados, a taxa de aquisição dos sensores de irradiância e a dinâmica solar de Joinville.

4.1 BASE DE DADOS COLETADOS

O período definido para a coleta de dados e, assim, a futura construção da base de dados, foi entre 21 de maio e 09 de junho de 2025. Ademais, o equipamento, como comentado anteriormente, opera em um intervalo específico de horas, o qual foi definido pela autora, com base no nascer e no por do sol em Joinville durante esse período. Assim, as medições foram realizadas das 5h30min às 18h30min, cobrindo todo o período diurno.

Antecipa-se que, segundo um estudo do LABREN (Laboratório de Estudos de Irradiação e Recursos Energéticos Renováveis, 2017) para o Atlas Brasileiro de Energia Solar, a cidade de Joinville tem maio e junho entre os meses com a média total diária da irradiação global horizontal mais baixas, tal como julho, onde não chegam aos 3000 Wh/m² por dia. Em contraste, constata-se a importante diferença quando comparados aos meses de dezembro e janeiro, que ultrapassam os 5000 Wh/m² por dia, evidenciando a variação ao longo do ano.

Dito isso, com uma taxa de aquisição de 1 segundo, definida pela autora para esse projeto, foram coletados aproximadamente 50.000 dados por dia. Posteriormente, esses dados foram processados e armazenados em arquivos .csv, assim gerando tabelas diárias de quatro colunas, a primeira delas com o registro temporal exato da coleta (Data/Hora:Minuto:Segundo), a segunda coluna com o registro do sensor de temperatura e as duas últimas com os dados adquiridos pelos sensores de irradiância, SP-510 e SP-215, respectivamente.

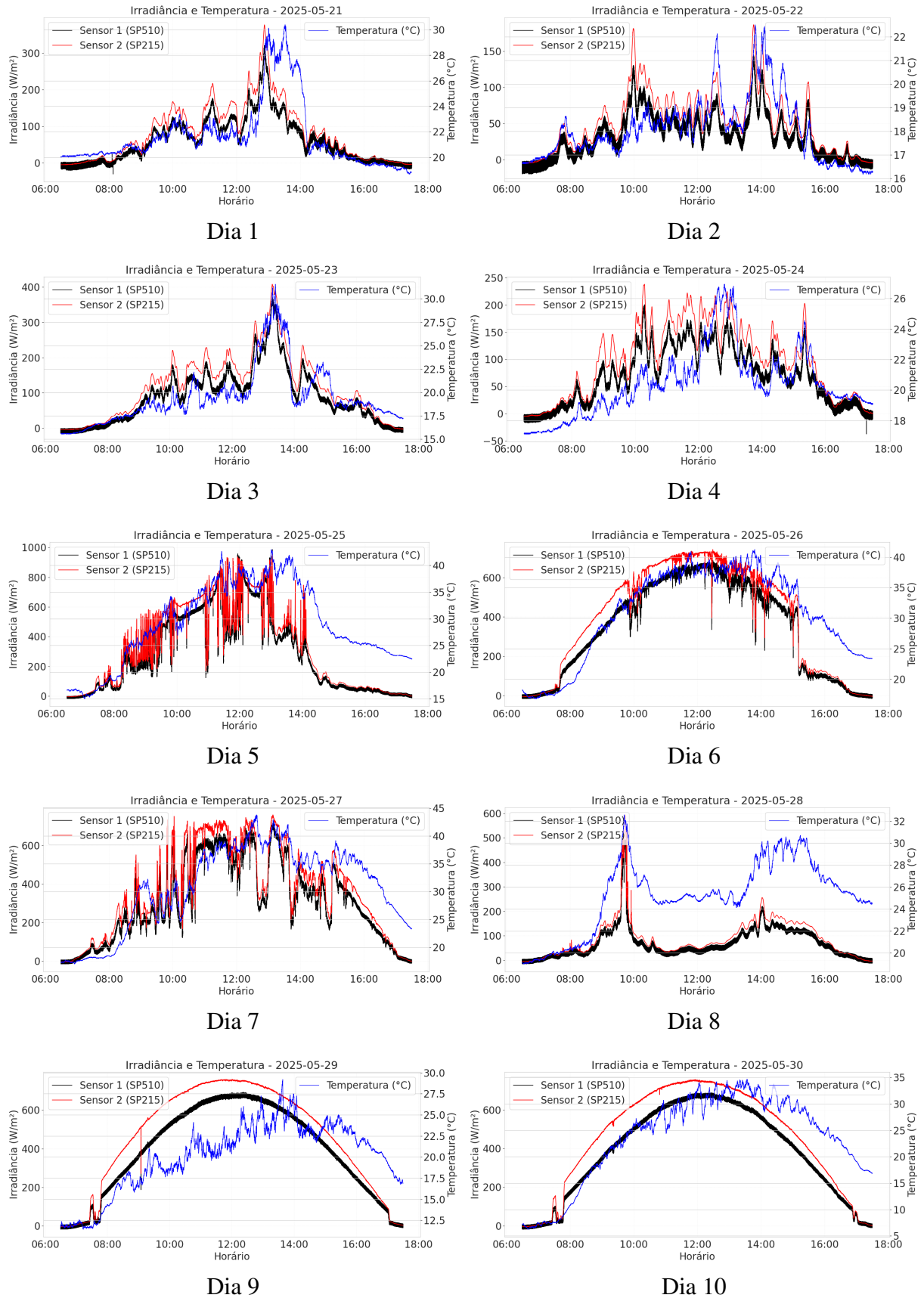
Na sequência, com o software *Google Colab Python* (Apêndice B), os dados coletados são filtrados e estudados. Ainda, para este trabalho, a análise tem maior foco nos sensores de irradiância, com o sensor de temperatura sendo usado para sustentar parte das conclusões.

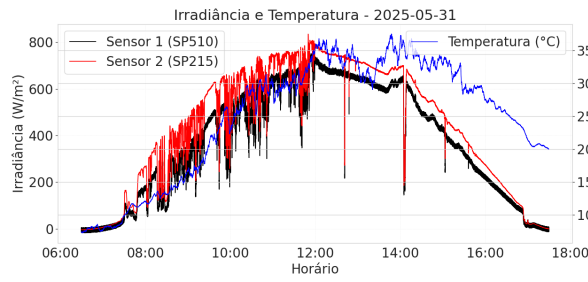
4.2 IRRADIÂNCIA SOLAR E TEMPERATURA DIÁRIA

Para uma análise visual, são elaborados gráficos de três eixos, Figura 46, com os dados diários de irradiância dos sensores SP-510 e SP-215, bem como, os valores adquiridos pelo sensor de temperatura. Dito isso, um dos eixos verticais indica a irradiância em W/m², enquanto o outro corresponde à temperatura em graus Celsius, ambos em função do horário.

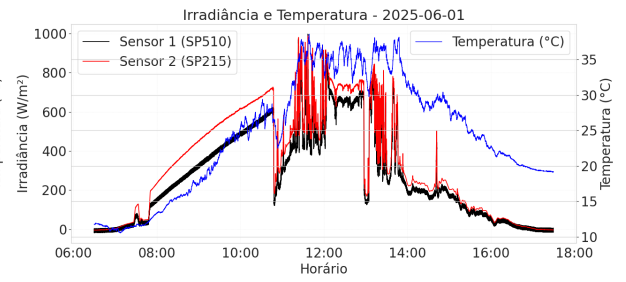
Salienta-se que os gráficos apresentam apenas os registros entre 6h30min e 17h30min, visando uma visualização mais limpa, uma vez que os valores nos extremos do dia não contribuem significativamente para a análise.

Figura 46 – Comparação dos dados adquiridos durante os dias.

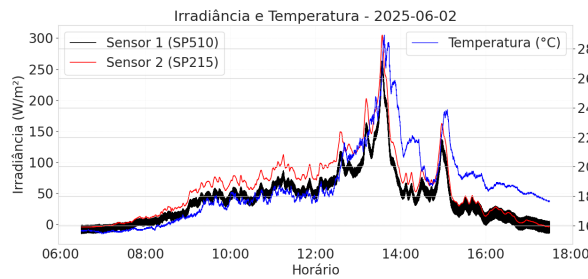




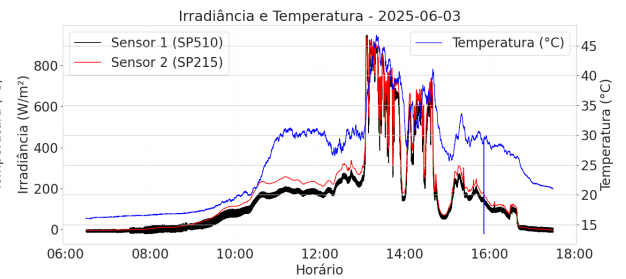
Dia 11



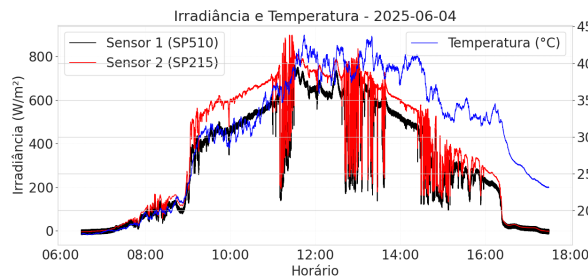
Dia 12



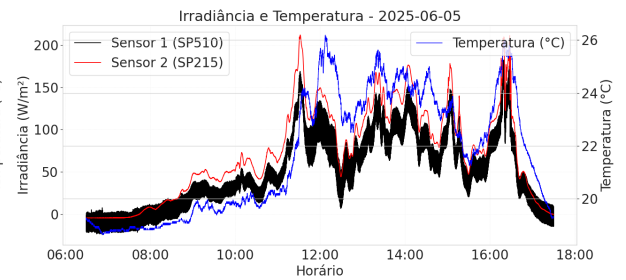
Dia 13



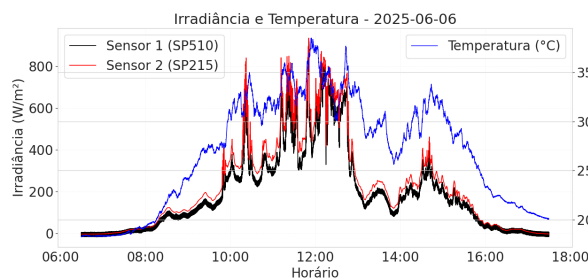
Dia 14



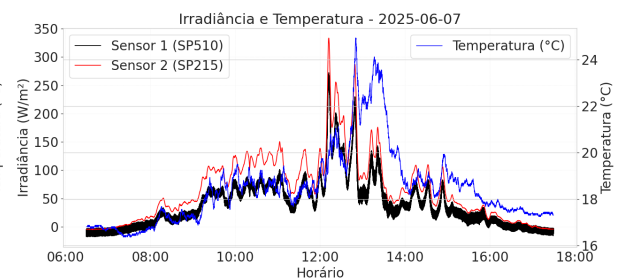
Dia 15



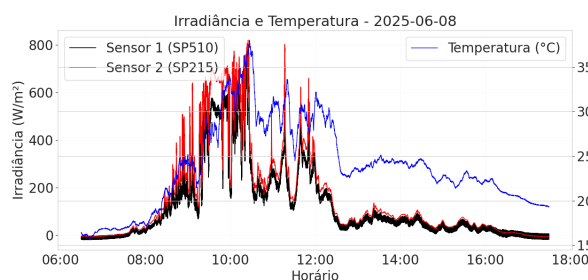
Dia 16



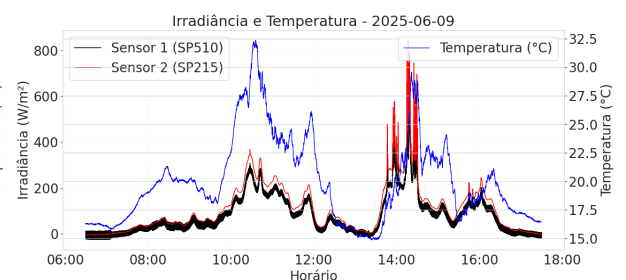
Dia 17



Dia 18



Dia 19



Dia 20

Fonte: Elaborada pela Autora (2025).

Como primeira impressão, observa-se que os sensores de irradiância seguem uma tendência muito similar e que, de modo geral, a temperatura acompanha o perfil das curvas de irradiância solar.

Além disso, é possível identificar flutuações rápidas, entre picos e quedas bruscas, nos dados dos piranômetros. Essas variações estão majoritariamente associadas à presença de nuvens em dias ensolarados ou de dias totalmente nublados, condições climáticas típicas desse período do ano na cidade de Joinville.

Com o intuito de aprimorar o estudo, ainda que os gráficos apresentem os registros de temperatura ao longo do dia, com auxílio do site *The Weather Channel* e utilizando anotações feitas pela autora, elabora-se a Tabela 1 com as condições climáticas do período analisado.

Tabela 1 – Resumo das condições climáticas

Dia	Data	Condição Climática
Dia 1	2025-05-21	Nublado com chuvas
Dia 2	2025-05-22	Nublado com chuvas
Dia 3	2025-05-23	Nublado com chuvas
Dia 4	2025-05-24	Nublado com chuvas
Dia 5	2025-05-25	Ensolarado com nuvens dispersas
Dia 6	2025-05-26	Ensolarado com poucas nuvens
Dia 7	2025-05-27	Nublado com presença de vento
Dia 8	2025-05-28	Nublado com presença de vento
Dia 9	2025-05-29	Ensolarado com poucas nuvens
Dia 10	2025-05-30	Ensolarado com poucas nuvens
Dia 11	2025-05-31	Ensolarado com nuvens dispersas
Dia 12	2025-06-01	Ensolarado com algumas nuvens
Dia 13	2025-06-02	Nublado com chuvas
Dia 14	2025-06-03	Nublado com chuvas
Dia 15	2025-06-04	Ensolarado com nuvens dispersas
Dia 16	2025-06-05	Nublado com chuvas
Dia 17	2025-06-06	Nublado com aberturas de sol
Dia 18	2025-06-07	Nublado com chuvas
Dia 19	2025-06-08	Nublado com presença de vento
Dia 20	2025-06-09	Nublado com chuvas

Nos primeiros quatro dias, o clima era nublado e instável, com a presença de chuvas. Essa condição fez com que os níveis de irradiância fossem menores e com intensas oscilações.

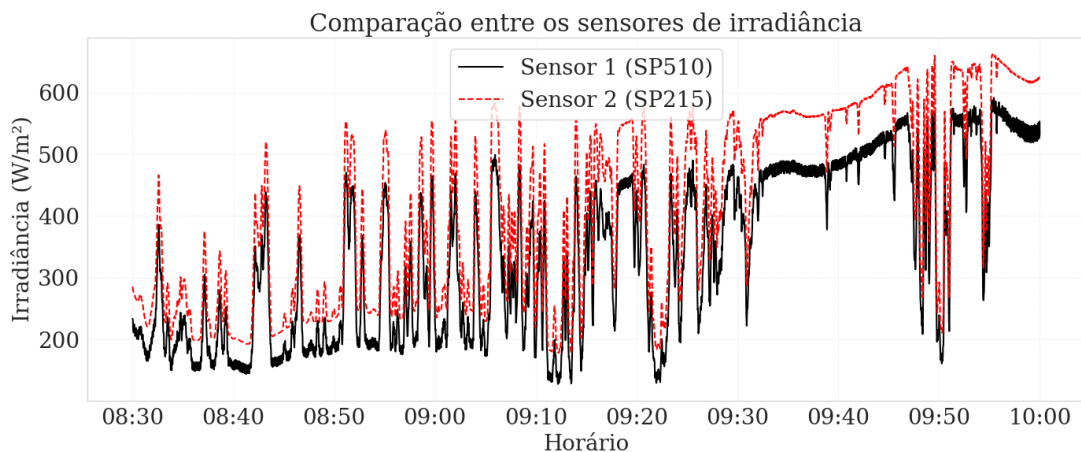
Ademais, em todos os dias mencionados, observa-se, por meio dos gráficos anteriores, a presença de ruído no sensor SP-510, assim como a constante diferença entre os sensores, onde o sensor SP-215 apresenta valores superiores aos registrados pelo sensor de irradiância SP-510.

Ainda, percebe-se uma semelhança entre as curvas de irradiância dos dias 1 e 3, com comportamento térmico bastante similar, portanto identifica-se um possível padrão. Inclusive, outra característica observada é a defasagem existente na curva de temperatura, quando comparada as de irradiância.

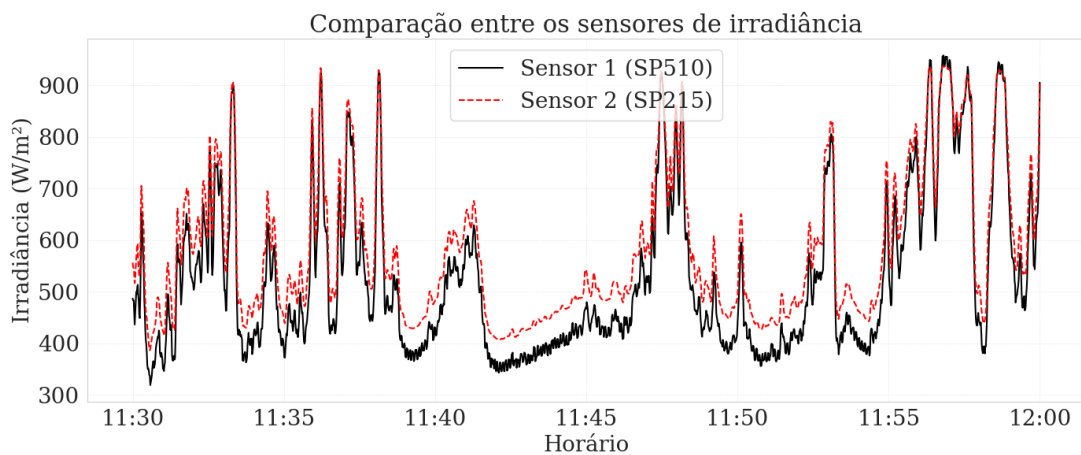
Essa resposta "tardia" da temperatura se deve, além das características construtivas do sensor, à inércia térmica do ambiente. Isso porque primeiramente é necessária a absorção da radiação solar pela superfície, para que, então, irradie calor, aqueça o ar ao seu redor e, por fim, seja captada pelo sensor de temperatura.

Visando uma análise detalhada do dia 5, no qual verificaram-se muitas quedas e picos, são realizados dois recortes específicos, Figura 47, de momentos onde o gráfico apresenta variações: o primeiro entre às 8h30min e às 10h, e o segundo entre às 11h30min e às 12h.

Figura 47 – Comparação entre os sensores no dia 5 (2025-05-25) a) Recorte 1 e b) Recorte 2.



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pela Autora (2025).

Com base nos recortes, infere-se que, embora o dia 5 tenha alta irradiância até o início da tarde, grandes picos são observados. Esse comportamento é característico do sombreamento intermitente, causado pela grande interferência de nuvens rápidas, gerando elevada variação na irradiância.

No primeiro recorte, analisa-se que constantemente o piranômetro SP-510 tem valores de irradiância inferiores ao do SP-215. Já no segundo, o cenário permanece o mesmo na maior parte

do tempo, entretanto nos picos de maior irradiância os sensores convergem para valores muito próximos, o que revela-se atípico, tendo em vista que o desempenho até então não era esse.

Portanto, preliminarmente, aponta-se que isso ocorre devido ao efeito do sombreamento intermitente, o qual "mascara" as diferenças entre os sensores e gera uma aproximação temporária nos sinais.

O sexto dia de medição, foi o primeiro da análise em que registrou-se uma curva mais limpa e com perfil parabólico, bastante próximo ao esperado para um dia de céu aberto. Ainda que tenha apresentado algumas variações no topo da curva, indicativo da presença de nuvens finas, o comportamento geral foi estável. No fim do dia, uma queda brusca no valor da irradiância, indicou o fim do período solar.

Os dias 7 e 8, ainda que apresentando picos de alta temperatura, tiveram curvas características de irradiância dispares. O dia 7 foi marcado pela instabilidade, com variações, mais uma vez, associadas a presença de nuvens, mas dessa vez com vento forte, o que tende a espalhar mais as nuvens, aumentando a intermitência dessas.

Assim, com base nas análises dos dias 5 e 7, observa-se a necessidade de uma frequência de amostragem mais alta para capturar adequadamente as rápidas variações, visto que a taxa de amostragem do projeto de uma amostra por segundo (1 Hz), revela-se possivelmente insuficiente, conforme evidenciado nos gráficos.

Complementarmente, é importante destacar que a escolha da taxa de amostragem influencia diretamente na capacidade de representar variações abruptas do sinal, especialmente no que se refere à sua derivada temporal. Mais do que captar a presença de oscilações, uma resolução temporal adequada permite identificar com precisão a intensidade e a velocidade das transições de irradiância, que são fundamentais para análises dinâmicas do comportamento solar.

Desse modo, quando a taxa de amostragem não é suficiente, perde-se a sensibilidade necessária para acompanhar as variações com fidelidade, o que pode resultar em distorções ou atenuações na representação do sinal. Destarte, essa limitação contribui para a possível perda de informações relevantes, sobretudo em dias com flutuações rápidas, como evidenciado na Figura 46.

Destaca-se, que essa limitação não implica na troca dos sensores de irradiância, mas sim na mudança da taxa dos mesmos, diferenciando-os do sensor de temperatura, o qual para o presente estudo tem uma resposta rápida o suficiente.

Enquanto isso, no oitavo dia, observou-se um comportamento típico de céu encoberto, com baixa amplitude de irradiância e pouca radiação direta, ainda que tenha havido uma breve abertura de sol por volta das 10h. Ressalta-se que, nesse dia, ainda que o sensor de irradiância SP-510 tenha apresentado certo ruído, as curvas de irradiância dos sensores ficaram bem próximas, quase sobrepostas.

O desempenho dos sensores no dia 8, particularmente, é esperado, pois em dias considerados nublados, predomina a irradiância difusa, a qual faz com que a irradiância incida em ambos os sensores de maneira mais uniforme, ocasionando possíveis erros na leitura do sensor.

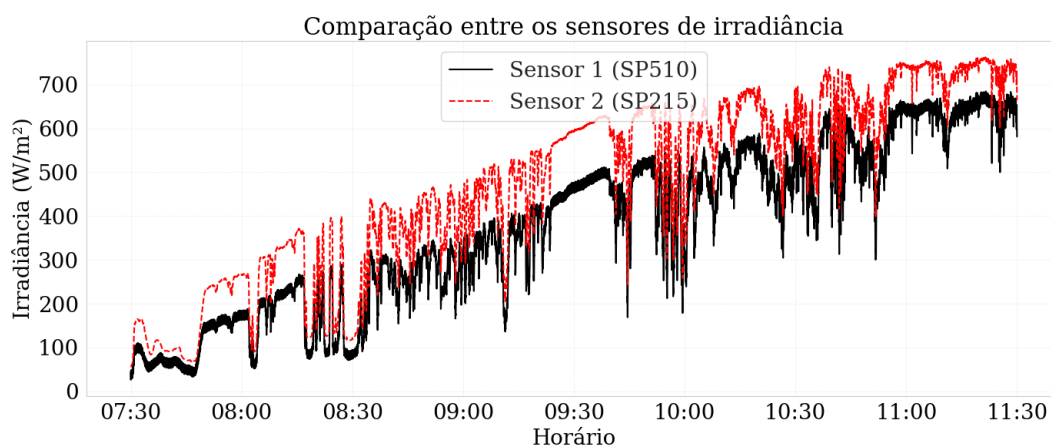
Em contraste, em um dia Sol onde a radiação direta predomina, a diferença de resposta angular entre os sensores se faz relevante, pois a radiação provém de um único ponto (o Sol).

Nos dias 9 e 10, o céu esteve limpo e o perfil das curvas de irradiância foi contínuo, suave e simétrico, refletindo um cenário ideal quase sem oscilações, em que se percebe a boa concordância entre os sensores. As temperaturas foram similares, graduais e altas, com certa defasagem em relação às curvas de irradiância dos sensores, como supracitado.

Entretanto, nota-se a importante diferença entre o valor de irradiância coletado pelos piranômetros, onde o SP-215 registra níveis superiores de irradiância, corroborando com as afirmações anteriores, onde em dias ensolarados, percebe-se a divergência entre as leituras.

Para o dia 11, objetivando uma avaliação mais clara das oscilações de irradiância, faz-se um recorte das primeiras horas de coleta até às 11h30min, Figura 48.

Figura 48 – Recorte para comparação dos sensores no dia 11 (2025-05-31).



Fonte: Elaborada pela Autora (2025).

A partir da figura anterior, valida-se mais uma vez que para dias com alta irradiância o piranômetro SP-215 apresenta um ganho constantemente maior.

Além disso, o comportamento das curvas dos sensores, bem como da temperatura, reflete a característica climática desse dia: a manhã inicia com sol, as temperaturas aumentam gradualmente, mas com algumas nuvens causando variações. Após às 11h30min, a temperatura se estabiliza, as nuvens estão menos presentes e a irradiância, ainda que decaia, apresenta uma curva mais limpa, assim como o céu.

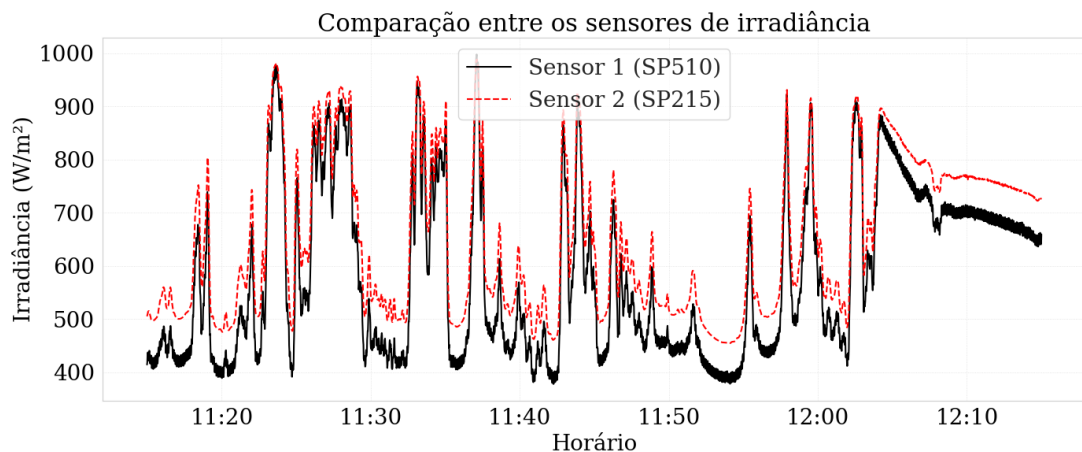
Adicionalmente, a análise conjunta dos dias 9, 10 e 11, evidencia uma coincidência nas curvas de irradiância de formato nos períodos inicial e final do dia. Verifica-se a subida acentuada próximo às 8h, tal como, a queda abrupta próximo às 17h, padrão que sugere a influência do posicionamento dos sensores. Assim, sinalizando o momento em que o Sol entra e sai do campo de vista direto dos sensores, impactando a leitura da irradiância.

O dia 12 expressou-se extremamente instável, com picos de irradiância variando de 150 a 1000 (W/m^2). Sendo assim, as quedas bruscas foram interpretadas como resultado da passagem de nuvens densas em um dia ensolarado. Essa comportamento atmosférico foi considerado um

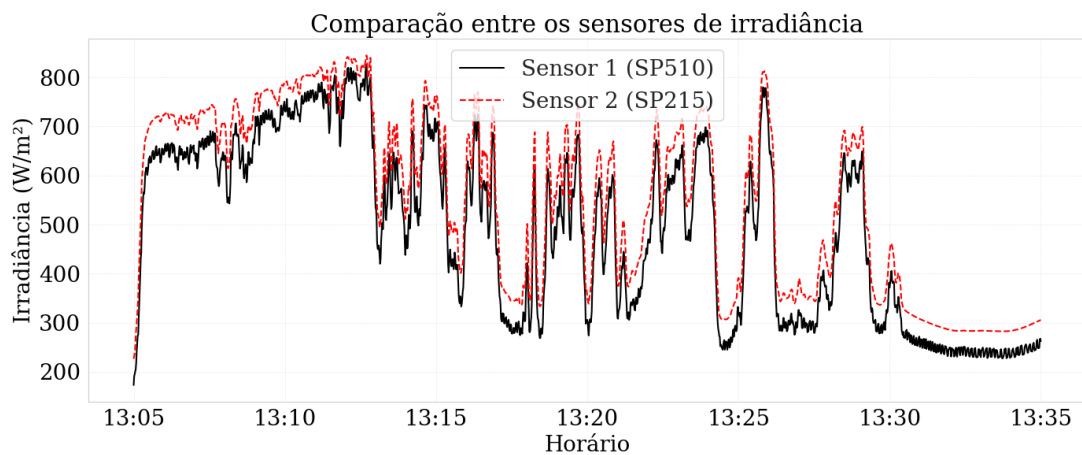
prelúdio da condição climática que se aproximava, a qual se confirmou no dia 13, quando foram presenciadas fortes chuvas e baixos níveis de irradiância.

Igualmente ao dia 11, recortaram-se dois períodos do dia 12, Figura 49, dado que novamente existiram períodos onde havia elevada flutuação, dificultando a distinção precisa entre as curvas dos sensores. Destaca-se ainda, que a temperatura também apresentou variações, incluindo uma queda expressiva próximo às 11h. Essa resposta foi acompanhada pela irradiância, indicando a presença de nuvens densas e/ou pancadas de chuva naquele intervalo.

Figura 49 – Comparação entre os sensores dia 12 (2025-06-01) a) Recorte 1 e b) Recorte 2.



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pela Autora (2025).

Nesse contexto, ressalta-se que, nos momentos de queda e subida abruptas de irradiância, as curvas dos sensores tendem à sobreposição, não permitindo analisar exatamente as respostas dos sensores em mudanças climáticas muito rápidas.

Outrossim, nos recortes do dia 12, mas especialmente no primeiro, observam-se os sensores de irradiância com valores iguais ou próximos, com sobreposições recorrentes. Esse cenário revela que, devido à instabilidade provocada pela presença de nuvens no dia, a radiação

difusa foi significativa e fez com que a diferença existente entre os sensores diminuísse.

Os dias 13 e 18 se apresentaram nublados, com chuvas e baixos níveis de irradiância. Nesses casos, nota-se um padrão de comportamento no sensor de irradiância termoeletrônico SP-510, que para essas condições apresenta mais ruído em suas curvas, como já exposto nos primeiros dias de coleta com condições climáticas similares ao dia 13.

O dia 14 iniciou com chuvas e nublado, resultando em irradiância baixa até às 13h, quando visualiza-se um salto abrupto de temperatura e, também, de irradiância.

Entretanto, ainda que tenham ocorrido picos de alta irradiância, a situação de radiação difusa se repetiu e observaram-se picos onde a curva dos sensores se sobrepueram, na sequência caíram, subiram e assim sucessivamente. Esse tipo de variação, verificado em outros dias com céu encoberto, tornou-se um padrão dos dias de luz difusa no presente estudo.

De forma semelhante, o dia 20 apresentou uma dinâmica compatível, ainda que com temperaturas mais baixas e menor frequência de oscilações. Porém, um ponto a ser destacado desse dia é durante o maior pico de temperatura, onde a irradiância se manteve baixa e muito similar ao valor de irradiância encontrado quando a temperatura estava pela metade. Portanto, essa evidência ressalta que mesmo que a temperatura seja alta, em um dia muito nublado e com alta radiação difusa, a irradiância permanece baixa.

Em complemento à análise, o dia 19 seguiu a mesma lógica, porém durante a manhã, com picos justificados pela radiação difusa. Isso corrobora com a afirmação do comportamento semelhante para dias instáveis, independente do período do dia.

Enquanto isso, o dia 15 apresentou um desempenho similar ao do dia 5, tanto em termos gráficos quanto climáticos. As condições em ambos foram de dias ensolarados, temperaturas altas e com a presença de nuvens carregadas. Esse panorama gerou curvas de irradiância extremamente oscilantes durante o dia todo.

O dia 16 foi caracterizado por fortes chuvas e baixa irradiância, deixando assim, o sensor SP-510 com uma resposta bastante ruidosa. O comportamento dos sensores foi similar, ainda que ambas as curvas de irradiância tenham se mantido mais planas e alinhadas à curva de temperatura, que também permaneceu mais amena, indicando um dia com irradiância mais fraca.

Por outro lado, o dia 17 apresentou temperaturas elevadas, com aberturas de sol, porém majoritariamente nublado, o que mais uma vez favorece as oscilações rápidas, exigindo uma taxa de aquisição que garanta a fidelidade da captura dos dados e dos eventos dinâmicos.

4.3 CORRELAÇÃO ENTRE SENSORES DE IRRADIÂNCIA

A análise de correlação é a quantificação do grau em que duas variáveis estão linearmente relacionadas. À vista disso, o presente trabalho permite validar a consistência e a confiabilidade dos modelos de sensores de irradiância utilizados, verificando a concordância entre as medições.

A correlação pode ser calculada por diferentes métodos. Embora neste estudo tenha-se utilizado diretamente o software *Google Colab Python* por meio da função de correlação, na

teoria pode-se determinar esse valor utilizando o coeficiente de correlação de Pearson (Macro, 2023). A equação correspondente está apresentada a seguir:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

Onde n é o número total de observações na amostra, x_i e y_i são os valores individuais das duas variáveis e $\bar{x}$ e $\bar{y}$ são as médias amostrais de x e y , respectivamente.

Isto posto, o coeficiente de correlação assume valores entre -1 e +1, sendo que quanto mais próximo dos extremos, maior o grau de linearidade entre as variáveis. Logo, valores entre ± 1 e $\pm 0,9$, indicam correlação muito forte. Por outro lado, valores entre 0 e $\pm 0,3$ indicam correlação nula ou desprezível (Macro, 2023).

Por conseguinte, a Tabela 2 apresenta os coeficientes de correlação obtidos para cada um dos dias analisados, complementando o que foi supracitado.

Tabela 2 – Correlação entre os piranômetros SP-510 e SP-215

Dia	Data	Valor de Correlação
Dia 1	2025-05-21	0,995
Dia 2	2025-05-22	0,983
Dia 3	2025-05-23	0,995
Dia 4	2025-05-24	0,992
Dia 5	2025-05-25	0,997
Dia 6	2025-05-26	0,995
Dia 7	2025-05-27	0,997
Dia 8	2025-05-28	0,992
Dia 9	2025-05-29	0,992
Dia 10	2025-05-30	0,992
Dia 11	2025-05-31	0,993
Dia 12	2025-06-01	0,991
Dia 13	2025-06-02	0,989
Dia 14	2025-06-03	0,996
Dia 15	2025-06-04	0,995
Dia 16	2025-06-05	0,974
Dia 17	2025-06-06	0,998
Dia 18	2025-06-07	0,987
Dia 19	2025-06-08	0,997
Dia 20	2025-06-09	0,993

Conforme observado, de forma geral, os sensores apresentam uma elevada correlação entre si, com um valor mínimo de 0,974, indicando uma forte relação linear entre os dados registrados, validando a concordância e a precisão dos sensores utilizados.

Infere-se que a correlação está avaliando a linearidade entre os sensores, não sendo sensível às discrepâncias sistemáticas de amplitude. Portanto, mesmo que o sensor fotoelétrico SP-215 leia constantemente uma irradiância superior ao piranômetro SP-510, essa diferença não compromete o valor do coeficiente, desde que a relação entre os sinais permaneça linear.

Entretanto, ao analisar mais detidamente o dia com menor valor de correlação (2025-06-05), verifica-se que foi justamente o dia em que o sensor de irradiância SP-510 apresentou maior nível de ruído nas medições. Coincidentemente, essa data foi marcada por elevada ocorrência de chuvas, intensa nebulosidade e baixa irradiância ao longo do período de coleta. Desse modo, entende-se que esses fatores atrapalham as medições e reduzem o coeficiente de correlação.

Por outro lado, observa-se que os dias com maior valor de correlação, ocorrem em condições climáticas instáveis e com alta presença de nuvens. Isso revela que ainda que os sensores sofram sombreamentos intermitentes, devido a estarem igualmente posicionados e orientados, eles mantêm a boa coerência relativa entre si. Esse aspecto é fundamental para estudos da dinâmica solar local, como é o caso do presente projeto.

4.4 ANÁLISE DA DINÂMICA SOLAR

Para complementar as análises previamente apresentadas, analisam-se as derivadas da irradiância registrada, por ambos os sensores, ao longo de cada dia. As derivadas são utilizadas com o intuito de entender a taxa de variação da irradiância em cada instante, ou seja, compreender o comportamento dinâmico da luz solar incidente conforme leitura feita pelos sensores de irradiância ao longo dos dias, Figura 50.

Em termos gerais, nos quatro primeiros dias, a derivada da irradiância referente ao sensor de irradiância SP-510 apresenta grande espalhamento, enquanto o SP-215 permanece praticamente estável. A primeira análise correlaciona o que já havia sido discutido, referente ao ruído observado no piranômetro SP-510 nas medições de irradiância. Assim, infere-se a maior sensibilidade do sensor de irradiância SP-510 a essas condições, ao passo que o SP-215 mostra-se muito mais suave, próximo a 0.

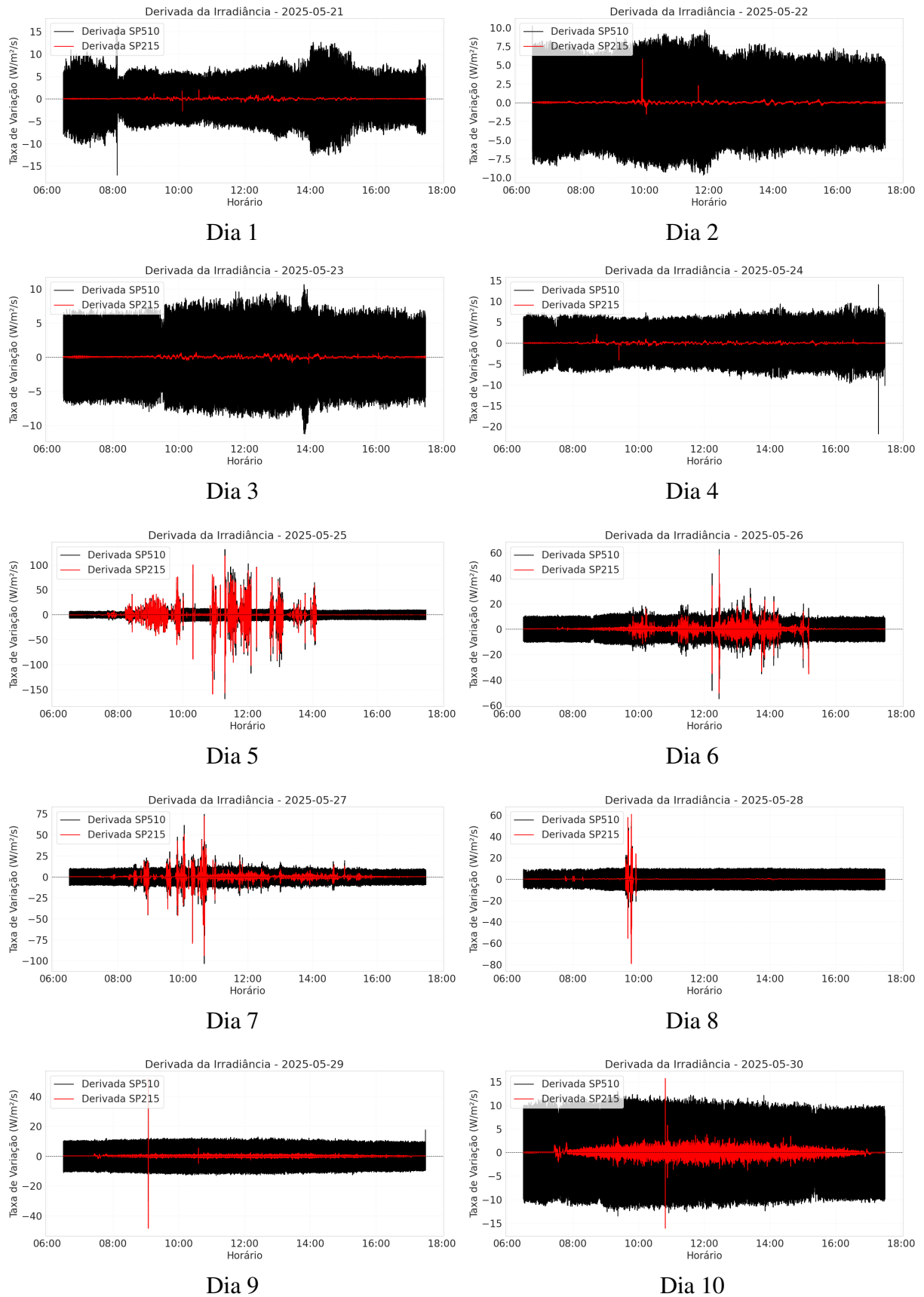
Ainda, destaca-se que embora o comportamento do piranômetro SP-510 tenha parecido irregular comparado ao SP-215, seu desempenho é relativamente consistente ao longo do período da coleta. Ponderando, visualiza-se que em todos os gráficos o piranômetro termoeletrico mantém variações menores que $20 \text{ W/m}^2/\text{s}$ e, em sua maioria, concentrando-se em torno de $10 \text{ W/m}^2/\text{s}$.

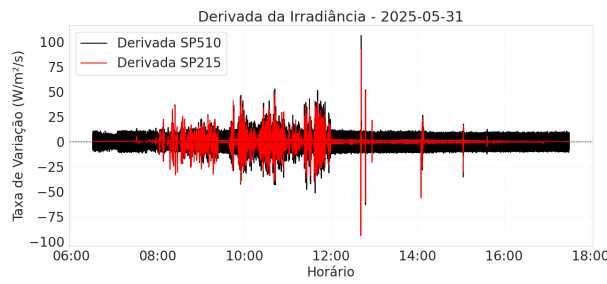
Em contrapartida, no quinto dia observa-se uma mudança de comportamento, onde a derivada do sensor de irradiância SP-215 fica mais elevada e oscilando bastante. Reforçando, esse foi um dia com nuvens passando rapidamente, gerando sombreamento intermitente, e com aberturas repentinas de sol, o que leva aos diversos picos vermelhos observados. Nesse cenário, as variações de ambos sensores passam os $150 \text{ W/m}^2/\text{s}$ próximo às 11h.

Os dias 5, 6, 7, 8, 11, 12, 14, 17 e 19, como já comentado nas seções anteriores, apresentam picos acentuados durante o dia, com algumas variações dependendo do valor de irradiância, os quais provém da passagem de nuvens.

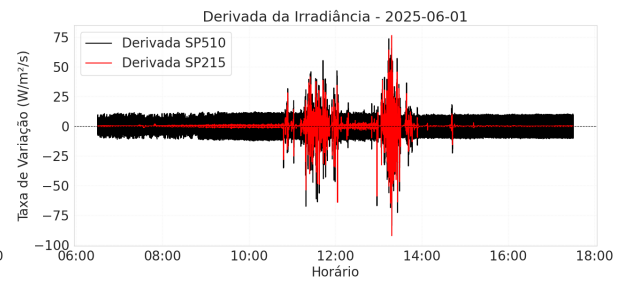
As flutuações nas curvas das derivadas são acompanhadas por ambos sensores de irradiância. Esse comportamento é esperado, uma vez que estes já parecem acompanhar igualmente os picos de irradiância da Figura 46.

Figura 50 – Comparação das derivadas dos sensores nos diferentes dias.

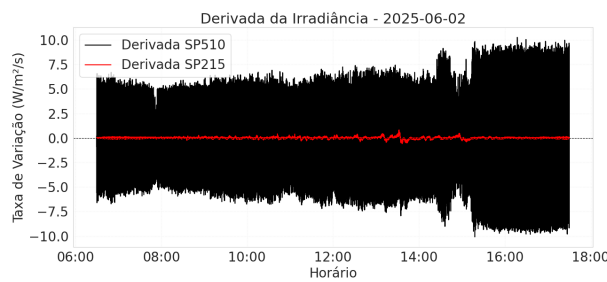




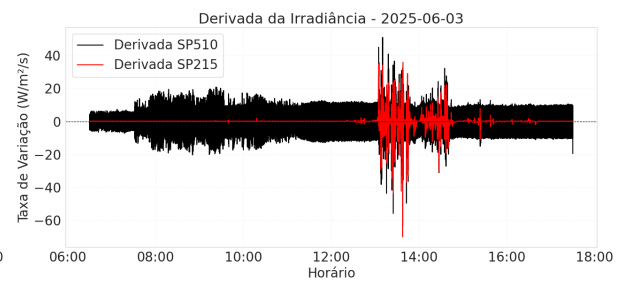
Dia 11



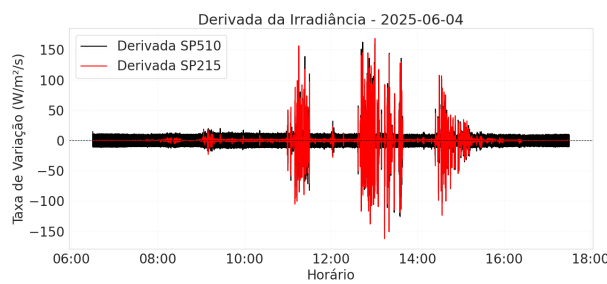
Dia 12



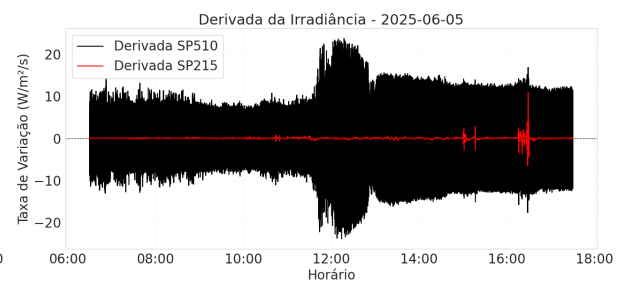
Dia 13



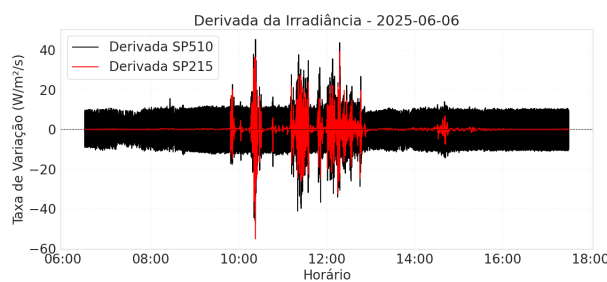
Dia 14



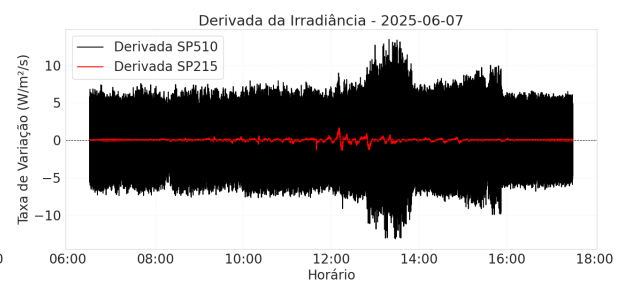
Dia 15



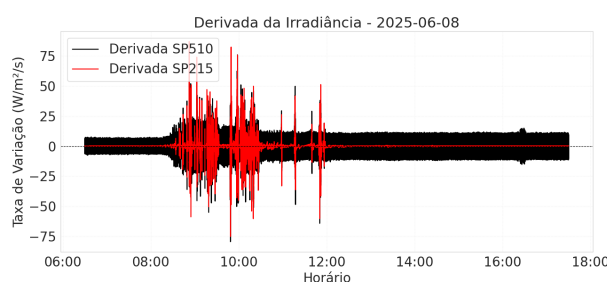
Dia 16



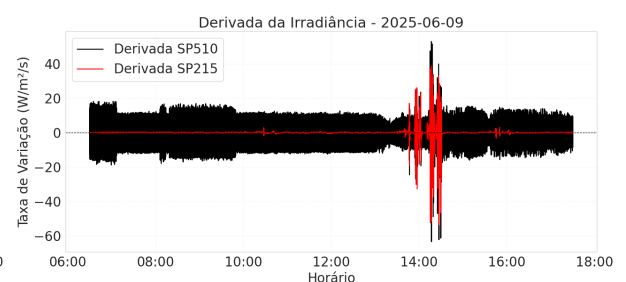
Dia 17



Dia 18



Dia 19



Dia 20

Fonte: Elaborada pela Autora (2025).

No dia 9, o sensor fotoelétrico SP-215 apresenta um único pico na derivada, indicando alguma instabilidade na leitura. No entanto, como espera-se para dias de céu aberto e de menor variabilidade atmosférica, as taxas de variação são constantes e baixas para ambos sensores, comportamento que se repete no dia 10.

No dia 13, as variações são pequenas, visto que não são observadas mudanças climáticas ao longo do período de coleta e foi um dia inteiramente nublado, com irradiância baixa e estável.

Alternativamente, no dia 15, ambos sensores mostraram derivadas acentuadas, com picos altos e refletindo as rápidas passagens de nuvens densas.

Portanto, quando há baixa irradiância e ocorrência de chuva, como nos dias 16, 18 e 20, percebe-se, novamente, que o sensor SP-215 mantém sua derivada próximo de zero. Enquanto o sensor SP-510 apresenta a variação pequena, mas constante, independente da condição climática.

Uma similaridade observada nos gráficos das derivadas é a semelhança entre os dias totalmente nublados (estáveis), e os dias de céu aberto. Essa equivalência comprova que as variações acentuadas nas medições dos sensores não se devem a nebulosidade em si, mas sim a instabilidade atmosférica associada às aberturas de sol, como ocorre nos dias 11 e 15 da coleta.

Como forma de complementar a análise gráfica, constrói-se a Tabela 3 com os valores máximos e mínimos registrados por cada um dos sensores de irradiância, para cada um dos dias.

Tabela 3 – Valores máximos e mínimos das derivadas de irradiância dos piranômetros SP-215 e SP-510

Dia	Data	SP-215		SP-510	
		Máx (W/m ² /s)	Mín (W/m ² /s)	Máx (W/m ² /s)	Mín (W/m ² /s)
1	2025-05-21	2,02	-2,76	16,31	-17,06
2	2025-05-22	5,81	-1,58	10,24	-9,69
3	2025-05-23	0,69	-0,93	10,61	-11,28
4	2025-05-24	2,12	-4,08	14,00	-21,78
5	2025-05-25	118,17	-159,31	131,02	-168,67
6	2025-05-26	58,07	-50,49	62,59	-54,92
7	2025-05-27	72,08	-93,96	74,54	-103,41
8	2025-05-28	60,83	-79,24	54,13	-73,63
9	2025-05-29	52,10	-48,50	45,42	-30,41
10	2025-05-30	15,73	-16,11	13,05	-13,50
11	2025-05-31	92,32	-94,06	106,18	-88,95
12	2025-06-01	76,41	-92,33	73,66	-83,86
13	2025-06-02	0,81	-0,58	10,25	-10,08
14	2025-06-03	35,89	-70,02	50,96	-63,42
15	2025-06-04	168,45	-162,30	162,42	-150,72
16	2025-06-05	10,92	-6,52	23,79	-23,90
17	2025-06-06	39,34	-55,20	45,35	-47,82
18	2025-06-07	1,65	-1,39	13,46	-13,20
19	2025-06-08	86,99	-75,13	75,90	-79,50
20	2025-06-09	38,66	-53,83	53,07	-63,54

Os valores máximos e mínimos apresentados corroboram com as observações feitas

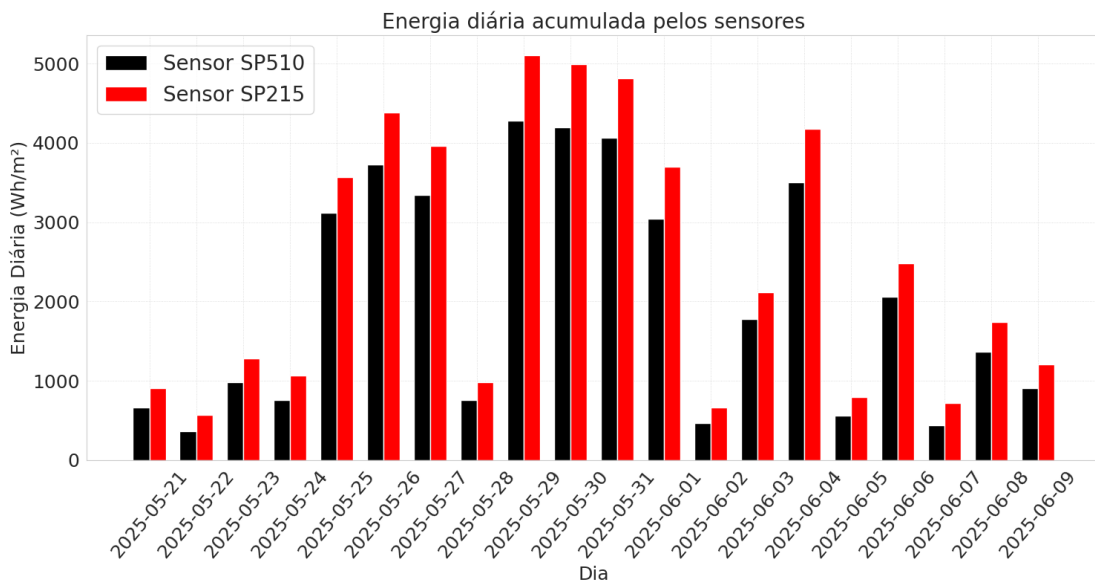
para a Figura 50, reforçando a ideia de que em dias instáveis, ambos sensores tem variações acentuadas, indicando transições intensas na irradiância solar, fazendo a radiação direta oscilar.

Apesar das alternâncias, observa-se a coerência na dinâmica das medições entre os sensores. Embora exista diferença na amplitude entre eles, o comportamento temporal mostra-se bastante sincronizado, inclusive nas mudanças de condições climáticas.

4.5 ENERGIA DIÁRIA ACUMULADA (WH/M²)

Visando quantificar a energia captada durante o período de coleta e, mais especificamente diariamente por cada um dos sensores, elabora-se um gráfico de barras, Figura 51, com os valores de energia diária acumulada.

Figura 51 – Energia diária acumulada.



Fonte: Elaborado pela Autora (2025).

Por meio deste, fica evidente que o piranômetro SP-215 constantemente registra valores mais altos de energia acumulada. Tal comportamento é percebido também na seção de irradiância solar e temperatura diária. No entanto, mostra-se contraintuitivo e inesperado, visto que o sensor termoeletrico (SP-510) apresenta uma faixa espectral mais ampla que o fotovoltaico (SP-215).

Portanto, ao se considerar a objeção feita e ao ser sabido que ambos os sensores estão igualmente posicionados na instalação, exclui-se o posicionamento como fator influente para alteração dos dados e infere-se a superestimação da irradiância por parte do sensor SP-215.

A hipótese que se levanta para a divergência na leitura relaciona-se a uma inadequação na calibração ou à alteração da calibração original em decorrência do transporte os piranômetros, visto que a calibração é realizada pelo grupo GEPOC, no estado do Rio Grande do Sul, e o ponto de coleta está situado em Santa Catarina.

Em função da discrepância nas magnitudes registradas, não se realiza a comparação de valores absolutos, o que impede a análise de balanço energético. Todavia, destaca-se a coerência relativa de comportamento temporal entre eles, mesmo com escalas diferentes.

Além disso, aproveitando os dados de energia acumulada registrados pelo sensor SP-510, avalia-se o impacto das condições climáticas na disponibilidade de energia solar. Assim, verifica-se que, entre o dia mais ensolarado e o mais encoberto, há uma queda de quase 12 vezes na energia acumulada, o que evidencia a influência do sombreamento das nuvens e ressalta a importância de considerá-lo nas estimativas de disponibilidade solar.

5 CONCLUSÃO

Neste Trabalho de Conclusão de Curso, se propôs a criação e instalação de uma estação de coleta de dados de irradiância solar na cidade de Joinville, para a futura construção de uma base de dados. Essa base permite a análise do comportamento dos dados coletados por duas tecnologias diferentes de piranômetros: o SP-510 (termoelétrico) e o SP-215 (fotoelétrico), sob diferentes condições atmosféricas.

O desenvolvimento do equipamento para coleta, tal qual sua instalação em campo, foram descritos detalhadamente no decorrer do presente estudo. Assim também, foram documentadas as configurações de software e programações realizadas para garantir o funcionamento do sistema.

O sistema de monitoramento foi projetado visando compreender a dinâmica solar de Joinville e suas implicações no desempenho da geração de energia em sistemas fotovoltaicos, especialmente em uma região caracterizada por muitas variações climáticas ao longo de um mesmo dia. Por essa razão também, objetivou-se avaliar se a taxa de aquisição estabelecida ao sistema era suficiente e adequada para captar essas flutuações climáticas rápidas.

As primeiras análises, fundamentadas nas curvas de irradiância e temperatura, permitem observar a elevada variabilidade climática esperada, bem como as oscilações intensas. A causa das oscilações se deve, principalmente, aos sombreamentos de nuvens intermitentes, uma vez sabido que não existem prédios ou qualquer tipo de objeto que possa cobrir a estação.

Por meio do estudo das derivadas, verifica-se que ambos os sensores registram variações significativas, principalmente em dias instáveis meteorologicamente, com aproximadamente $150 \text{ W/m}^2/\text{s}$ de taxa de mudança, o que demonstra a dinâmica acelerada da irradiância solar da região. Acredita-se que para a melhora do projeto e verificação da possível perda de informações, deve-se aumentar a taxa de aquisição dos piranômetros. No presente estudo, manteve-se a mesma taxa para os três sensores, irradiância e temperatura, entretanto, para análises mais precisas, entende-se que é necessária uma taxa de amostragem maior para os piranômetros SP-215 e do SP-510.

Ademais, durante todo o período de coleta, o sensor SP-215 (fotovoltaico) apresenta dados com valores superiores de irradiância, desempenho este inadequado e inesperado. A afirmação anterior justifica-se, visto que o piranômetro em questão tem características construtivas baseadas em silício, o qual tem uma faixa espectral mais estreita, como descrito anteriormente no trabalho.

Em contrapartida, o sensor SP-510 (termoelétrico) possui uma faixa espectral ampla, captando do raio ultravioleta ao infravermelho médio e, portanto, tem a capacidade de registrar uma parcela maior de irradiância. Dado isso, esperava-se que o SP-510 apresentasse valores superiores de irradiância sob as mesmas condições de incidência solar.

Dessa forma, conclui-se que o sensor fotovoltaico superestima os valores de irradiância durante todo o período analisado no presente trabalho. Esse comportamento decorre de um erro na calibração do sensor. A hipótese é sustentada, uma vez que trata-se de um erro pontual na magnitude da leitura do sensor, visto que a forma das curvas obtidas pelo SP-215 é coerente com

a esperada, apresentando comportamento temporal semelhante ao do SP-510.

Em detrimento disso, as análises quantitativas realizaram-se exclusivamente baseadas nos dados coletados pelo piranômetro termoeletrico. Entretanto, o foco do estudo não é a comparação entre as tecnologias dos sensores, mas sim a investigação da dinâmica solar e da resposta temporal dos sensores frente as condições climáticas as quais se encontram expostos. Logo, entende-se que o desempenho dos sensores analisados é válido para os objetivos da investigação.

Com relação a eficiência da taxa de aquisição estabelecida ao projeto, uma amostra por segundo, e, tendo em vista que o local de coleta é tipicamente marcado por muitas mudanças climáticas ao longo do dia, infere-se que a taxa de amostragem atual é suficiente apenas para dias estáveis, com clima totalmente nublado ou totalmente ensolarado.

Porém, em dias instáveis com alta variabilidade climática e por consequência, oscilações de irradiância, a taxa de 1 amostra por segundo parece ser insuficiente, podendo levar a perda de informações, o que pode suavizar picos e não representar fielmente o que deve ser captado. Essa possível insuficiência se torna mais evidente, majoritariamente, nos momentos de captação de eventos dinâmicos e rápidos, como a passagem de nuvens carregadas.

Por fim, com a análise quantitativa do sensor SP-510 reforça-se a importância do presente estudo e da realização de estudos prévios à implementação de estações solares com foco em geração de energia. Dado que, ao avaliar a energia acumulada durante todo o período de aquisição de dados, observa-se grande variação de valores entre os dias. Esse tópico, destaca a necessidade de estudar o clima do local, não apenas os níveis médios de radiação e temperatura, mas também a dinâmica da irradiância local, considerando a presença de sombreamentos transitórios e condições atmosféricas específicas da região de instalação.

Desse modo, ainda que o período de coleta tenha sido curto, o trabalho apresenta resultados positivos e satisfatórios quanto a análise da dinâmica solar de Joinville, entretanto diversas melhorias podem ser implementadas.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista as limitações e os resultados obtidos, recomenda-se para trabalhos futuros:

- Aprimorar a taxa de aquisição dos piranômetros, aumentando a taxa de amostragem;
- Integrar uma câmera ao sistema para registrar periodicamente as condições climáticas no local da estação de aquisição de dados;
- Recalibrar ambos sensores para realizar análises quantitativas;
- Rastrear o ponto de máxima potência do sistema por meio de simulações e testes, utilizando a base de dados;
- Estender o período de coleta, analisando o comportamento da irradiância solar durante um ano;

- Adicionar um sensor pluviométrico e um anemômetro a estação de coleta para associar com possíveis alterações observadas nos dados registrados;
- Implementar a funcionalidade do botão para registro de manutenções;
- Disponibilizar a base de dados para o público geral, promovendo o acesso de dados reais para mais estudos.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, Agencia Nacional de Energia Elétrica. **RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 687: Altera a Resolução Normativa n° 482**. 2015. ANEEL. Citado na página 31.
- APOGEE. **SP-510: Datasheet**. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://www.apogeeinstruments.com/content/SP-510-610-manual.pdf>. Citado na página 41.
- APOGEE. **SP-215: Datasheet**. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://www.apogeeinstruments.com/content/SP-212-215-manual.pdf>. Citado na página 40.
- ASTH, Rafael C. **Ondas**. 2024. Acesso em: 23 set. 2024. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/ondas/>. Citado na página 26.
- BECQUEREL, E. **Memoires sur les effets electriques produits sous l'influence des rayons**. [S.l.: s.n.], 1839. Citado na página 32.
- BNEF, BloomerangNEF. **Solar, Wind, Batteries To Attract \$10 Trillion to 2050, But Curbing Emissions Long-Term Will Require Other Technologies Too**. 2019. Acesso em: 29 ago. 2024. Disponível em: <https://about.bnef.com/blog/solar-wind-batteries-attract-10-trillion-2050-curbing-emissions-long-term-will-require-tech\nologies/>. Citado na página 19.
- BOURNS. **3296W: Datasheet**. [S.l.], 2024. Citado na página 44.
- CEPEL; CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. [s.n.], 2014. Disponível em: https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 17 set. 2024. Citado 6 vezes nas páginas 24, 25, 26, 28, 31 e 33.
- DALLAS. **DS18B20: Datasheet**. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/58557/dallas/ds18b20.html>. Citado na página 46.
- DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. [S.l.: s.n.], 2013. Citado na página 35.
- FIGUEIRA, Henrique Horst. **Requisitos dinâmicos de controle para o estágio de conversão C.C.-C.C. aplicado em sistemas fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, 2020. Tese de Doutorado. Citado 3 vezes nas páginas 34, 35 e 36.
- FRAIDENRAICH, Naum; LYRA, Francisco. **Energia Solar: fundamentos e tecnologia de conversão heliotérmica e fotovoltaica**. [S.l.: s.n.], 1995. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- FREIRE, Luiz Abelardo Dantas. **Desenvolvimento de um piranômetro fotovoltaico**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2008. Tese de Doutorado. Citado na página 30.
- Governo Federal. **Energia do vento é considerada uma das mais limpas e baratas do mundo**. 2023. Acesso em: 20 set. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/energia-do-vento-e-considerada-uma-das-mais-limpas-e-baratas-do-mundo>. Citado na página 21.

Governo Federal. **Radiações não ionizantes**. 2023. Acesso em: 16 set. 2024. Disponível em: [https://www.gov.br/inca/pt-br/assuntos/causas-e-prevencao-do-cancer/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/radiacoes/radiacoes-nao-ionizantes#:~:text=A%20radia%C3%A7%C3%A3o%20solar%20\(exposi%C3%A7%C3%A3o%20natural,UV%20atrav%C3%A9s%20da%20claridade%20natural](https://www.gov.br/inca/pt-br/assuntos/causas-e-prevencao-do-cancer/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/radiacoes/radiacoes-nao-ionizantes#:~:text=A%20radia%C3%A7%C3%A3o%20solar%20(exposi%C3%A7%C3%A3o%20natural,UV%20atrav%C3%A9s%20da%20claridade%20natural.). Citado na página 27.

HABITABILITY. **Dia de Sobrecarga da Terra é planeta no cheque especial**. 2025. Acesso em: 27 jun. 2025. Disponível em: <https://habitability.com.br/dia-de-sobrecarga-da-terra/>. Citado na página 18.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Física**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. Citado na página 26.

HEIN, Henrique. **Terra atinge esgotamento dos recursos naturais para 2023**. 2023. Acesso em: 29 ago. 2024. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/terra-atinge-esgotamento-dos-recursos-naturais-para-2023/>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

HISATOMI, Carolina. **Radiação solar: definição, tipos e importância**. 2024. Acesso em: 17 set. 2024. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/radiacao-solar/>. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

IEA. **Massive expansion of renewable power opens door to achieving global tripling goal set at COP28**. 2024. Acesso em: 04 set. 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/news/massive-expansion-of-renewable-power-opens-door-to-achieving-global-tripling-goal-set-at-cop28>. Citado na página 19.

INEICHEN, Pierre; AL. et. Dynamic global-to-direct irradiance conversion models. **ASHRAE Transactions**, 1992. Citado na página 31.

INPE. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. [s.n.], 2017. Disponível em: http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/08.15.18.20/doc/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao_rev-01-compactado.pdf. Acesso em: 10 set. 2024. Citado 4 vezes nas páginas 29, 30, 34 e 35.

ISO, International Organization for Standardization. **Solar energy — Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation**. 2018. ISO 9060:2018. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

JUNIOR, Jair Urbanetz. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2010. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Citado na página 34.

LAB, Lighting Design. Color temperature. 2024. Acesso em: 25 set. 2024. Disponível em: <https://www.lightingdesignlab.com/resources/articles/articles-lighting-fundamentals/color-temperature>. Citado na página 26.

LIMA, Andrei da Cunha. Missão universal: Medidor de irradiação rápida. Apresentação interna utilizada como material de apoio ao estudo. 2024. Citado na página 38.

LIMA, Antonio Guilherme Garcia. **Espectro Solar**. 2024. Acesso em: 20 set. 2024. Disponível em: <https://www.antonioguilherme.web.br.com/blog/geracao-de-energia-eletrica/energia-solar/espectro-solar/>. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 28.

MACRO, Análise. **Análise de Correlação em Estatística**. 2023. Acesso em: 10 jun. 2025. Disponível em: <https://analisemacro.com.br/econometria-e-machine-learning/analise-de-correlacao-em-estatistica/>. Citado na página 68.

MAGARREIRO, Clarisse; FREITAS, Sara; BRITO, Miguel. Radiação e energia solar. **Gazeta da Física**, 2016. Disponível em: <https://www.spf.pt/magazines/GFIS/119/article/993/pdf>. Acesso em: 23 set. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

MARIANO, Juliana D'Angela; JUNIOR, Jair Urbanetz. **Energia Solar Fotovoltaica: Princípios fundamentais**. Ponta Grossa, Brasil: Atena Editora, 2022. Citado na página 32.

MELO, Emerson Gonçalves de. **Geração Solar Fotovoltaica: estimativa do fator de sombreamento e irradiação em modelos tridimensionais de edificações**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2012. Dissertação de Mestrado em Ciências. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 36.

MESSENGER, Roger A.; VENTRE, Jerry. **Photovoltaic Systems Engineering**. [S.l.: s.n.], 2010. Citado na página 33.

NASCIMENTO, Cássio Araújo do. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil, 2004. Monografia. Citado na página 32.

NEVES, Guilherme Marques. **Influência do espectro da radiação solar em módulos fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 2016. Dissertação de Mestrado. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

NIEDZIALKOSKI. **Desempenho de painéis solares mono e policristalinos em um sistema de bombeamento de água**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Brasil, 2013. Dissertação de Mestrado. Citado na página 33.

OLIVEIRA, Nícolas. **A Escala Kardashev de civilizações extraterrestres**. 2023. Acesso em: 12 set. 2024. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/ciencia/274714-escala-kardashev-civilizacoes-extraterrestres.htm>. Citado na página 20.

PEREIRA, Osvaldo L. S.; GONCALVES, Felipe F. Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: estudo de caso do sistema de tubarão - sc. 2008. Citado na página 34.

PROTOSUPPLIES. **AD620 Instrumentation Amplifier Module**. 2025. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: <https://protosupplies.com/product/ad620-instrumentation-amplifier-module/>. Citado na página 43.

RANDON. **Energia Solar: O combustível para o novo amanhã**. 2024. Acesso em: 19 set. 2024. Disponível em: <https://randon.com.br/pt/tecnologia>. Citado na página 21.

RASPBERRY. **Raspberry Pi 4: Datasheet**. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf>. Citado na página 48.

RMASEY, James W.; THRELKELD, James L.; KUEHN, Thomas H. **Thermal Environmental Engineering**. [S.l.: s.n.], 1998. Citado na página 35.

SALES, Gabriel. **Em mais uma declaração ousada, Elon Musk diz que apenas uma instalação solar poderia fornecer energia para todo o território EUA**. 2024. Acesso em: 10 set. 2024. Disponível em: <https://br.ign.com/tech/129515/news/em-mais-uma-declaracao-ousada-elon-musk-diz-que-apenas-uma-instalacao-solar-poderia-fornecer-energia>. Citado na página 20.

SANTOS, Lucas; PEREIRA, Clayton José. Composição de cores através da calibração radiométrica e fotométrica de leds: teoria e experimento. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/Ms6RMysjPRwgTsYhM88Ntgd/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 17 set. 2024. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 36.

SILVA, Emerson Alves da. **Proposta de um modelo global não-linear para caracterização do comportamento elétrico de células fotovoltaicas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2019. Tese de Doutorado. Citado na página 24.

SOARES, Daniel dos Santos F. **Impactos da Dinâmica Atmosférica na Flutuação de Potência em Usinas Fotovoltaicas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2014. Dissertação de Mestrado. Citado na página 35.

SOLAR. **Inversor solar: o que é, como funciona e como escolher**. 2024. Acesso em: 25 set. 2024. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/inversor-solar-o-que-e>. Citado na página 33.

SOLAR, Canal. **Instrumentação aplicada à medição da radiação solar**. 2020. Acesso em: 22 set. 2024. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/instrumentacao-aplicada-a-medicao-da-radiacao-solar/>. Citado na página 29.

SOLAR, Canal. **Potência ou eficiência: o que é mais importante no módulo FV?** 2020. Acesso em: 29 ago. 2024. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/potencia-ou-eficiencia-o-que-e-mais-importante-no-modulo-fv/#:~:text=Os%20melhores%20m%C3%B3dulos%20fotovoltaicos%20comerciais,ser%20transformada%20em%20energia%20el%C3%A9trica>. Citado na página 21.

SOLAR, Instituto. **Conceitos de Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos**. 2020. Acesso em: 24 ago. 2024. Disponível em: <https://institutosolar.com/dimensionamento-de-sistemas-fotovoltaicos/>. Citado na página 25.

SOLAR, Portal. **O que é uma esfera de Dyson e qual o seu propósito**. 2024. Acesso em: 12 set. 2024. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/esfera-de-dyson>. Citado na página 20.

SOLENERG. **O módulo fotovoltaico para gerador solar de eletricidade**. 2024. Acesso em: 23 ago. 2024. Disponível em: <https://www.solenerg.com.br/o-modulo-fotovoltaico-para-gerador-solar-de-eletricidade/>. Citado na página 33.

USINAINFO. **Amplificador de Instrumentação AD620 3,5V 10V**. 2025. Acesso em: 17 jun. 2025. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/amplificadores-de-sinal/amplificador-de-instrumentacao-ad620-3v-12v-5983.html>. Citado na página 43.

VILELA, Waldeir Amaral. **Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 2010. Tese de Doutorado. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 31.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Conversor eletrônico de potência trifásico para sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2010. Tese de Doutorado. Citado na página 35.

WENDLING, Marcelo. **Semicondutores**. 2011. Acesso em: 23 set. 2024. Disponível em: <https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/1---semicondutores.pdf>. Citado na página 33.

WILLIAMS, Matt. **Why Build Megastructures? Just Move Planets Around to Make Habitable Worlds**. 2023. Acesso em: 12 set. 2024. Disponível em: https://www.universetoday.com/163245/why-build-megastructures-just-move-planets-around-to-make-habitable-worlds/#google_vignette. Citado na página 20.

XLSEMI. **XL6009E1: Datasheet**. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/download/1132229/XLSEMI/XL6009E1.html>. Citado na página 49.

ZEQIANG B.AND WENHUA, L.; YIZHUO, S.; XIAOLEI H.AND WEI, C. **Research on Performance Test Method of Silicon Pyranometer**. 11^a ieee international conference on electronic measurement instruments. ed. [S.l.: s.n.], 2013. Citado na página 30.

APÊNDICE A – CÓDIGO MAIN (LÓGICA DO DISPOSITIVO)

```
#pip install google-api-python-client
import smtplib
from email.mime.text import MIMEText
from email.mime.multipart import MIMEMultipart
from googleapiclient.discovery import build
from google.oauth2 import service_account
import os
from datetime import datetime
import csv
import time
import glob

os.system('modprobe w1-gpio')
os.system('modprobe w1-therm')

SCOPES = ['https://www.googleapis.com/auth/drive']
SERVICE_ACCOUNT_FILE = 'caminhodoarquivo.json'
PARENT_FOLDER_ID = "pastadodrive"

base_dir = '/sys/bus/w1/devices'
device_folder = glob.glob(base_dir + '/28*')[0]
device_file = device_folder + '/w1_slave'

import time

from ads1015 import ADS1015

CHANNELS = ["in0/ref", "in1/ref", "in2/ref"]

ads1015 = ADS1015()
chip_type = ads1015.detect_chip_type()

print("Found: {}".format(chip_type))

ads1015.set_mode("single")
ads1015.set_programmable_gain(2.048)
Gain = 2000/43.083
Gain_SP510 = 55.4606
```



```

Gain_SP215 = 30.9377

if chip_type == "ADS1015":
    ads1015.set_sample_rate(1600)
else:
    ads1015.set_sample_rate(860)

reference = ads1015.get_reference_voltage()

print("Reference voltage: {:.3f}v \n".format(reference))

def authenticate():
    creds = service_account.Credentials.from_service_account_file(
        SERVICE_ACCOUNT_FILE, scopes = SCOPES)
    return creds

def upload(file_path, file_name):
    creds = authenticate()
    service = build('drive', 'v3', credentials=creds)

    file_metadata = {
        'name' : file_name,
        'parents' : [PARENT_FOLDER_ID]
    }

    file = service.files().create(
        body = file_metadata,
        media_body = file_path
    ).execute()

def save_in_db(temp, s1, s2):
    file = datetime.now().strftime("%Y-%m-%d")
    db = '{}.csv'.format(file)
    timestamp = datetime.now().strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")
    # Verifica se o arquivo ja existe
    file_exists = os.path.exists(db)
    with open(db, mode='a', newline='') as file_csv:
        writer = csv.writer(file_csv)

        # Se o arquivo nao existir, escreve o cabecalho
        if not file_exists:

```

```

        writer.writerow(['timestamp', 'Temperature', '(S1)-SP510', '(S2)-SP215'])

    # Escreve a linha de dados
    writer.writerow([timestamp, temp, s1, s2])
return file

def check_log(file):
    with open("log.txt", mode="r+") as log:
        lines = log.readlines()
        last_line = lines[-1] if lines else None
    if not last_line in file:
        #precisa enviar
        print("Arquivo ainda nao enviado, enviando ao drive")
        with open("log.txt", mode="r+") as log:
            log.write(file)
        return True
    else:
        #ja enviado
        print("Arquivo ja enviado ao drive")
        return False

def linearize_SP215(x):
    return -0.0002042*(x**2) + 1.145916*x - 4.563143

def linearize_SP510(x):
    return 0.00015438*(x**2) + 0.975619*x + 2.58435

def read_temp():
    lines = read_temp_raw()
    try:
        while lines[0].strip()[-3:] != 'YES':
            time.sleep(0.2)
            lines = read_temp_raw()
        equals_pos = lines[1].find('t=')
        if equals_pos != -1:
            temp_string = lines[1][equals_pos+2:]
            temp_c = float(temp_string)/1000.0

```

```

        return temp_c
    except:
        return -1000

def read_temp_raw():
    try:
        f = open(device_file, 'r')
        lines = f.readlines()
        f.close()
        return lines
    except:
        return -1

def send_email():
    from_email = "exemplo@gmail.com"
    to_email = "projeto@exemplo.com"
    subject = "Aviso: Dados enviados ao Google Drive"
    body = "Os arquivos de dados coletados ja foram enviados para o
           Google Drive."

    msg = MIMEMultipart()
    msg['From'] = from_email
    msg['To'] = to_email
    msg['Subject'] = subject

    msg.attach(MIMEText(body, 'plain'))

    try:
        # Configuracao do servidor SMTP do Gmail
        server = smtplib.SMTP('smtp.gmail.com', 587)
        server.starttls()
        server.login(from_email, 'senhaemail')
        text = msg.as_string()
        server.sendmail(from_email, to_email, text)
        server.quit()
        print("E-mail enviado com sucesso!")
    except Exception as e:
        print(f"Erro ao enviar e-mail: {e}")

def dentro_do_horario():
    agora = datetime.now().time()

```

```

    inicio = datetime.strptime("05:30", "%H:%M").time()
    fim = datetime.strptime("18:30", "%H:%M").time()
    return inicio <= agora <= fim

def main():
    while True:
        if dentro_do_horario():
            print("Dentro do horario de operacao.")
            channels_values = []
            temperature = read_temp()
            print("Temperatura: ", temperature)

            for channel in CHANNELS:
                channels_values.append(ads1015.
                    get_compensated_voltage(channel=channel,
                        reference_voltage=reference))

                if "in0" in channel:
                    SP_510 = linearize_SP510(channels_values[-1]*
                        Gain_SP510)
                    print("{}: {:.6.3f} W/m ".format(channel,
                        SP_510))
                elif "in1" in channel:
                    SP_215 = linearize_SP215(channels_values[-1]*
                        Gain_SP215)
                    print("{}: {:.6.3f} W/m ".format(channel,
                        SP_215))

            print("")
            file = save_in_db(temperature, SP_510, SP_215)

            if datetime.now().time() >= datetime.strptime("18:30", "%H:%M").
                time() and datetime.now().time() < datetime.strptime("18:31",
                    "%H:%M").time():
                if check_log(file):
                    upload('{}.csv'.format(file), file)
                    print("Dados enviados para o Google Drive.")
                    send_email()

main()

```

Listing A.1 – Código Python utilizado no equipamento de coleta.

APÊNDICE B – ANÁLISE DA BASE DE DADOS COM PYTHON

```
#Bibliotecas necessarias
import pandas as pd #Ler e manipular .csv
import matplotlib.pyplot as plt #Criar graficos
import matplotlib.dates as mdates #Formatar e controlar horarios no
    eixo X
import seaborn as sns
import numpy as np

#Arquivos da base de dados
arquivos = [
    "https://github.com/NomeDoProjeto/dados/2025-05-21.csv",
    "https://github.com/NomeDoProjeto/dados/2025-05-22.csv",
    "https://github.com/NomeDoProjeto/dados/2025-05-23.csv",
    "https://github.com/NomeDoProjeto/dados/2025-05-24.csv",
    "https://github.com/NomeDoProjeto/dados/2025-05-25.csv",
    "https://github.com/NomeDoProjeto/dados/2025-05-26.csv",
    "https://github.com/NomeDoProjeto/dados/2025-05-27.csv",
    "https://github.com/NomeDoProjeto/dados/2025-05-28.csv",
    "https://github.com/NomeDoProjeto/dados/2025-05-29.csv",
    "https://github.com/NomeDoProjeto/dados/2025-05-30.csv",
    "https://github.com/NomeDoProjeto/dados/2025-05-31.csv",
    "https://github.com/NomeDoProjeto/dados/2025-06-01.csv",
    "https://github.com/NomeDoProjeto/dados/2025-06-02.csv",
    "https://github.com/NomeDoProjeto/dados/2025-06-03.csv",
    "https://github.com/NomeDoProjeto/dados/2025-06-04.csv",
    "https://github.com/NomeDoProjeto/dados/2025-06-05.csv",
    "https://github.com/NomeDoProjeto/dados/2025-06-06.csv",
    "https://github.com/NomeDoProjeto/dados/2025-06-07.csv",
    "https://github.com/NomeDoProjeto/dados/2025-06-08.csv",
    "https://github.com/NomeDoProjeto/dados/2025-06-09.csv"
]

energia_diaria = []

for url in arquivos:
    print(f"\nLendo o arquivo: {url.split('/')[-1]}")

    #Leitura dados
    dados = pd.read_csv(url, parse_dates=['timestamp'])
```

```

#Exclusao de horarios especificos (picos de temperatura -1000)
if '2025-05-26' in url:
    dados['timestamp'] = pd.to_datetime(dados['timestamp'])
    dados = dados[dados['timestamp'] != pd.to_datetime('
        2025-05-26 08:45:58')]
if '2025-05-21' in url:
    dados['timestamp'] = pd.to_datetime(dados['timestamp'])
    dados = dados[dados['timestamp'] != pd.to_datetime('
        2025-05-21 09:23:24')]

#Periodo do plot
dados = dados.set_index('timestamp').between_time('06:30', '
    17:30').reset_index().copy()

#Remocao de valores com tempo duplicado
dados = dados.drop_duplicates(subset=['timestamp'], keep='first
    ')

#Calculo media m vel
tam_janela = 1
dados['SP510_media'] = dados['(S1)-SP510'].rolling(window=
    tam_janela).mean()
dados['SP215_media'] = dados['(S2)-SP215'].rolling(window=
    tam_janela).mean()

#Taxa de correlacao
correlacao = dados[['SP510_media', 'SP215_media']].corr().iloc
    [0,1]
print(f"Correlacao entre os sensores: {correlacao:.3f}")

#Derivadas
t_sec = (dados['timestamp'] - dados['timestamp'].iloc[0]).dt.
    total_seconds() #Converter timestamp para segundos desde o
    inicio (antes de converter em segundos, era uma data e hora
    completa)
dados['derivada_SP510'] = np.gradient(dados['(S1)-SP510'].
    values, t_sec.values) #Calculo da derivada(W/m /s)
dados['derivada_SP215'] = np.gradient(dados['(S2)-SP215'].
    values, t_sec.values)

```

```

for sensor in ['SP510', 'SP215']:
    d = dados[f'derivada_{sensor}']
    print(f"\n Estat sticas      {sensor}")
    print(f"Max.: {d.max():.3f} W/m /s") #Pico mais alto de
        variacao da irradi ncia por segundo (valores altos
        mostram mudancas bruscas)
    print(f"M n.: {d.min():.3f} W/m /s") #Maior queda por
        segundo de irradi ncia observada (decl nio mais brusco
        )

#Energia
dados['intervalo'] = dados['timestamp'].diff().dt.total_seconds
    ().bfill()
#Calculo energia incremental (Wh/m ) para cada sensor
dados['energia_SP510'] = dados['(S1)-SP510'] * dados['intervalo
    '] / 3600
dados['energia_SP215'] = dados['(S2)-SP215'] * dados['intervalo
    '] / 3600
#Energia total acumulada
energia_total_SP510 = dados['energia_SP510'].sum()
energia_total_SP215 = dados['energia_SP215'].sum()

print(f"\nEnergia estimada por metro quadrado no dia {dados['
    timestamp'].dt.date.iloc[0]}:")
print(f"SP510: {energia_total_SP510:.3f} Wh/m ")
print(f"SP215: {energia_total_SP215:.3f} Wh/m ")

energia_diaria.append(pd.DataFrame({
    'dia': [dados['timestamp'].dt.date.iloc[0]],
    'energia_SP510': [energia_total_SP510],
    'energia_SP215': [energia_total_SP215]
}))

#Plot irradi ncia e temperatura
fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(13,6))
ax1.xaxis.set_major_formatter(mdates.DateFormatter('%H:%M'))
ax1.plot(dados['timestamp'], dados['SP510_media'], label='
    Sensor 1 (SP510)', color='black', linewidth=1.2)
ax1.plot(dados['timestamp'], dados['SP215_media'], label='
    Sensor 2 (SP215)', color='red', linewidth=1.2)
ax1.set_xlabel('Horario',fontsize=20)

```

```

ax1.set_ylabel('Irradi ncia (W/m )',fontsize=20)
ax1.grid(True, linestyle=':', linewidth=0.5, alpha=0.4)
ax1.legend(fontsize=20, loc='upper left')
ax1.tick_params(axis='both', labels=20)
ax2 = ax1.twinx()
ax2.plot(dados['timestamp'], dados['Temperature'], label='
    Temperatura ( C )', color='blue', linewidth=1)
ax2.set_ylabel('Temperatura ( C )',fontsize=20)
ax2.legend(fontsize=20, loc='upper right')
ax2.tick_params(axis='both', labels=20)
plt.title(f'Irradi ncia e Temperatura - {dados["timestamp"].dt
    .date.iloc[0]}', fontsize=22)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

#Plot das derivadas

```

plt.figure(figsize=(13,6))
plt.gca().xaxis.set_major_formatter(mdates.DateFormatter('%H:%M
    '))
plt.plot(dados['timestamp'], dados['derivada_SP510'], label='
    Derivada SP510', color='black')
plt.plot(dados['timestamp'], dados['derivada_SP215'], label='
    Derivada SP215', color='red')
plt.axhline(0, color='black', linestyle='--', linewidth=0.8)
plt.xlabel('Horario',fontsize=20)
plt.ylabel('Taxa de Variacao (W/m /s)',fontsize=20)
plt.title(f'Derivada da Irradi ncia - {dados["timestamp"].dt.
    date.iloc[0]}', fontsize=22)
plt.legend(fontsize=20,loc='upper left')
plt.xticks(fontsize=20)
plt.yticks(fontsize=20)
plt.grid(True, linestyle=':', alpha=0.3)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

#Grafico energia diaria

```

energia = pd.concat(energia_diaria).sort_values('dia')
#Maximos e m nimos (SP510)
max_sp510 = energia.loc[energia['energia_SP510'].idxmax()]
min_sp510 = energia.loc[energia['energia_SP510'].idxmin()]

```



```

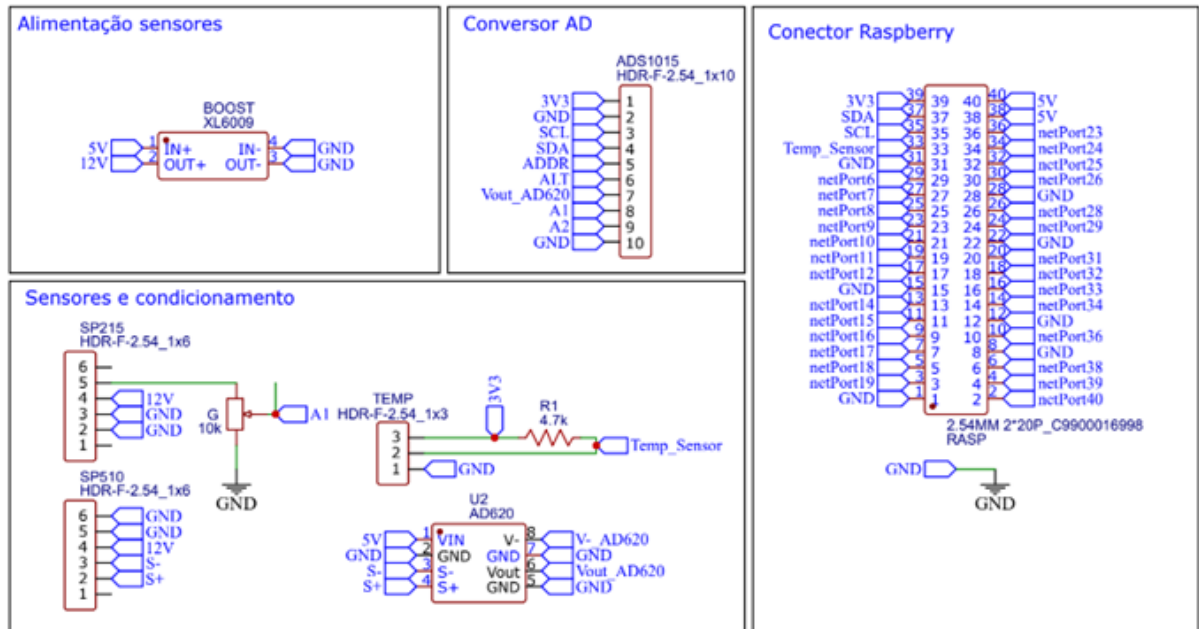
#Plot grafico de barras de energia
plt.figure(figsize=(15, 8))
largura = 0.35
x = np.arange(len(energia))
plt.bar(x - largura/2, energia['energia_SP510'], width=largura,
        label='SP510', color='black')
plt.bar(x + largura/2, energia['energia_SP215'], width=largura,
        label='SP215', color='red')
plt.xticks(x, energia['dia'].astype(str), rotation=50, fontsize=16)
plt.yticks(fontsize=16)
plt.xlabel('Dia', fontsize=18)
plt.ylabel('Energia Diaria (Wh/$(m$^2)$)', fontsize=18)
plt.title('Energia diaria acumulada por sensor', fontsize=20)
plt.legend(fontsize=18)
plt.grid(True, linestyle=':', alpha=0.7)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Listing B.1 – Código Python utilizado para analisar a base de dados gerada.

ANEXO A – ESQUEMÁTICO GERAL DO SISTEMA

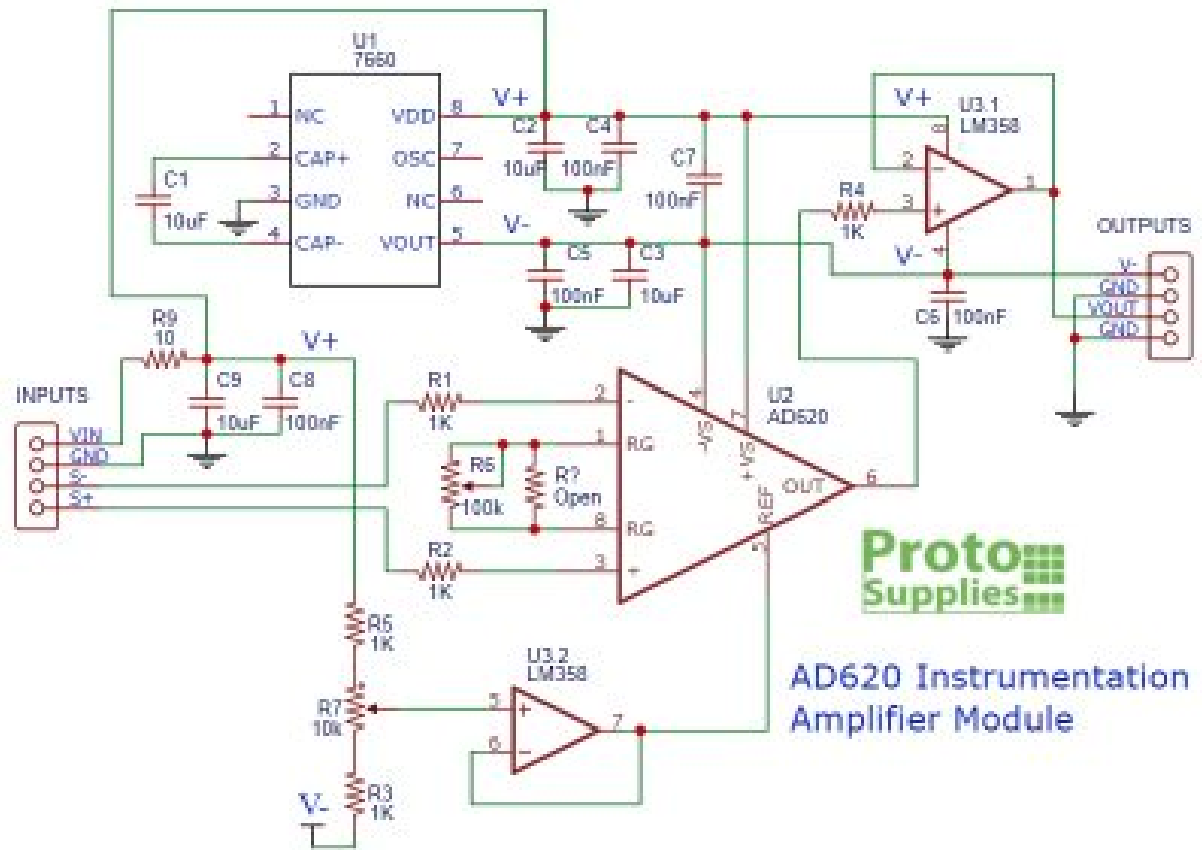
Figura 52 – Esquemático do circuito eletrônico utilizado.



Fonte: Lima (2024)

ANEXO B – ESQUEMÁTICO DO AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO

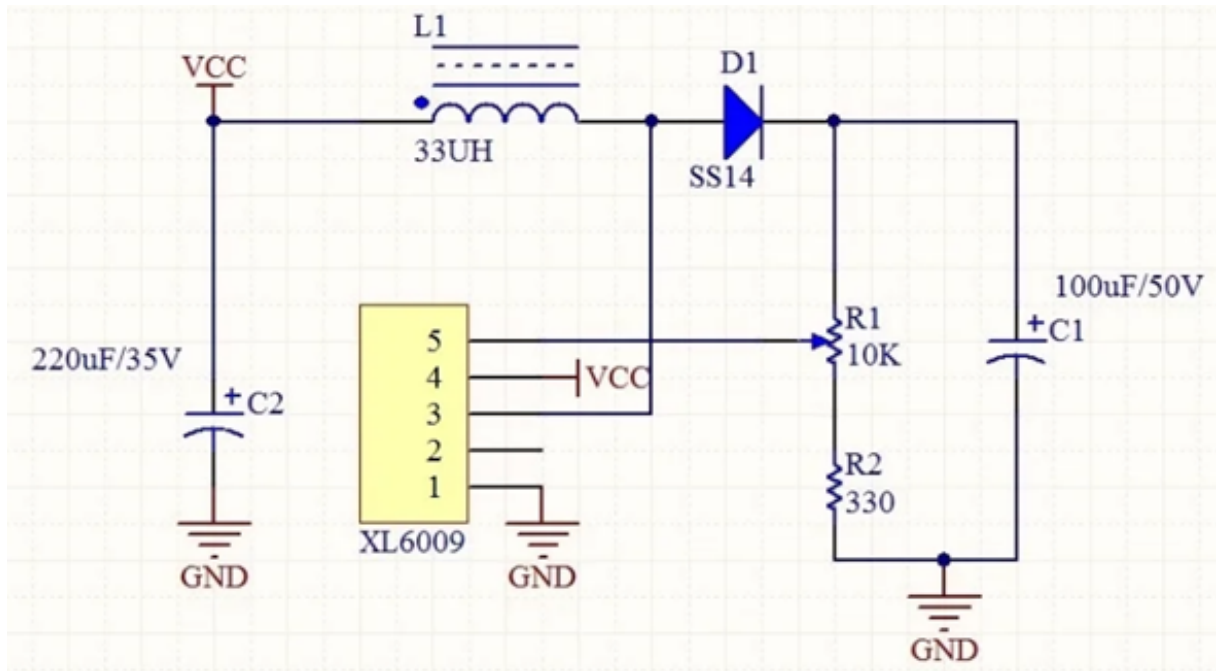
Figura 53 – Esquemático do módulo amplificador de instrumentação AD620.



Fonte: Proto Supplies (2025)

ANEXO C – ESQUEMÁTICO DO CONVERSOR BOOST

Figura 54 – Esquemático do conversor boost XL6009.



Fonte: Tono Eletrônica (2025)