



Universidade Federal da Bahia
Instituto de Computação / Escola Politécnica

Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica

**NOVO RADIÔMETRO SOLAR EM
TOPOLOGIA FLY-EYE PRODUZIDO POR
MANUFATURA ADITIVA.**

Juliane Grasiela de Carvalho Gomes

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Salvador
23 de agosto de 2024

JULIANE GRASIELA DE CARVALHO GOMES

**NOVO RADIÔMETRO SOLAR EM TOPOLOGIA FLY-EYE
PRODUZIDO POR MANUFATURA ADITIVA.**

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe
Co-orientador: Prof. Dr. Leandro do Rozário Teixeira

Salvador
23 de agosto de 2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Universitária de Ciências e Tecnologias Prof. Omar Catunda, SIBI – UFBA.

C633 Gomes, Juliane Grasiela de Carvalho

Novo radiômetro solar em topologia fly-eye produzido por manufatura aditiva/ Juliane Grasiela de Carvalho Gomes. – Salvador, 2024.

110 f.

Orientador: Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe

Co-orientador: Prof. Dr. Leandro do Rozário Teixeira

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Instituto de computação / Escola Politécnica, 2024.

1. Energia Solar. 2. Radiômetro Solar. 3. Fly-eye. I. Pepe, Iuri Muniz. II. Teixeira, Leandro do Rozário. III. Universidade Federal da Bahia. Instituto de Computação/ Escola Politécnica. IV. Título.

CDU:004.722:551.521.37

TERMO DE APROVAÇÃO

JULIANE GRASIELA DE CARVALHO GOMES

NOVO RADIÔMETRO SOLAR EM TOPOLOGIA FLY-EYE PRODUZIDO POR MANUFATURA ADITIVA.

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada adequada à obtenção do título de Mestre em Mecatrônica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia.

Salvador, 23 de agosto de 2024



Documento assinado digitalmente

IURI MUNIZ PEPE

Data: 28/08/2024 07:28:12-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>



Documento assinado digitalmente

LEANDRO DO ROZARIO TEIXEIRA

Data: 28/08/2024 07:33:00-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe
Universidade Federal da Bahia - UFBA

Prof. Dr. Leandro do Rozário Teixeira
Univ FBA



Documento assinado digitalmente

LUCIANA MARTINEZ

Data: 26/08/2024 13:56:02-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. Luciana Martinez
Universidade Federal da Bahia - UFBA

Prof. Dr. Kleber Freire da Silva
Universidade Federal da Bahia - UFBA



Documento assinado digitalmente

KLEBER FREIRE DA SILVA

Data: 27/08/2024 20:06:32-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Dedico essa conquista aos meus pais, minha irmã e meu namorado que sempre acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado força e sabedoria para passar por todas as etapas e concluir esse trabalho da melhor forma. Agradeço a Ele também a oportunidade de ter ao meu lado pessoas muito especiais que tornaram os dias mais leves e divertidos.

Aos meus pais por todos os ensinamentos e por estarem sempre ao meu lado, torcerem por mim e cuidarem de mim. À minha irmã por me ajudar quando eu estava atolada de coisas para fazer, por me segurar em minhas crises de ansiedade, por brigar comigo para eu me alimentar melhor e me cuidar, mesmo tendo tanta coisa para fazer. Obrigada aos três, eu amo vocês incondicionalmente.

Ao meu namorado, meu Stitch, meu porto seguro, meu abraço confortante, minha calma, meu companheiro de todas as horas, a pessoa que mais ouviu minhas reclamações, segurou meus choros, obrigada pela parceria, te amo muito.

Agradeço também a minha amiga/irmã de todas as horas, Lore, que sempre se fez presente seja nos momentos felizes, seja nos momentos tristes, que me deu tantos conselhos, tantos abraços, aguentou meus choros e desesperos, recebeu várias mensagens com reclamações, muito obrigada.

Ao meu orientador, o Prof Dr. Iuri Pepe por ser meu pai no trabalho e, juntamente com meu co-orientador, o Prof. Dr. Leandro Teixeira, ter me ensinado tanto em todo esse tempo no LaPO e pela oportunidade de fazer esse mestrado. Obrigada também por todas as broncas que me ajudaram muito a amadurecer e começar a me tornar uma boa profissional.

Aos meus companheiros de mestrado, Mariana, Luiz Artur, Pedro e Rafael que me deram vários momentos divertidos e de reclamações no decorrer das disciplinas. Nós vencemos mesmo com o 0,1 a menos!

Não poderia esquecer dos meus amigos de LaPO, pessoas que se tornaram muito mais que amigos, minha segunda família. Obrigada pelos ensinamentos e momentos incríveis que passamos no laboratório.

Agradeço aos amigos do "Arvoredo" por me proporcionarem momentos de recuperação psicológica com todas as conversas, piadas e histórias contadas da melhor forma.

Aos amigos do Katet por estarem presentes, por todas as conversas, risadas e por todo o apoio.

A Gabi, a dona da risada mais gostosa, a menina mais elétrica que eu conheço e que fazia os problemas serem esquecidos durante as visitas a ela.

Às minhas amigas, Alana e Gabriela que mesmo longe sempre estão torcendo por mim e me dando força para seguir em frente.

À banca, pela disponibilidade e sugestões.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

"Nada vai mudar se você não fizer algo. Portanto, levante-se e lute por aquilo que deseja conquistar."
Shimizu Chan

—

RESUMO

A utilização da geração solar vem sendo cada vez mais difundida no Brasil nos últimos anos, por ser uma forma de geração limpa, além do fato de o Brasil está localizado em local onde a irradiância solar é propícia à produção de energia elétrica. Para que o sistema fotovoltaico tenha um bom desempenho, a escolha do local onde ele será instalado é crucial. O trabalho propõe um radiômetro solar com topologia *fly-eye*, que se assemelha a um olho de mosca. Essa técnica, que utiliza contribuições da natureza como inspiração ao desenvolvimento tecnológico, é chamada biomimética. O radiômetro desenvolvido possui escala reduzida, permitindo uma maior mobilidade do equipamento e versatilidade da estrutura já que é modelada utilizando manufatura aditiva e tem a facilidade de montagem e desmontagem, além de possuir um piranômetro comercial como auto calibrador das células. Com o equipamento, é possível conhecer a dinâmica da radiação solar em períodos diferentes do ano e atestar que o local onde se pretende instalar um sistema de geração fotovoltaica é favorável para se ter o desempenho esperado do sistema. Esse equipamento é um aprimoramento do trabalho do discente Lucas Barbosa da Silva.

Palavras-chave: ENERGIA SOLAR, RADIÔMETRO SOLAR, FLY-EYE.

ABSTRACT

The use of solar generation has been increasingly widespread in Brazil in recent years due to it being a clean generation method, as well as the fact that Brazil is located in a region where solar irradiance is conducive to electricity production. For a photovoltaic system to perform well, the choice of location for its installation is crucial. This work proposes a solar radiometer with a fly-eye topology, resembling the eye of a fly. This technique, which draws inspiration from nature for technological development, is called biomimetics. The developed radiometer is of a reduced scale, allowing for greater mobility of the equipment and versatility of the structure since it is modeled using additive manufacturing and is easy to assemble and disassemble. It also includes a commercial pyranometer as a self-calibrator for the cells. With this equipment, it is possible to understand the dynamics of solar radiation during different times of the year and to confirm that the location where a photovoltaic generation system is intended to be installed is favorable for achieving the expected system performance. This equipment is an improvement on the work of student Lucas Barbosa da Silva.

Keywords: SOLAR ENERGY, SOLAR RADIOMETER, FLY-EYE.

SUMÁRIO

Capítulo 1—Introdução	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 HIPÓTESE DO TRABALHO	2
1.3 OBJETIVOS	2
1.3.1 Objetivo geral	2
1.3.2 Objetivos específicos	2
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
Capítulo 2—Revisão Bibliográfica	5
2.1 RADIAÇÃO SOLAR	5
2.1.1 Radiometria Solar	8
2.2 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	10
2.3 MANUFATURA ADITIVA	14
2.4 TRABALHOS CORRELATOS	16
Capítulo 3—Materiais e Métodos	19
3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA	19
3.2 SENSORES UTILIZADOS	22
3.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	25
3.4 ESCOLHA DO MATERIAL USADO NA ESTRUTURA DO <i>FLY-EYE</i>	30
3.5 ESTRUTURA MECÂNICA	32
3.6 BANCO DE CARGA RESISTIVA E FILTRO RC	40
3.7 DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE ABERTURA DO RADIÔMETRO <i>FLY-EYE</i>	42
3.8 TESTE DO RADIÔMETRO EM BANCADA	43
3.9 INSTALAÇÃO DO EQUIPAMENTO EM SÍTIO EXPERIMENTAL . .	46
3.10 CALIBRAÇÃO DAS CÉLULAS	47
3.11 METODOLOGIA PARA AS MEDIDAS	49
Capítulo 4—Resultados e Discussão	51
4.1 BANCO DE CARGA RESISTIVA E FILTRO RC	51
4.2 DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE ABERTURA DO RADIÔMETRO <i>FLY-EYE</i>	53
4.3 TESTE DO RADIÔMETRO EM BANCADA	58

4.4	CALIBRAÇÃO DAS CÉLULAS	61
4.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	63
4.5.1	Análise de irradiância a partir das condições climáticas do dia . .	63
4.5.2	Análise da média de irradiância por semana	67
4.5.3	Análise da média de irradiância por mês	70
Capítulo 5	—Conclusões	79
5.1	CONCLUSÕES	79
5.2	TRABALHOS FUTUROS	81

LISTA DE FIGURAS

2.1	Componentes da radiação solar.	6
2.2	Movimento da Terra em relação ao Sol.	8
2.3	Representação gráfica (a) e exemplo de um pireliômetro (b).	9
2.4	Piranômetro de Termopilha.	9
2.5	Piranômetro Fotovoltaico.	10
2.6	Estrutura de bandas de energia em condutores, semicondutores e isolantes.	11
2.7	Junção pn de uma célula solar.	12
2.8	Circuito elétrico equivalente de uma célula solar.	13
2.9	Tecnologias de fabricação de células solares: (a) Célula de silício monocristalino (b) Célula de silício policristalino e (c) Célula de filme fino.	14
2.10	Principais etapas de produção de peças modeladas em 3D.	15
3.1	Detector <i>fly-eye</i> desenvolvido neste trabalho.	20
3.2	Diagrama do Sistema de aferição da irradiância solar desenvolvido neste trabalho.	21
3.3	Resposta espectral de células de silício.	22
3.4	Célula de Silício policristalino AK Solar 30 x 30 mm.	23
3.5	Simulador solar móvel utilizado para as medidas de tensão elétrica das células: (a) fonte de alimentação do simulador (b) matriz de LEDs.	24
3.6	Piranômetro ALS20.	24
3.7	(a) Microcontrolador <i>Raspberry Pi Pico Zero</i> (b) Multiplexador 74HC4067 utilizados.	25
3.8	Diagrama da conexão do microcontrolador e multiplexadores com as células solares.	26
3.9	Aba de monitoramento dos dados em contagem de ADC da IHM desenvolvida.	27
3.10	Aba de monitoramento dos dados de irradiância da IHM desenvolvida.	28
3.11	Comportamento das células solares para o <i>rib</i> 1.	29
3.12	Mapa de calor: distribuição da irradiância solar no radiômetro.	30
3.13	<i>Ribs</i> no início do teste de exposição ao Sol.	31
3.14	<i>Ribs</i> após o teste de exposição ao Sol: (a) <i>rib</i> em material PLA (b) <i>rib</i> em material PLA revestido com tinta spray com proteção UV e (c) <i>rib</i> em material ASA	32
3.15	Angulação utilizada para acomodação das células.	33
3.16	Vista frontal <i>ribs</i> : (a) Desenho técnico (b) Peça impressa.	34
3.17	Vista superior do <i>rib</i> : (a) Desenho técnico (b) Peça impressa.	34
3.18	Vista lateral do <i>rib</i> : (a) Desenho técnico (b) Peça impressa.	35

3.19	Vista isométrica da peça central: (a) Desenho técnico (b) Peça impressa.	35
3.20	Vista frontal da peça central: (a) Desenho técnico (b) Peça impressa. . .	36
3.21	Vista inferior da peça central: (a) Desenho técnico (b) Peça impressa. . .	36
3.22	Disposição dos canais do radiômetro <i>fly-eye</i>	37
3.23	Fixação do sistema de condicionamento de sinal e conversor analógico-digital na caixa de comando elétrico.	38
3.24	Fixação do computador e filtro de linha na caixa de comando elétrico. . .	39
3.25	Sistema de aquisição pronto para instalação.	39
3.26	Aparato utilizado para determinação da curva I x V para a célula solar AK Solar utilizada no <i>fly-eye</i> : (1) Fonte de luz incidente com ajuste de foco (2) Célula solar testada (3) Década variável de resistores (4) Multímetro para a leitura da fotocorrente da célula (5) Multímetro para leitura da tensão na célula (6) Fonte de alimentação e ajuste de intensidade do LED. . . .	40
3.27	Sistema utilizado para teste externo de resistência de carga.	41
3.28	Diagrama do aparato experimental utilizado para a determinação do ângulo de abertura do equipamento.	42
3.29	Aparato experimental utilizado para a determinação do ângulo de abertura do <i>fly-eye</i> e do piranômetro ALS20.	43
3.30	Diagrama com disposição dos anéis de células do <i>fly-eye</i>	44
3.31	Simulador solar fixo de bancada, aparato utilizado para validação do equipamento para pequenas distâncias.	45
3.32	<i>fly-eye</i> instalado no terraço do Instituto de Física da UFBA.	46
3.33	Sistema de aquisição de dados acomodado em área coberta.	47
3.34	Células utilizadas para a calibração de cada <i>rib</i>	49
4.1	Curvas de calibração obtidas para os resistores de 270 Ω e 50 Ω , respectivamente.	51
4.2	Curvas de calibração obtidas para o resistor de 15 Ω	52
4.3	Curva I x V obtida para uma das células solares utilizadas.	52
4.4	Curva intensidade de corrente normalizada versus ângulo de incidência do feixe de luz.	53
4.5	Vista lateral do <i>fly-eye</i>	55
4.6	Ângulo de abertura do <i>fly-eye</i> para as atenuações de -4dB e -3dB, respectivamente.	55
4.7	Ângulo de abertura do <i>fly-eye</i> para as atenuações de -2dB, -1,5dB e -1dB, respectivamente.	56
4.8	Ângulo de abertura do radiômetro ALS20.	57
4.9	Resultado do teste em laboratório para os três anéis de sensores.	58
4.10	Diferença de irradiância entre o piranômetro central e a média da irradiância medida pelo 1° anel de sensores.	59
4.11	Irradiância medida pelas células solares dividido pela irradiância obtida pelo piranômetro ALS20.	60
4.12	Resultado médio do segundo teste em bancada para o 1° anel de sensores.	61
4.13	Curva de calibração de um dos <i>ribs</i> do <i>fly-eye</i>	62

4.14 Dia ensolarado de outono no hemisfério Sul, 20/06/2024: (a) mapa de calor (b) gráfico da média de irradiância por anel.	63
4.15 Dia chuvoso de outono no hemisfério Sul, 25/05/2024: (a) mapa de calor (b) gráfico da média de irradiância por anel.	64
4.16 Dia nublado de outono no hemisfério Sul, 07/06/2024: (a) mapa de calor (b) gráfico da média de irradiância por anel.	64
4.17 Mapa de calor 20/06/2024 a cada 2h.	65
4.18 Mapa de calor 25/05/2024 a cada 2h.	66
4.19 Mapa de calor 07/06/2024 a cada 2h.	67
4.20 Média de irradiância medida no piranômetro ALS20 em comparação com a média de todos os canais em função da semana.	68
4.21 Distribuição de irradiância para as 15 semanas de medidas.	69
4.22 Distribuição de irradiância média medida pelo <i>fly-eye</i> em função do período do dia na semana 1.	70
4.23 Média da irradiância medida no piranômetro ALS20 comparado com a média de irradiância de todos os canais em função do mês de aquisição.	71
4.24 Média da irradiância medida no piranômetro ALS20 comparado com a média de irradiância de todos os canais em função do mês de aquisição.	72
4.25 Distribuição da irradiância média medida pelo <i>fly-eye</i> por mês.	73
4.26 Distribuição da irradiância média medida pelo <i>fly-eye</i> em função do período do dia em abril.	74
4.27 Distribuição da irradiância média medida pelo <i>fly-eye</i> em função do período do dia em maio.	75
4.28 Distribuição da irradiância média medida pelo <i>fly-eye</i> em função do período do dia em junho.	76
4.29 Distribuição da irradiância média medida pelo <i>fly-eye</i> em função do período do dia em julho.	77

LISTA DE TABELAS

3.1	Dias contabilizados para análise.	50
3.2	Intervalo de dias das semanas consideradas para análise.	50
4.1	Ângulo de abertura para uma célula solar nos diferentes limiares de atenuação.	54

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A demanda por energia renovável aliada à diversificação das matrizes energéticas aumentou ao longo dos últimos anos no Brasil. Sabe-se que o Sol é uma fonte de energia renovável e, portanto, as pesquisas voltadas à conversão da energia luminosa em energia elétrica têm crescido.

O Brasil possui um grande potencial para a geração fotovoltaica quando comparado a outros países. O aproveitamento desse potencial para suprir a demanda do país e diminuir a pegada de carbono nacional, tornando a geração de energia elétrica mais sustentável, é de suma importância (PEREIRA et al., 2017; ENERGÉTICA, 2020).

A conversão de energia solar em energia elétrica é realizada por dispositivos fotovoltaicos. O efeito fotovoltaico ocorre quando os fótons que incidem no material têm energia suficiente para arrancar elétrons da camada de valência levando-os à camada de condução, gerando fotocorrente.

A quantidade de radiação solar que chega à superfície terrestre não é fixa. Ela varia de forma diária e anual, dependendo da movimentação da Terra em relação ao Sol, além de variar por conta das condições climáticas como chuva e nebulosidade. Por isso, a avaliação dessa radiação é de grande importância para análise do melhor lugar para instalação de painéis fotovoltaicos, de forma a obter uma conversão de energia solar em elétrica eficiente, além de permitir estudar o potencial de geração de determinada localidade ou região.

A radiometria solar refere-se ao estudo dos parâmetros que relacionam a radiação eletromagnética proveniente do Sol, com o potencial de geração de energia elétrica. Por exemplo, é possível, com auxílio de instrumentos de medida adequados, avaliar a eficiência óptica e elétrica de células solares no ambiente laboratorial ou em campo. Com esse propósito, foi desenvolvido por Silva (2022), um radiômetro com diâmetro de cerca de

600 mm, utilizando dezessete células solares do tipo filme fino, com junção de CdTe/CdS para realizar o rastreamento da radiação solar, desprovido de partes móveis.

Quando da prototipagem de dispositivos que requerem componentes mecânicos, o processo de fabricação conhecido como manufatura aditiva vem sendo muito utilizado. Segundo Pereira (2022), impressoras 3D vem sendo utilizadas para imprimir desde casas, até partes do corpo humano.

A impressão 3D pode lançar mão de três técnicas principais: (i) métodos baseados em extrusão; Fabricação por Filamento Fundido(FFF) (ii) métodos à base de pó; *Selective Laser Sintering* (SLS) (iii) métodos baseados em fotopolimerização; *Stereolithography* (SLA) (BARCZWSKI et al., 2022).

Nos métodos baseados em extrusão, o principal processo utilizado é o FFF. Nesse tipo de técnica há uma grande variedade de materiais que podem ser utilizados nas impressões, além de flexibilidade em termos de dimensões de impressão (BARCZWSKI et al., 2022). Os materiais que são mais utilizados nesse tipo de técnica são o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Ácido Polilático (PLA) e o Acrilonitrila Estireno Acrilato (ASA) (KUNKEL et al., 2020).

1.2 HIPÓTESE DO TRABALHO

A hipótese assumida neste trabalho é que é possível desenvolver um radiômetro solar com tamanho reduzido utilizando manufatura aditiva. Tal radiômetro será capaz de realizar a medida da irradiância solar local, segundo os pontos cardeais e colaterais, assegurando menor peso e maior mobilidade do equipamento.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O trabalho ora apresentado tem como objetivo geral projetar, desenvolver e construir um detector de irradiância solar com topologia *fly-eye* fabricado por impressora 3D, com possibilidade de auto calibração dos sensores e um sistema de aquisição utilizando um *Raspberry Pi Pico Zero*.

1.3.2 Objetivos específicos

Para tal objetivo, duas macro etapas foram seguidas: A primeira foi a concepção do radiômetro, desde a estrutura mecânica, elétrica até o desenvolvimento do *hardware* e *software* para aquisição dos dados solarimétricos. Na segunda etapa foi feita a aferição de dados de irradiância solar por um período de no mínimo dois meses e a posterior

análise desses dados. Sendo assim, os objetivos específicos foram subdivididos de acordo com essas etapas.

Macro etapa 1:

- Projetar, desenvolver e montar a estrutura mecânica, elétrica e de cabeamento de um rastreador solar com topologia *fly-eye*;
- Realizar teste de resistência à exposição ao Sol dos possíveis materiais usados na fabricação da estrutura do radiômetro para balizar a escolha do mesmo;
- Realizar a escolha das melhores células solares para compor o radiômetro;
- Projetar, desenvolver e montar um sistema de aquisição de dados;
- Validar o equipamento em bancada;
- Calibrar as células solares usadas no radiômetro;
- Instalar em campo o equipamento para a aferição de dados de irradiância solar;
- Fazer uma campanha de medição de no mínimo dois meses, dados que serão analisados e discutidos com o objetivo de demonstrar o funcionamento do radiômetro desenvolvido.

Macro etapa 2:

- Realizar a aferição da irradiância solar durante as diferentes horas do dia, durante no mínimo dois meses e posterior análise dos resultados gerais obtidos.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho consta de 5 capítulos, o primeiro é a presente introdução, onde foi possível dar uma visão geral do problema a ser abordado e dos objetivos do trabalho.

No segundo capítulo é feita a revisão bibliográfica. Nele é discutida a radiação solar, a física dos semicondutores e a geração de corrente fotovoltaica. Em seguida, foram abordados pontos importantes sobre a radiometria solar e a manufatura aditiva.

O terceiro capítulo se refere aos materiais utilizados no desenvolvimento do trabalho e a metodologia aplicada para tanto.

No quarto capítulo são apresentados os testes de resistência à exposição ao Sol dos materiais utilizados na impressão 3D da estrutura do *fly-eye* proposto, os testes de conceito do equipamento, o teste de funcionamento da Interface Homem-Máquina (IHM) desenvolvida e os resultados da aferição de irradiância solar. No quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho realizado e os trabalhos a serem realizados no futuro.

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica. Nele foram abordados os pontos mais importantes para entendimento do tema proposto.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar é definida como a energia liberada pelo Sol e transmitida na forma de radiação eletromagnética. Ela é de extrema importância para os processos biológicos, físicos, atmosféricos e como fonte de energia renovável do planeta Terra.

A radiação que chega à superfície da Terra pode ser compreendida nas componentes direta, difusa e global. A radiação direta representa a porção da radiação que chega à Terra sem ter sido absorvida ou espalhada pelos processos dispersivos que ocorrem na atmosfera. Já a componente difusa compreende a radiação proveniente de todas as direções e que são resultantes dos processos de espalhamento que ocorrem na atmosfera. A soma resultante das parcelas direta e difusa da radiação solar é denominada radiação global (PEREIRA et al., 2017; PINHO; GALDINO, 2014). A Figura 2.1 apresenta essas componentes.

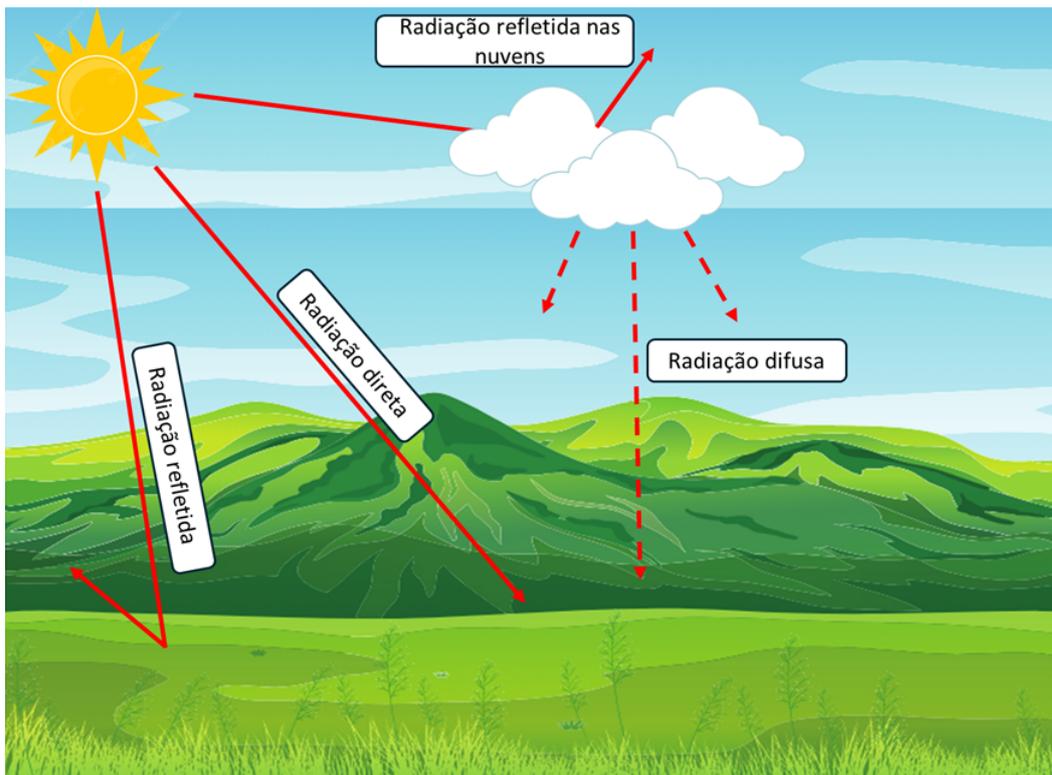


Figura 2.1 Componentes da radiação solar.
Fonte: Própria autora.

Segundo Mozeto (2001), Santos (2010), uma das funções da atmosfera é a proteção da Terra, isso porque ela absorve a maior parte da radiação do Sol, permitindo que apenas a radiação na faixa de 300-2500 nm (ultravioleta (UV), visível e infravermelho (IR)) chegue à superfície terrestre. Ao interagir com a atmosfera, a radiação solar sofre processos de atenuação, seja por absorção, difusão ou reflexão por elementos que constituem a atmosfera. Dentre esses elementos temos o vapor d'água (H_2O) que absorve a radiação infravermelha e é responsável pela formação das nuvens, o dióxido de carbono (CO_2), que similarmente ao vapor d'água, também absorvem a radiação infravermelha e o ozônio (O_3) que é responsável pela absorção de radiação ultravioleta (UV).

A atmosfera terrestre é dividida verticalmente em camadas, tendo como critério de definição dessas camadas aspectos como temperatura, composição química, propriedades elétricas, etc. As camadas atmosféricas e faixas de transição foram definidas como troposfera, tropopausa, estratosfera, estratopausa, mesosfera, mesopausa, termosfera, ionosfera e exosfera. A troposfera é a camada atmosférica que fica mais próxima da superfície da Terra, onde ocorrem os fenômenos meteorológicos e a diminuição da temperatura à medida que a distância da superfície terrestre aumenta. A tropopausa é uma região de transição entre a troposfera e a estratosfera, definida como uma zona de transição isotérmica. Na camada conhecida como estratosfera, a concentração de ozônio (O_3) é

máxima, enquanto a concentração de oxigênio (O_2) é bem reduzida. Essa porção é caracterizada pelo aumento da temperatura com o aumento da altitude pelo fato de que há a absorção da radiação ultravioleta pelo ozônio (SANTOS, 2010).

A mesosfera é a camada onde são encontradas as nuvens. Nela também ocorre a diminuição da temperatura com o aumento da altitude, isso porque há a diminuição de elementos responsáveis pela absorção de energia, como o ozônio. Na termosfera e nas camadas mais altas (ionosfera e exosfera) surgem espécies iônicas e atômicas. Na termosfera ocorre o aquecimento do ar que pode chegar a 1200°C por conta da absorção da radiação UV pelas moléculas de oxigênio e baixa densidade do ar (MOZETO, 2001; SANTOS, 2010).

Um dos fatores que é considerado para a análise da disponibilidade do recurso solar é a posição relativa entre a Terra e o Sol. A distância média entre esses dois astros é de cerca de 150 milhões de quilômetros, com ciclo completo de translação durando 365 dias solares. Segundo Santos (2019), neste período de tempo a distância varia entre $1,47 \times 10^8$ e $1,52 \times 10^8$ km, o que permite observar uma variação de irradiância solar no topo da atmosfera entre 1325 W/m^2 e 1412 W/m^2 . A irradiância solar é definida como a energia por unidade de tempo ou potência da luz por unidade de área e é medida em W/m^2 (DUFFIE; BECKMAN, 1980). Como consequência das atenuações que ocorrem nas camadas da atmosfera terrestre, a irradiância solar estimada em um dia claro de verão na superfície terrestre é de 1000 W/m^2 (SILVA, 2017).

A quantidade de radiação solar que chega à superfície da Terra é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre esse dois astros, o que provoca a variação da radiação durante o ano (SANTOS, 2019). No hemisfério Sul, a Terra tem maior proximidade com o Sol, em um período chamado de periélio, com máximo no início do mês de janeiro. A maior distância Sol-Terra acontece durante o afélio, que tem máximo no início do mês de julho.

A variação na duração do dia e na quantidade de energia solar incidente em um ponto específico da superfície terrestre é influenciada por dois ciclos distintos: o ciclo anual e o ciclo diário. O ciclo anual depende da inclinação do eixo da Terra em relação ao plano orbital do planeta ao redor do Sol, que é aproximadamente de $23,45$ graus. Esse movimento é conhecido como movimento de translação orbital. Já o ciclo diário está relacionado à rotação da Terra em torno do seu próprio eixo (movimento de rotação). O tempo de insolação do dia está ligado às estações do ano, determinadas pelos momentos de solstícios, quando dias e noites têm duração diferentes, e equinócios, quando o período diurno possui a mesma duração do período noturno (PEREIRA et al., 2017; SANTOS, 2019). O movimento da Terra em torno do Sol pode ser observado na Figura 2.2.

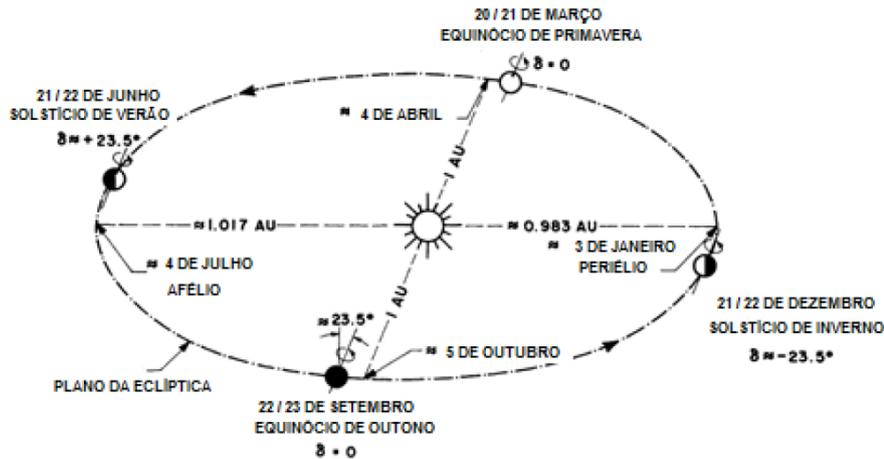


Figura 2.2 Movimento da Terra em relação ao Sol.
Fonte: (SANTOS, 2019)

2.1.1 Radiometria Solar

A radiometria é a técnica que se dedica à quantificação da radiação eletromagnética que incide sobre uma região, um corpo ou objeto. O uso da radiometria como medição é atribuída a Henrich Hertz em 1887 (VILELA, 2010).

A radiometria solar, ou seja, a medida da radiação solar global ou de suas componentes, é de extrema importância no estudo das condições climáticas e atmosféricas, sendo utilizada na agricultura e no planejamento de edificações, por exemplo. Além disso, são essenciais para o desenvolvimento de projetos que tem por objetivo captar e converter a energia solar. Estes dados podem ser utilizados na identificação do melhor local e posicionamento para a instalação de sistemas fotovoltaicos visando melhor aproveitamento desse recurso natural (PINHO; GALDINO, 2014).

Para a realização das medidas de irradiação solar, dois instrumentos são geralmente utilizados: o piranômetro, também conhecido como radiômetro e o pireliômetro. O piranômetro é responsável pela medida das radiações global e difusa, sendo que para essa última é necessário a utilização de um mecanismo de sombreamento sobreposto ao piranômetro. Este instrumento possui um campo de visão de 180° . O pireliômetro (Figura 2.3) é responsável por medidas da radiação direta. Para tanto, o elemento ativo é colocado no interior de um colimador de paredes enegrecidas, que conta com uma janela por onde a radiação solar entra (com abertura aproximada de 5°). Este colimador e sua abertura de entrada são capazes de assegurar que somente a luz que emana do disco solar seja considerada durante este tipo de medição (CALÇA, 2019).

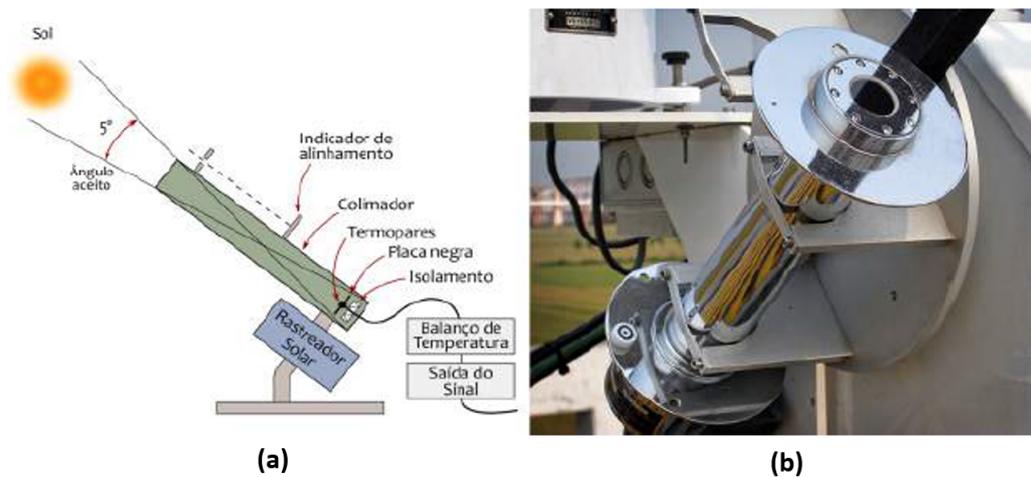


Figura 2.3 Representação gráfica (a) e exemplo de um pireliômetro (b).
Fonte: (PEREIRA et al., 2017)

Segundo Pinho e Galdino (2014) existem dois principais tipos de piranômetros. O piranômetro termoeletrico (Figura 2.4) utiliza uma termopilha como elemento sensor. Para simular um corpo negro, capaz de absorver de forma constante as diferentes componentes do espectro solar, essa termopilha é recoberta com uma camada enegrecida especial. A radiação é então convertida em calor e, posteriormente, transformada em uma corrente elétrica proporcional à irradiação incidente (PEREIRA et al., 2017).



Figura 2.4 Piranômetro de Termopilha.
Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014)

O segundo tipo de radiômetro é o piranômetro fotovoltaico (FV). Esse instrumento utiliza uma célula solar ou fotodiodo de pequenas dimensões. Em relação ao piranômetro de termopilha, o FV apresenta como vantagem um custo mais baixo, mas possui a desvantagem de ser menos preciso no que concerne a medição da irradiância em todo o espectro solar, isso por conta da limitação da sua resposta espectral, em geral variando entre 380 e 1100 nm para os fotodetectores de silício (PINHO; GALDINO, 2014). O piranômetro FV é apresentado na Figura 2.5.

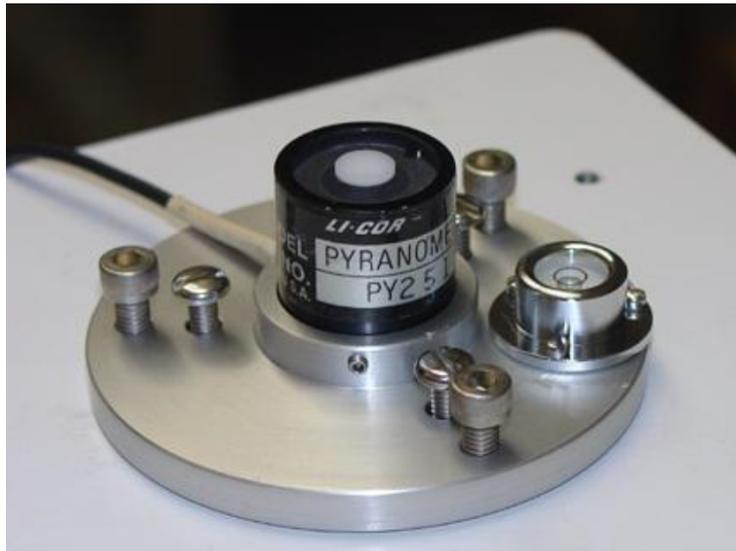


Figura 2.5 Piranômetro Fotovoltaico.
Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014)

2.2 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

A energia fotovoltaica é a energia produzida a partir da conversão da luz solar incidente em eletricidade. Para fazer essa conversão é utilizada, por exemplo, uma célula solar ou um fotodiodo, tais dispositivos obedecem ao princípio do efeito fotovoltaico (STAMBUK, 2017; GOMES et al., 2023).

De acordo com Gomes et al. (2023), o efeito fotovoltaico foi pela primeira vez observado por Edmund Becquerel em 1839, utilizando estruturas metálicas imersas em eletrólito líquido expostas à luz. As primeiras células solares surgiram a partir das pesquisas do engenheiro eletricitista Willoughby Smith, em 1873, que estudou o efeito fotovoltaico em semicondutores como selênio e óxido de cobre (SANTOS, 2019).

Semicondutores são materiais que tem suas propriedades elétricas alteradas pela absorção de energia externa. Estes materiais são eletricamente intermediários entre isolantes e condutores. Os semicondutores podem ser classificados no que concerne suas dopagens

como intrínsecos ou extrínsecos (SANTOS, 2019; BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

No diagrama de energia (Figura 2.6) deste tipo de material os elétrons ocupam os níveis de energia da banda de valência, que está totalmente preenchida à 0 K, separada da banda de condução, vazia nesta temperatura, por um espaço entre elas. Este espaço entre a banda de valência e a banda de condução é chamado de banda proibida ou em inglês, *band gap*. Esta banda é inexistente para os condutores, havendo um recobrimento entre a banda de valência e a banda de condução, enquanto que a banda proibida tem uma largura maior que 5 eV para os isolantes e menor que 5 eV para os semicondutores (CARNEIRO, 2010; CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

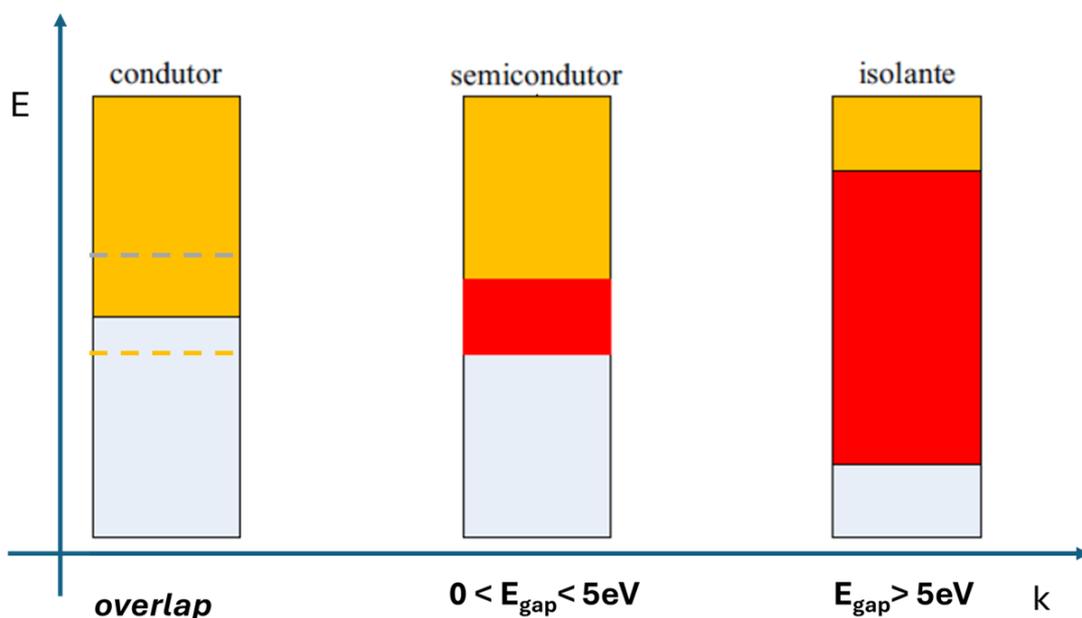


Figura 2.6 Estrutura de bandas de energia em condutores, semicondutores e isolantes.

Fonte: Adaptado (PINHO; GALDINO, 2014)

Os semicondutores intrínsecos são materiais puros e perfeitos, onde a condutividade elétrica é determinada pelas propriedades do material, como por exemplo o silício e o germânio (CARNEIRO, 2010; CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

Já os semicondutores extrínsecos são materiais onde impurezas foram inseridas na estrutura cristalina, processo conhecido como dopagem. Essas impurezas são responsáveis pelo comportamento elétrico do cristal, agora com excesso de elétrons ou de buracos, sendo classificados como semicondutores tipo n ou tipo p, respectivamente. (CALLISTER; RETHWISCH, 2016; CARNEIRO, 2010).

Quando há alteração na temperatura de um material semiconductor, é possível observar o aumento ou diminuição da condutividade destes materiais. No aquecimento, isso acontece por conta da excitação térmica dos elétrons da banda de valência que, ao superar a energia da banda proibida (*band gap*), passam para a banda de condução gerando lacunas ou buracos na banda de valência (PINHO; GALDINO, 2014; CARNEIRO, 2010).

As células solares são dispositivos semicondutores de caráter extrínseco formado pela junção entre a camada semicondutora do tipo n e a camada semicondutora tipo p, ou simplesmente junção pn (STAMBUK, 2017). Segundo Machado e Miranda (2015), quando uma junção pn se forma, um campo elétrico aparece na região da junção. Este campo elétrico é criado pela migração dos elétrons livres da região carregada negativamente (lado n) em direção à região carregada positivamente (lado p). Assim sendo, a região da junção é também uma região de depleção desprovida de cargas livres. A região de depleção que aparece ao redor da junção é também a região ativa da célula solar, onde os pares elétron-buraco criados pela absorção de fótons, de energia $h\nu$ superior a energia de E_{gap} são acelerados, elétrons na direção da camada dopada n e buracos na direção da camada p. A junção pn é mostrada na Figura 2.7.

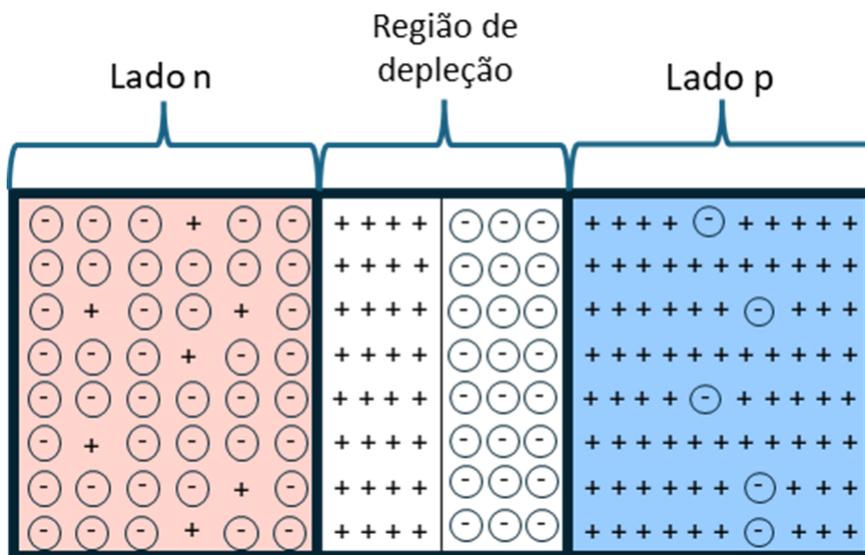


Figura 2.7 Junção pn de uma célula solar.

Fonte: Própria autora.

Uma célula solar pode ser representada pelo circuito equivalente mostrado na Figura 2.8. Segundo Pinho e Galdino (2014), a curva I-V de uma célula solar sofre influência da resistência em série (R_S) e da resistência em paralelo (R_{SH}) que aparecem neste modelo.

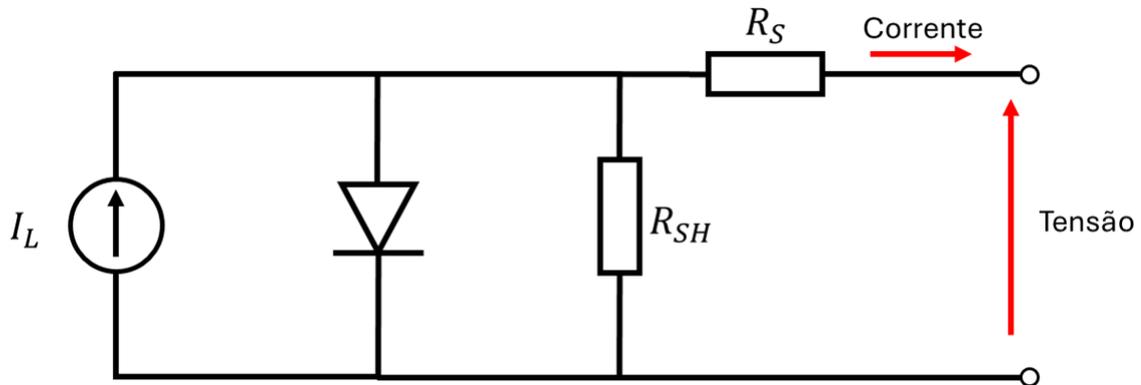


Figura 2.8 Circuito elétrico equivalente de uma célula solar.

Fonte: Própria autora.

A resistência R_S tem sua origem no material semiconductor que forma a célula, na resistência dos contatos metálicos de coleção das cargas e na resistência entre o contato metálico e a pastilha semicondutora. R_S pode reduzir a corrente de curto-circuito e o Fator de Forma (FF) da célula. O fator de forma pode ser entendido como o resultado da divisão da máxima potência gerada pela célula pelo produto da corrente de curto-circuito pela tensão de circuito aberto (HONSBURG; BOWDEN, 2018; PINHO; GALDINO, 2014).

Já a resistência R_{SH} , também chamada de resistência de *shunt*, é determinada pelos defeitos de fabricação. Se o valor de R_{SH} tende a zero as perdas de energia dentro da própria célula solar dominam a geração de corrente elétrica, criando um desvio da corrente gerada pela luz, o que reduz a tensão de circuito aberto da célula (HONSBURG; BOWDEN, 2018).

Ao longo do tempo, inúmeras tecnologias foram desenvolvidas para a produção de células solares. As células de silício monocristalino ou policristalino representam a primeira geração de tecnologia de células solares e, no mercado mundial, ainda hoje, guardam certa hegemonia. A segunda geração de células é composta pelas células de filme fino de materiais como telureto de cádmio (CdTe) ou disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS). Células solares dessas tecnologias são apresentadas na Figura 2.9 (SANTOS, 2019; STAMBUK, 2017).

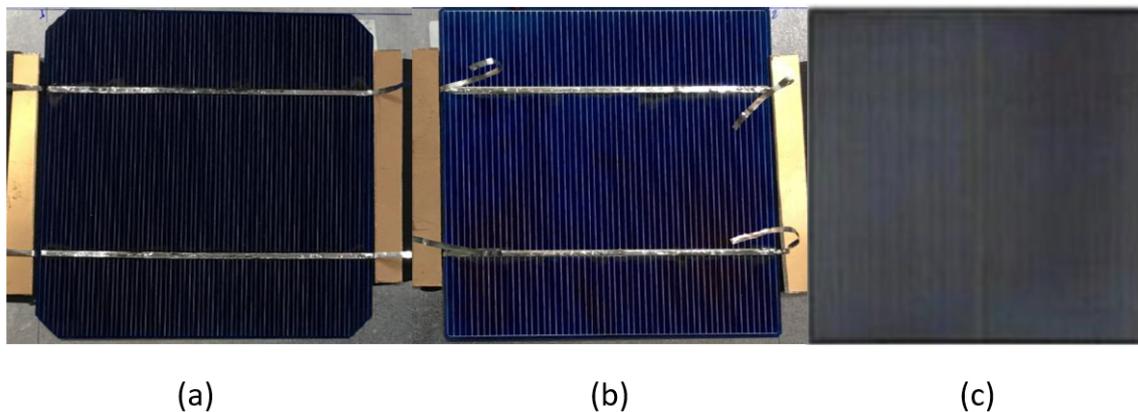


Figura 2.9 Tecnologias de fabricação de células solares: (a) Célula de silício monocristalino (b) Célula de silício policristalino e (c) Célula de filme fino.

Fonte: (SANTOS, 2019)

2.3 MANUFATURA ADITIVA

A Manufatura Aditiva (MA) é uma classe de processos que consiste na criação de objetos construídos camada por camada, diferentemente das metodologias de manufatura subtrativas que compreendem a remoção de materiais a partir de um bloco ou porção de matéria-prima. O processo da manufatura aditiva pode ser feito utilizando materiais como metais, polímeros, cerâmicas dentre outros (VEIT, 2018; PEREIRA, 2022).

Segundo Veit (2018), a manufatura aditiva ganhou destaque juntamente com a Indústria 4.0, porém esta tecnologia de produção de objetos e artefatos tem mais de 20 anos de história. Nos estágios iniciais, a manufatura aditiva foi empregada para a produção de protótipos conceituais e funcionais, originalmente chamada Prototipagem Rápida, evoluindo posteriormente para uma solução de manufatura digital direta, sendo aplicadas na produção de produtos finais, não se limitando a protótipos.

A história da impressão 3D teve seu início em meados de 1980, Chuck Hull foi o inventor da primeira impressora 3D. O dispositivo construído por Hull consistia em um sistema no qual a luz era direcionada para um tanque contendo um foto polímero, um material que passa do estado líquido para o estado sólido quando exposto à luz, podendo, assim, dar forma ao objeto a ser construído (PEREIRA, 2022).

A redução do número de etapas e processos na fabricação de um objeto, além da economia de material, são características fundamentais da manufatura aditiva. Dessa forma, essa técnica serve como ferramenta para projetistas produzirem protótipos de componentes, dispositivos e artefatos de forma rápida e eficiente, seja como forma de testá-los ou

para apresentá-los a pessoas de interesse (GIORDANO; ZANCUL; RODRIGUES, 2016).

Outra característica importante é o fato da manufatura aditiva facilitar a automação do processo de manufatura, diminuindo consideravelmente a necessidade de um operador especialista na produção da peça ou dispositivo, bastando para tanto que o usuário conheça as etapas de projeto, CAD e configuração da máquina e dos parâmetros para impressão (VOLPATO; CARVALHO, 2017).

Apesar de apresentar vantagens, Giordano, Zancul e Rodrigues (2016) citam fatores limitantes deste tipo de produção. Eles consideram que a manufatura aditiva proporciona uma menor precisão dimensional em comparação aos métodos convencionais de produção, além de uma seleção restrita de materiais, cores e opções de acabamento das superfícies dos artefatos impressos.

A produção de peças modeladas em 3D é feita seguindo as etapas: (i) modelagem 3D da peça em CAD, (ii) conversão desse modelo topológico para o formato (.stl) específico para manufatura aditiva, (iii) processo físico para a fabricação da peça (definição das estruturas de suporte, fatiamento e forma de deposição do material), (iv) impressão da peça e (v) pós-processamento, que pode envolver limpeza e acabamento da peça (VOLPATO; CARVALHO, 2017). As principais etapas do processo de manufatura aditiva são apresentadas na Figura 2.10.



Figura 2.10 Principais etapas de produção de peças modeladas em 3D.

Fonte: (RODRIGUES et al., 2017)

Alguns dos principais materiais utilizados na manufatura aditiva do tipo FDM (Fused Deposition Modeling) ou Modelagem por Deposição Fundida, são o PLA (Ácido

Polilático), o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) e o ASA (Acrilonitrila Estireno Acrilato). Cada um destes materiais possui características próprias e aplicações diversas (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017).

O PLA é o principal filamento utilizado na manufatura aditiva. O ácido polilático é um termoplástico biodegradável e atóxico e possui uma temperatura de impressão (entre 200°C e 210°C) menor que a do ABS (230°C). O PLA é considerado como o insumo mais fácil de trabalhar dentro da manufatura aditiva e pode ser utilizado em utensílios descartáveis, produtos de higiene, embalagens de alimentos, além da utilização em suturas e implantes cirúrgicos (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017; SANTOS et al., 2018).

Ainda segundo Besko, Bilyk e Sieben (2017), mesmo tendo várias possibilidades de utilização, esse material é quebradiço e seu uso deve ser evitado em peças que necessitam de resistência mecânica e em peças que serão empregadas em temperaturas acima de 60° C.

Outro material bastante utilizado é o polímero ABS (Acrilonitrila Butadieno e Estireno), outro tipo de termoplástico. O acrilonitrila é responsável pela resistência térmica e química, além de durabilidade e estabilidade quando exposto à alta temperatura, o butadieno proporciona uma boa resistência a impacto e o estireno tem uma ótima resistência mecânica, sendo de fácil manuseio (SANTOS et al., 2018). Algumas desvantagens desse material são o fato de ele ser derivado do petróleo e não ser biodegradável e a geração de fumaça durante a impressão, sendo essa fumaça considerada tóxica (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017).

O ASA, material semelhante ao ABS, é um outro polímero que vem ganhando destaque dentro da MA. Ele também apresenta alta resistência a impacto, mas o que o difere do ABS é a sua capacidade de resistir à radiação Ultravioleta (UV), permitindo a sua utilização na fabricação de peças que ficarão expostas ao Sol. Uma desvantagem é, assim como o ABS, a geração de vapores tóxicos durante a impressão (PAIS, 2022).

2.4 TRABALHOS CORRELATOS

Alguns trabalhos na área de radiometria solar foram desenvolvidos nos últimos anos. No trabalho desenvolvido por Vera, Busso e Benítez (2005), o sensor utilizado foi um fotodiodo comercial fixado em uma estrutura cilíndrica de alumínio e como tampa protetora e difusor de luz, uma tampa plana de teflon com 3 mm de espessura. Freire (2008) desenvolveu um piranômetro fotovoltaico utilizando um fototransistor à base de silício instalado em um corpo de topologia cônica em PVC e base de sustentação em alumínio.

Em seu trabalho, Vilela (2010) desenvolveu um radiômetro solar que utilizava como elemento sensor uma única célula solar de silício monocristalino e topologia de radiômetros comerciais. Possui estrutura cilíndrica e o topo dessa estrutura cônica com elemento sen-

sor apenas no centro do equipamento.

Já Paula et al. (2020) desenvolveu um piranômetro que utilizava como sensor uma célula solar de silício policristalino, com corpo cilíndrico em plástico tipo Thecnyl [®](teflon), base em PVC e difusor de luz em acrílico.

Silva (2022) em seu trabalho desenvolveu um radiômetro solar em topologia *fly-eye* utilizando 17 células solares de filme fino como sensor de irradiância distribuídas ao longo de um domo de acrílico de 600 mm de diâmetro.

Os quatro primeiros pesquisadores citados utilizaram em seus trabalhos uma topologia cilíndrica e apenas um sensor central, sendo utilizados células solares, fototransistores ou fotodiodos como elemento sensor. O último pesquisador utilizou uma topologia diferente dos demais, a topologia *fly-eye*, com um número de sensores bem maior que os outros citados.

O trabalho aqui proposto tem por objetivo a construção de um radiômetro solar com a mesma topologia utilizada por Silva (2022), mas com o número de sensores maior, diâmetro do equipamento menor e utilizando manufatura aditiva na sua estrutura mecânica.

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos utilizados nos ensaios realizados.

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O radiômetro ora apresentado (Figura 3.1) foi concebido com o objetivo de aprimorar o trabalho desenvolvido por Lucas Barbosa da Silva (SILVA, 2022), em seu mestrado. Tal detector foi projetado com o propósito de se construir um equipamento de menor diâmetro e volume, e mais leve que seu predecessor, contando com maior quantidade de sensores, além de um dispositivo que permite sua auto calibração ou calibração de campo, montado no centro deste radiômetro.

A estrutura mecânica do detector foi modelada em CAD e impressa utilizando filamento ASA. O equipamento é formado por uma peça central poligonal e oito estruturas do tipo costelas (em Inglês, *ribs*) montadas ao redor deste polígono. Os *ribs*, como serão chamadas, são estruturas responsáveis por acomodar os elementos sensores. Como sensores de irradiância solar, foram utilizadas células solares de silício policristalino com dimensões 30 x 30 mm, sendo acomodadas três células em cada *rib*.



Figura 3.1 Detector *fly-eye* desenvolvido neste trabalho.
Fonte: Própria autora.

Para o sistema de aquisição de dados foi utilizado o microcontrolador *Raspberry Pi Pico Zero* e dois multiplexadores analógicos com 16 canais que possibilitam a leitura dos sinais que serão convertidos de analógico para digital. Antes da conversão, a fotocorrente gerada pela absorção da luz nas células solares foi transformada em tensão elétrica por resistores de carga com 1% de precisão de seus valores nominais. Além disso, um filtro passa baixa, passivo RC de 1^a ordem foi adicionado para condicionar o sinal de tensão adquirido.

A IHM, responsável pela aquisição e monitoramento dos dados foi escrita em linguagem Matlab®. Esta interface possibilita a leitura dos valores de ADC e irradiância para cada sensor e o acompanhamento gráfico das informações obtidas ao longo do dia solar. A partir dos dados lidos, arquivos diários em formato texto são gerados, utilizando-se o software. O diagrama do sistema de aferição da irradiância solar desenvolvido neste trabalho é apresentado na Figura 3.2.

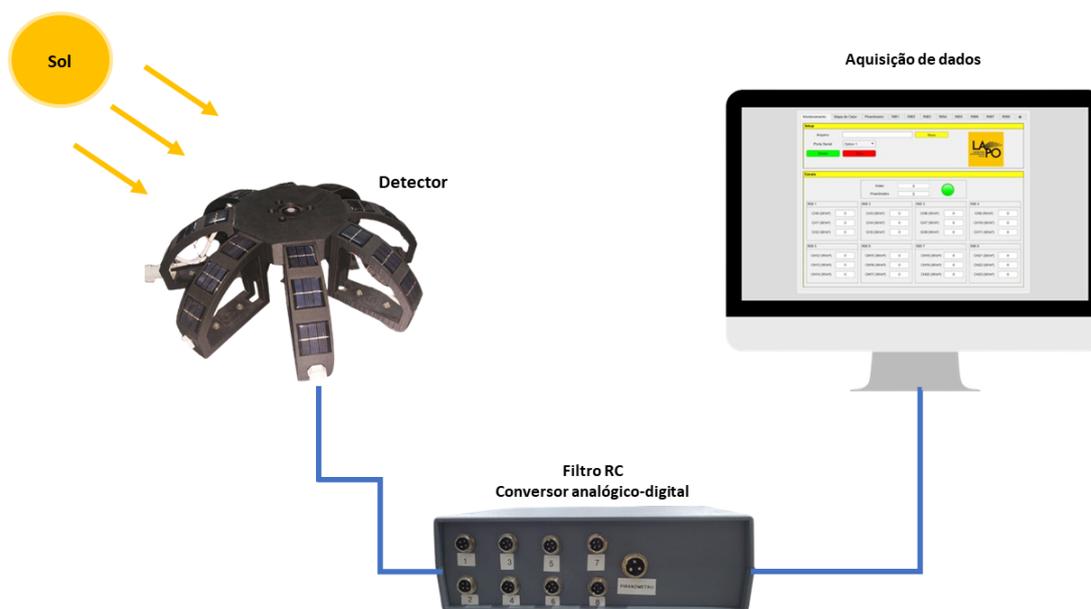


Figura 3.2 Diagrama do Sistema de aferição da irradiância solar desenvolvido neste trabalho.
Fonte: Própria autora.

Os testes que concernem a escolha, calibração e os estudos da performance das células solares, que compõem o radiômetro com topologia *fly-eye*, assim como os testes de performance deste detector, descritos neste capítulo, podem ser divididos em dois grupos. No primeiro grupo ficam os testes de bancada das células solares e os testes de bancada do *fly-eye* já montado e atuando como radiômetro multicanal. Enquanto no segundo grupo figuram os testes de campo do detector desenvolvido.

É imperativo ressaltar que nos testes de bancada, onde a irradiância constante é requerida, foram usados três diferentes tipos de simuladores solar: (i) simulador solar móvel, para recobrimento da célula solar a ser testada, baseado em uma matriz de LED *wide-spectrum* de 40 W, (ii) arranjo de simulador solar baseado em LED branco (6500k), com foco e intensidade ajustáveis e década variável de resistores 0 a 9999.9 Ω para determinação da curva $I \times V$ de células solares e (iii) simulador solar com intensidade de iluminação e base fixas, mas com altura (iluminador - dispositivo em teste) variável, baseada em refletor e matriz de LED branco (6500K) de 100 W.

Na medida em que os diferentes testes forem sendo apresentados, uma descrição mais apurada, além dos detalhes, será feita para cada um destes aparatos de apoio. Cabe chamar a atenção para o fato de que o segundo grupo de testes, feitos em campo, usou a luz natural do Sol como fonte de estímulo para as medições descritas.

3.2 SENSORES UTILIZADOS

Os dispositivos fotovoltaicos utilizados como sensores foram células de silício. Essas células têm a resposta espectral, em suas diferentes tecnologias, como apresentado na Figura 3.3. A resposta espectral de uma célula solar é definida como o quociente entre a fotocorrente gerada pela célula e a radiação solar incidente sobre ela (SANTOS, 2019).

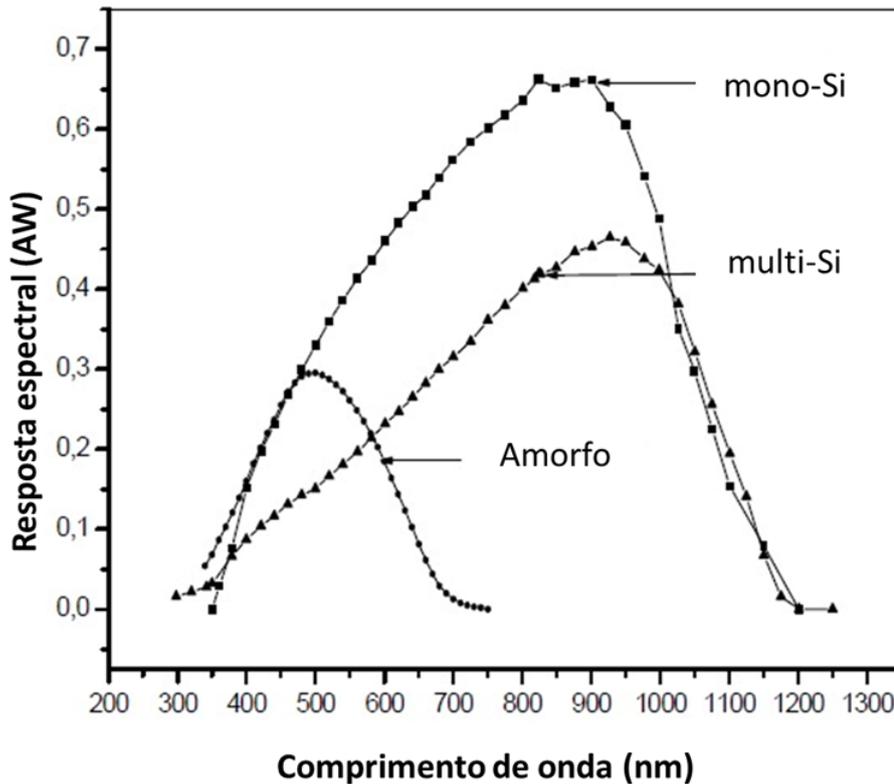


Figura 3.3 Resposta espectral de células de silício.
Fonte: (CHEGAAR; MIALHE, 2008)

As células escolhidas para compor o radiômetro *fly-eye* foram células do tipo silício policristalino (multi-Si) da marca AK Solar, modelo 30 x 30 mm, capaz de gerar 1,5 V de tensão de circuito aberto e 60 mA de corrente de curto-circuito. A célula utilizada é apresentada na Figura 3.4.

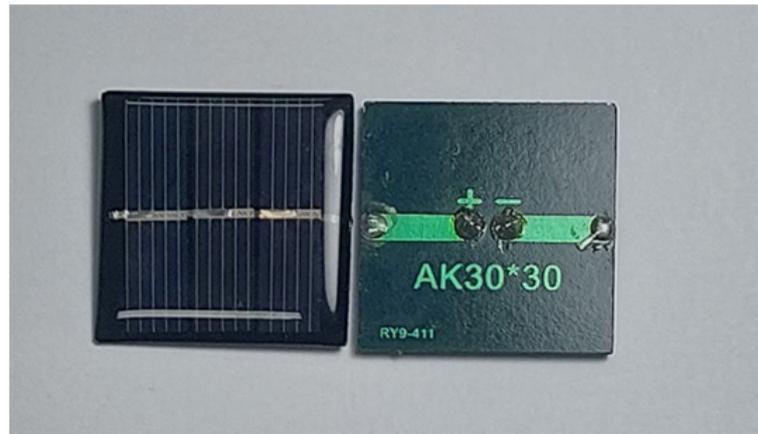


Figura 3.4 Célula de Silício policristalino AK Solar 30 x 30 mm.
Fonte: Própria autora.

A escolha das células utilizadas no radiômetro foi feita a partir de um conjunto de 64 células do mesmo modelo e fabricante, para tanto foram realizadas medidas da tensão de circuito aberto para cada célula deste conjunto. Depois, a média dessas medidas foi calculada e as células com as maiores médias de tensão foram escolhidas para compor o radiômetro, mantendo as outras células como reserva.

Para o estudo em bancada do funcionamento das células solares escolhidas para compor o radiômetro montado foi utilizado o simulador solar portátil, de recobrimento da célula a ser testada. Esse simulador é formado por uma matriz de LED *wide-spectrum* e é capaz de emitir luz com comprimento de onda entre 550 e 750 nm, com irradiância de $900\text{W}/\text{m}^2$ à 33 mm da superfície iluminada. Neste simulador a matriz de LED *Wide Spectrum* foi montado sobre um dissipador de calor, sendo que um micro-ventilador serve para o arrefecimento dos LEDs dessa matriz. Esta irradiância é obtida para uma corrente de polarização de 1000 mA e foi conseguida a partir de *led driver* da marca YX e potência máxima 40 W. A tensão de polarização do *led driver* é ajustada automaticamente entre 24 e 40 V para conseguir o máximo de potência elétrica entregue à matriz de LEDs (GOMES et al., 2023). Esse aparato foi construído no Laboratório de Propriedades Ópticas (LaPO) e pode ser visto na Figura 3.5.

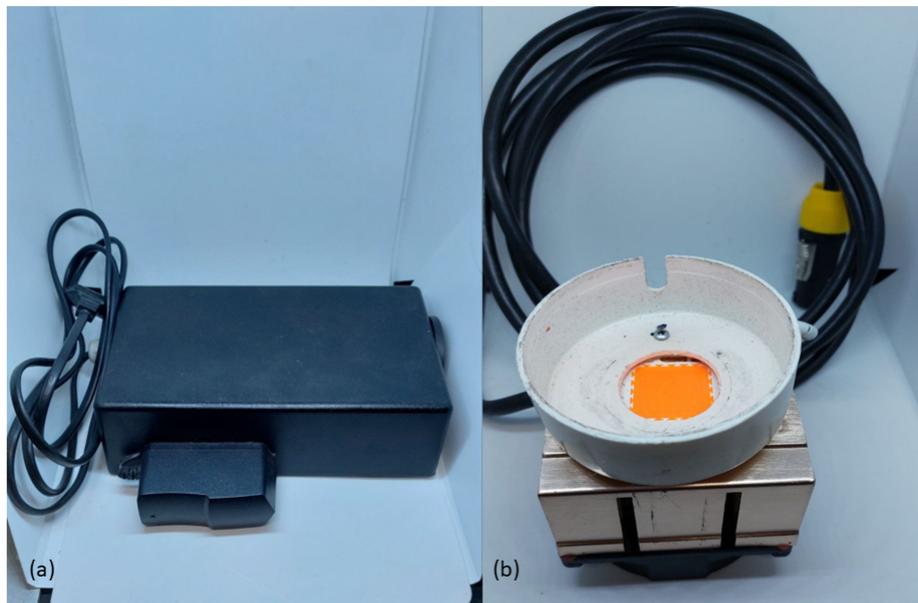


Figura 3.5 Simulador solar móvel utilizado para as medidas de tensão elétrica das células: (a) fonte de alimentação do simulador (b) matriz de LEDs.

Fonte: (GOMES et al., 2023)

O outro sensor utilizado no *fly-eye* é o radiômetro de modelo ALS20 (Figura 3.6) da marca Nzluliyuan. Este modelo pode medir uma iluminância máxima de 200.000 lux, gerando uma tensão de saída máxima de 2 Vdc. A iluminância é definida como o fluxo luminoso de luz visível distribuído em um ângulo sólido de um esferorradiano (CAMPOS, 2017).



Figura 3.6 Piranômetro ALS20.
Fonte: (TECHNOLOGY, 2019)

3.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema de aquisição de dados pode ser dividido em duas partes, o *hardware* e o *software*. O *hardware* foi construído com auxílio de uma placa universal em fibra de vidro utilizando um microcontrolador *Raspberry Pi Pico Zero* com 12 bits de resolução e tensão de referência de 3,3 V, conectado a dois multiplexadores CD74HC4067 com 16 canais. A utilização dos multiplexadores foi necessária pelo fato do microcontrolador não possuir portas analógicas suficientes para a leitura das 24 células solares do equipamento e do radiômetro central. O microcontrolador e o multiplexador utilizados podem ser vistos na Figura 3.7.

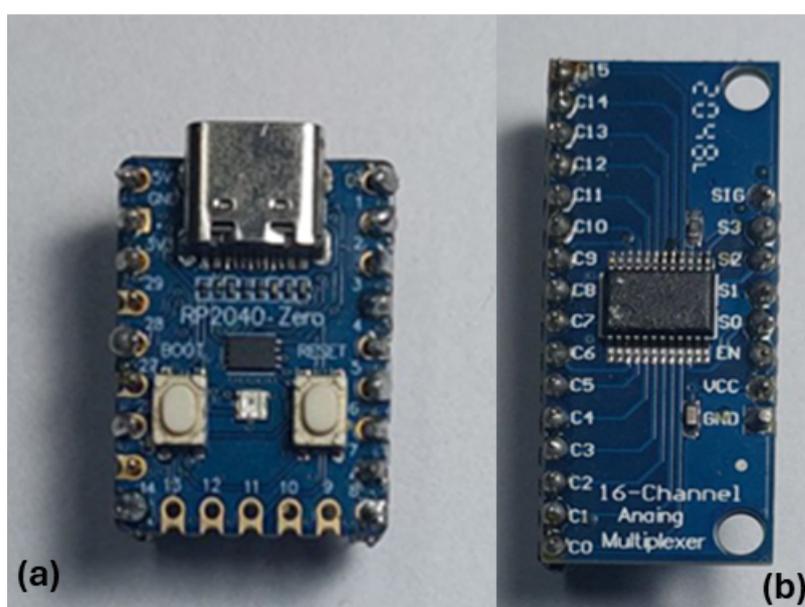


Figura 3.7 (a) Microcontrolador *Raspberry Pi Pico Zero* (b) Multiplexador 74HC4067 utilizados.

Fonte: Própria autora.

Além do *Raspberry Pi Pico Zero* e dos multiplexadores, 25 conectores do tipo molex com 2 vias foram utilizados para a conexão entre o microcontrolador e as células solares. Os resistores de carga foram montados em paralelo com os conectores molex juntamente com o filtro RC projetado. O diagrama de conexão entre o microcontrolador, os multiplexadores e as células solares é apresentado na Figura 3.8.

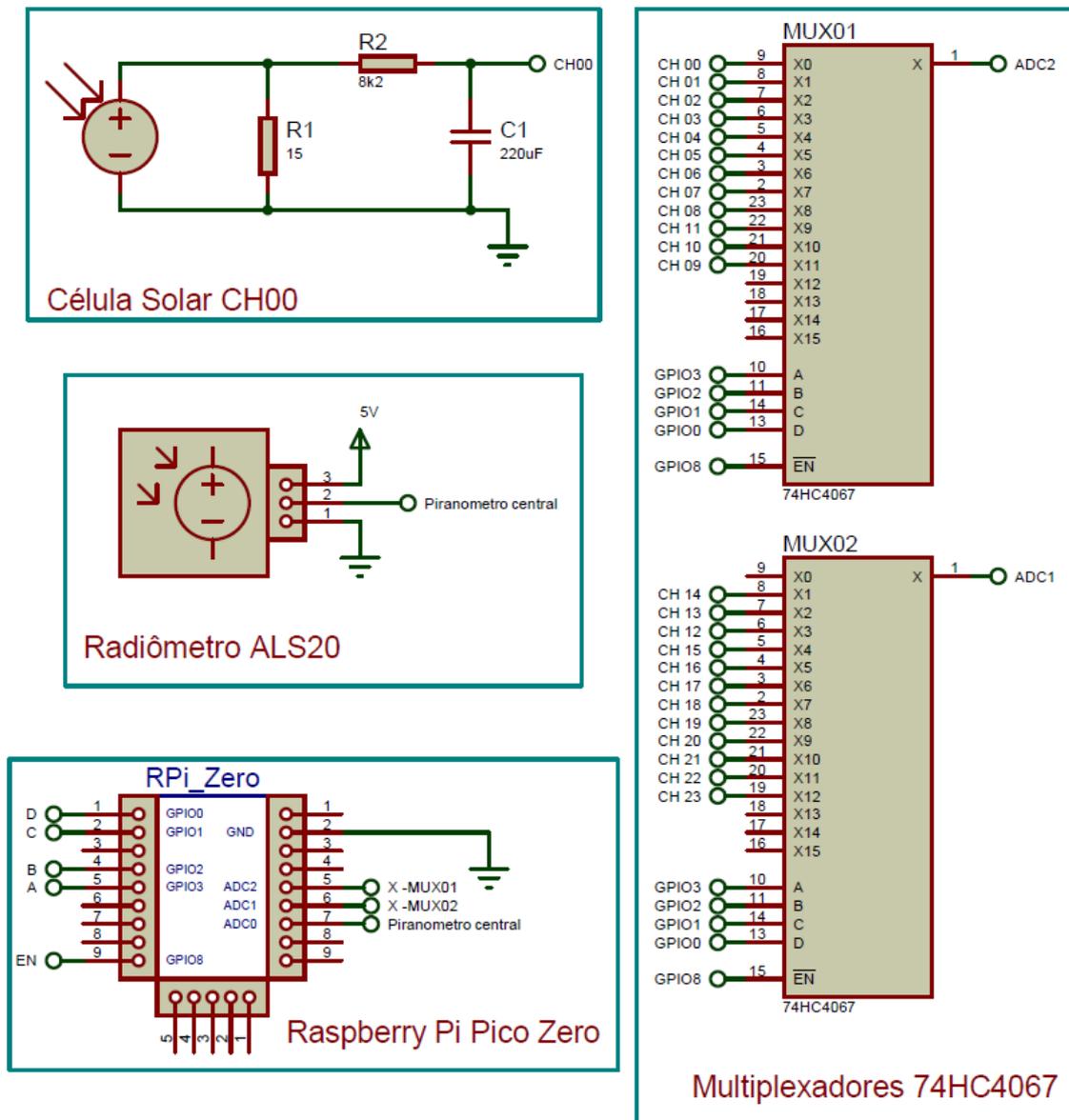


Figura 3.8 Diagrama da conexão do microcontrolador e multiplexadores com as células solares.
Fonte: Própria autora.

Depois de montado na placa perfurada, o circuito foi acomodado em uma caixa patola PB 220/70 de dimensões 228 x 190 x 71 mm. Nessa caixa foram fixados 8 conectores do tipo mike-aviação com 4 vias para a ligação de cada *rib* ao microcontrolador. O pino de número um serviu para conectar a célula a -10° de cada *rib*, o segundo e o terceiro pinos serviram para conectar a célula a -30° e -50° , respectivamente, e o quarto pino para conexão comum da saída de tensão negativa das células. Um conector mike-aviação com 3 vias foi utilizado para conexão do piranômetro ALS20 ao microcontrolador. O pino

de número um serviu para a conexão da alimentação positiva externa do piranômetro, o pino de número dois, para a conexão com a porta ADC do microcontrolador e o pino de número três foi conectado à saída de tensão negativa da fonte externa de alimentação utilizada para o piranômetro.

O *firmware* para aquisição dos dados foi desenvolvido em linguagem *micropython* utilizando o *software* Thonny®. Esta camada de *software* permitiu a leitura, em unidades de contagem de ADC (valores da conversão analógico-digital), da queda de tensão gerada pela fotocorrente de cada uma das células solares. Após essa leitura, já na interface homem máquina (IHM), construída em linguagem Matlab®, usando o *toolbox* do *designapp*, foi possível apresentar a leitura de cada canal de ADC, e efetuar as devidas conversões de unidades. A janela da IHM é apresentada na Figura 3.9.

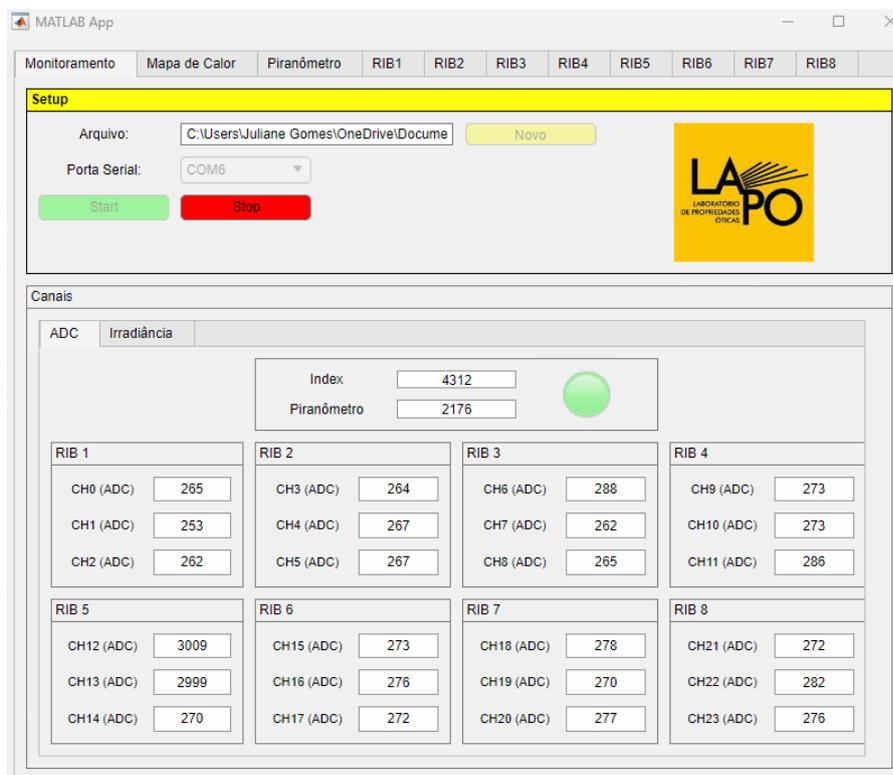


Figura 3.9 Aba de monitoramento dos dados em contagem de ADC da IHM desenvolvida.
Fonte: Própria autora.

Assim, a IHM também permite a visualização da leitura da irradiância (Figura 3.10), em W/m^2 , para cada célula solar em cada *rib*.

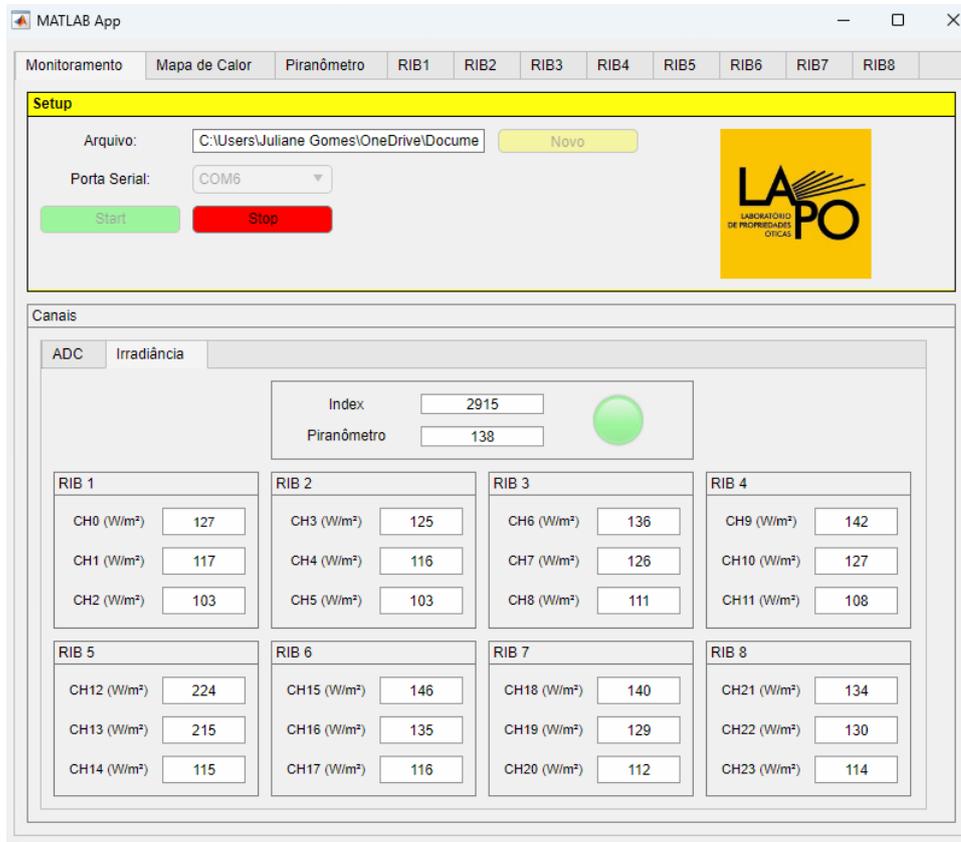


Figura 3.10 Aba de monitoramento dos dados de irradiância da IHM desenvolvida.

Fonte: Própria autora.

O comportamento do piranômetro central, além do comportamento de cada célula de cada *rib*, ao longo do tempo, também pode ser observado através da IHM desenvolvida. Ainda na Figura 3.10 são apresentadas outras abas dessa IHM nomeadas: mapa de calor, piranômetro, além dos *ribs* de 1 a 8. A figura 3.11 apresenta o conteúdo da aba do *rib* número um.

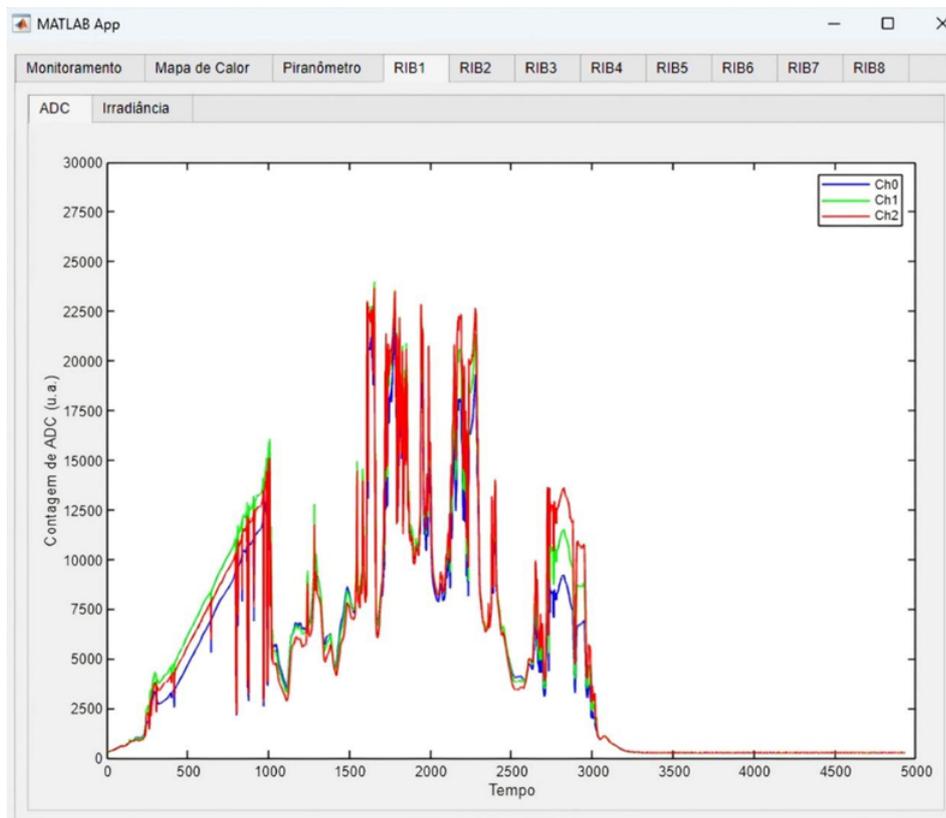


Figura 3.11 Comportamento das células solares para o *rib* 1.
Fonte: Própria autora.

Já a Figura 3.12 mostra o mapa de calor da distribuição de irradiância nos diversos canais do *fly-eye*. Similarmente, ainda nessa aba o comportamento de cada *rib* pode ser acompanhado em tempo real.

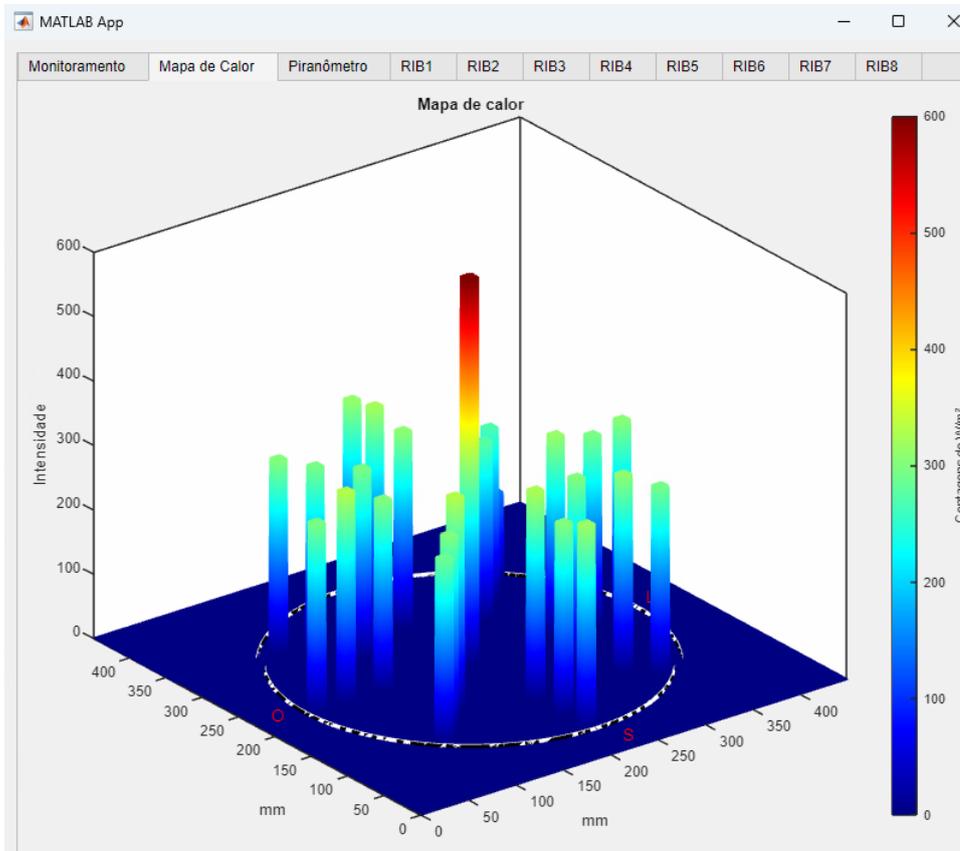


Figura 3.12 Mapa de calor: distribuição da irradiância solar no radiômetro.
Fonte: Própria autora.

Os valores em contagens de ADC de cada canal são salvos em arquivos de texto gerados pelo software, para posterior análise.

3.4 ESCOLHA DO MATERIAL USADO NA ESTRUTURA DO FLY-EYE

Para confirmar a resistência dos materiais utilizados na impressão 3D da estrutura do radiômetro desenvolvido, foi realizado um teste de exposição ao Sol com três *ribs*, sendo um deles feito em PLA, o segundo também em PLA, mas revestido com tinta spray resistente à radiação UV e o terceiro feito em material ASA.

Os três *ribs* foram fixados por *cabie tie* no terraço do Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente II (CIEnAm II), expostos ao Sol, entre os dias 13/12/2022 e 01/02/2023. A Figura 3.13 mostra as peças expostas às intempéries.

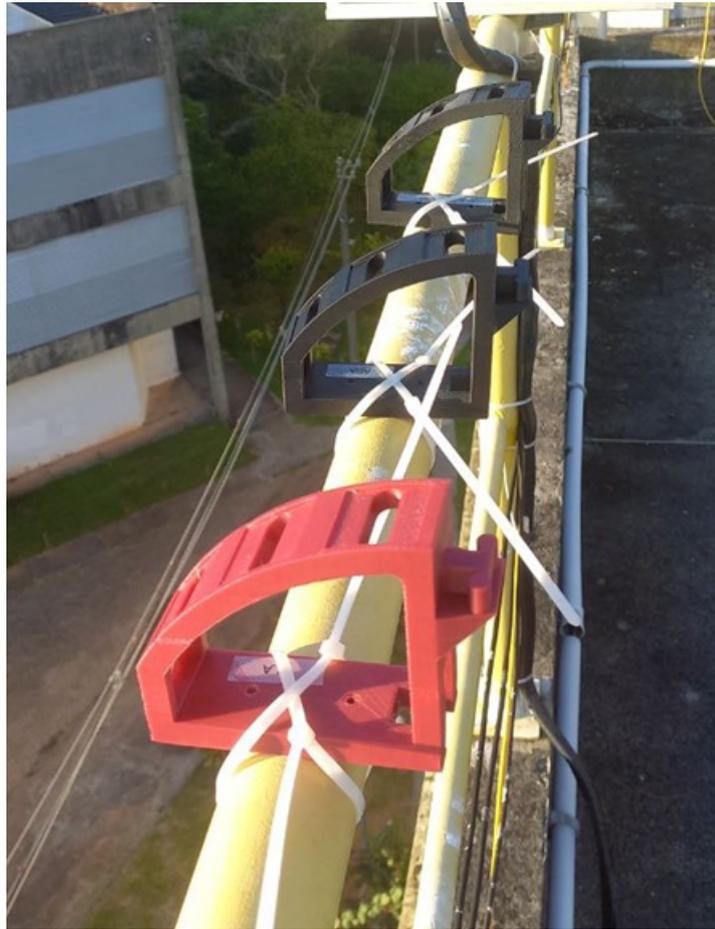


Figura 3.13 *Ribs* no início do teste de exposição ao Sol.
Fonte: Própria autora.

Após o período de 50 dias, os *ribs* foram retirados do terraço do CIENAM II e cada um deles apresentou uma resposta diferente à exposição. O *rib* em PLA (Figura 3.14 (a)) se apresentou quebradiço e houve a mudança na cor da peça. O *rib* em PLA revestido com tinta spray com proteção UV (Figura 3.14 (b)), diferentemente do PLA puro não se tornou quebradiço, permaneceu da mesma forma de quando foi exposto. Isso também aconteceu para o *rib* em material ASA (Figura 3.14 (c)).

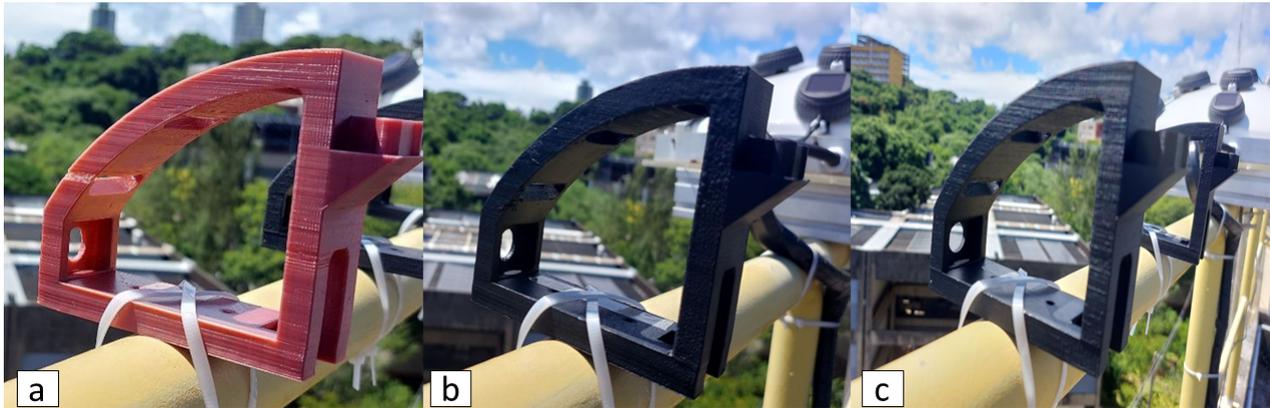


Figura 3.14 Ribs após o teste de exposição ao Sol: (a) rib em material PLA (b) rib em material PLA revestido com tinta spray com proteção UV e (c) rib em material ASA

Fonte: Própria autora.

A partir desse teste foi decidido que seria utilizado o material ASA que possui resistência à exposição aos raios UV, sem a necessidade de nenhuma proteção adicional, corroborando com o que diz a literatura.

3.5 ESTRUTURA MECÂNICA

O projeto do *fly-eye* consiste de uma estrutura central octogonal onde são fixados um piranômetro comercial, modelo ALS20 (Figura 3.6), e uma costela (*rib*) em cada um dos lados deste polígono. Na concepção das costelas ou *ribs* a racional utilizada foi a divisão em dois de metade de uma circunferência com dimensões de 240 mm de diâmetro e 95 mm de altura. Foi feito também um corte à esquerda do polígono para que fosse possível a acomodação de um prensa cabos por onde o cabeamento de cada *rib* saía do protótipo de radiômetro.

A determinação das dimensões para o projeto do radiômetro *fly-eye* foram escolhidas de maneira que as células solares, que representam segmentos de reta de 30 mm, pudessem ser acomodadas na curvatura de cada uma das costelas, da mesma maneira que o radiômetro central fica devidamente acomodado na seção octogonal central dessa estrutura.

O espaço para cada célula de cada *rib* foi desenhado em posições com diferentes angulações. O ângulo do plano de corte da calota esférica foi de 30° para garantir a fixação de três células. O espaço para a primeira célula foi fixado na posição que forma um ângulo de 80° com a base do *rib*, o segundo na posição que forma um ângulo de 60° com essa mesma base e finalmente, a última célula solar está posicionada em um angulo de 40° com a base do *rib*, como apresentado na Figura 3.15.

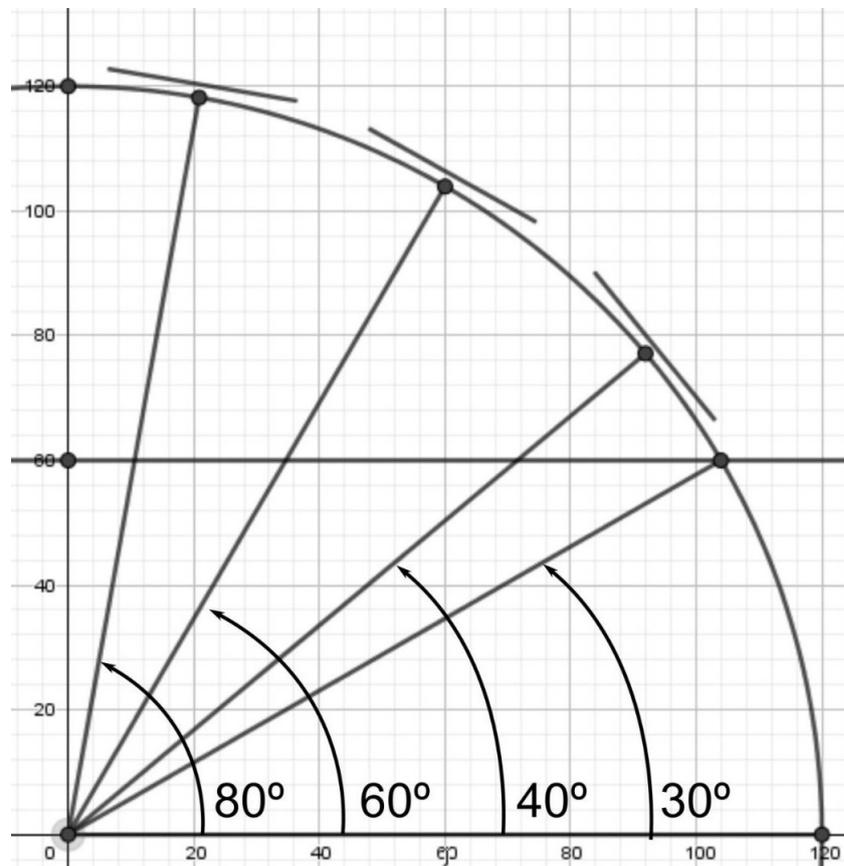


Figura 3.15 Angulação utilizada para acomodação das células.
Fonte: Própria autora.

O *fly-eye* foi modelado em software CAD e impresso por manufatura aditiva utilizando, inicialmente, o material PLA (Ácido Polilático), porém por ser um termoplástico quebradiço e não suportar exposição a temperaturas superiores a 60°C, optou-se pela troca desse material pelo ASA (Acrilonitrila Estireno Acrilato), que é um polímero de engenharia com excelentes propriedades mecânicas, resistência a intempéries e estabilidade dimensional (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017; SISTO, 2023).

Foram desenhadas e impressas nove peças ao total para montagem do equipamento. Oito *ribs* com acomodação para três células solares em cada um deles, prevendo um espaço para o cabeamento e o encaixe para a peça central. As vistas frontal e superior do *rib* são apresentadas nas Figuras 3.16 e 3.17, respectivamente.

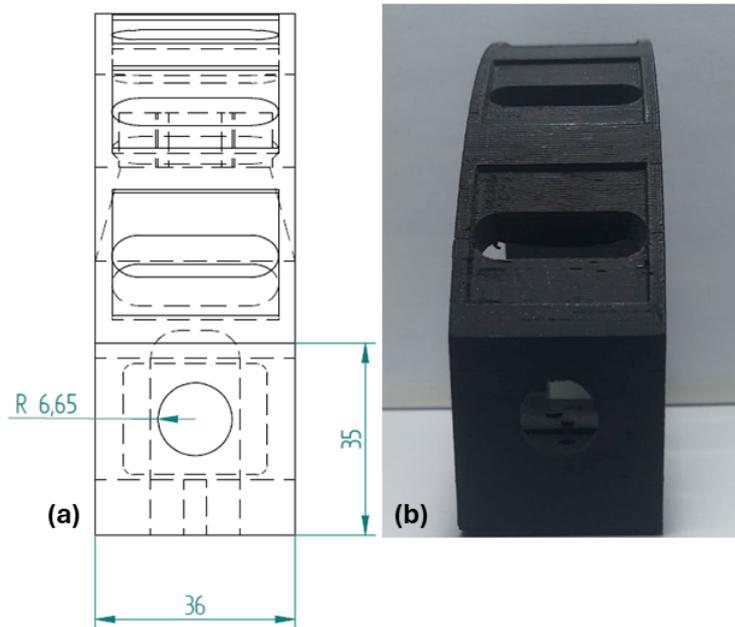


Figura 3.16 Vista frontal *ribs*: (a) Desenho técnico (b) Peça impressa.
Fonte: Própria autora.

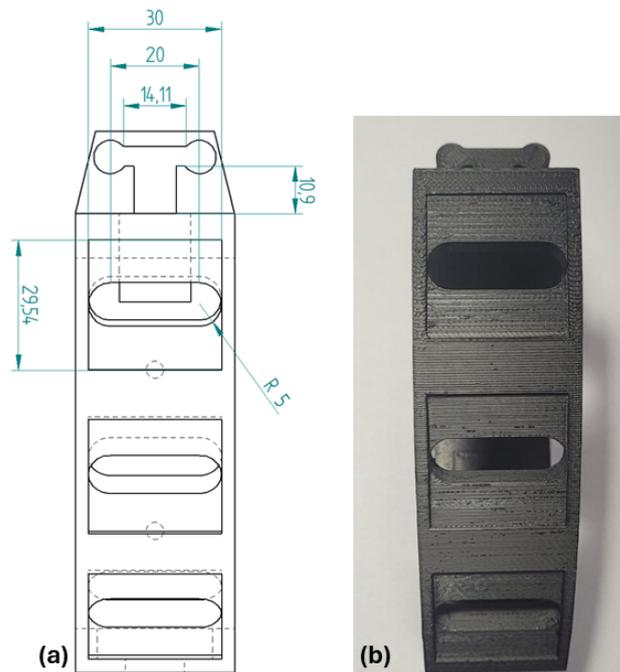


Figura 3.17 Vista superior do *rib*: (a) Desenho técnico (b) Peça impressa.
Fonte: Própria autora.

Já a vista lateral é apresentada na Figura 3.18.

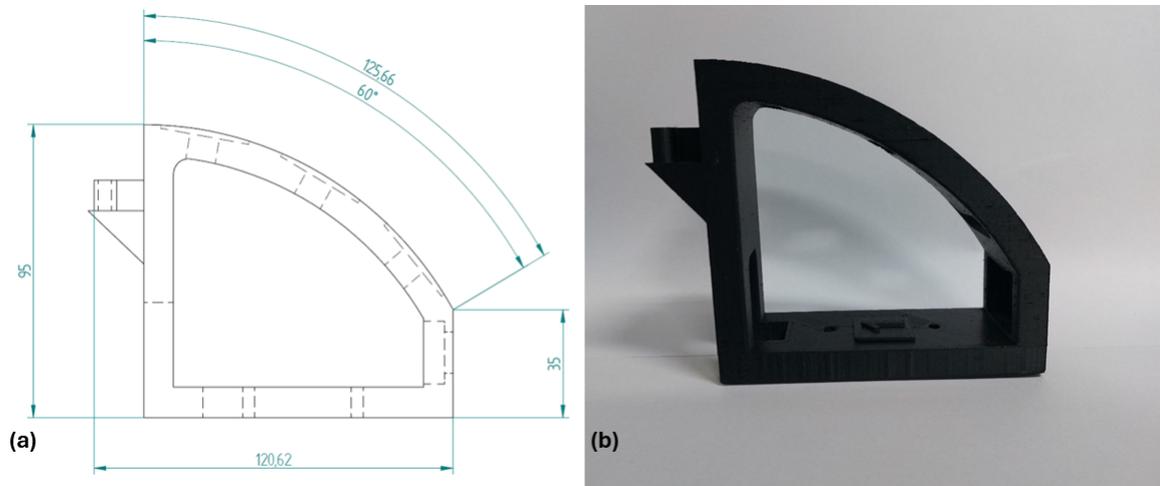


Figura 3.18 Vista lateral do *rib*: (a) Desenho técnico (b) Peça impressa.
Fonte: Própria autora.

A última peça impressa (octógono central) serviu de fixação para o piranômetro comercial ALS20 e nela são encaixados os oito *ribs* com os sensores. A vista isométrica dessa peça é mostrada na Figura 3.19.

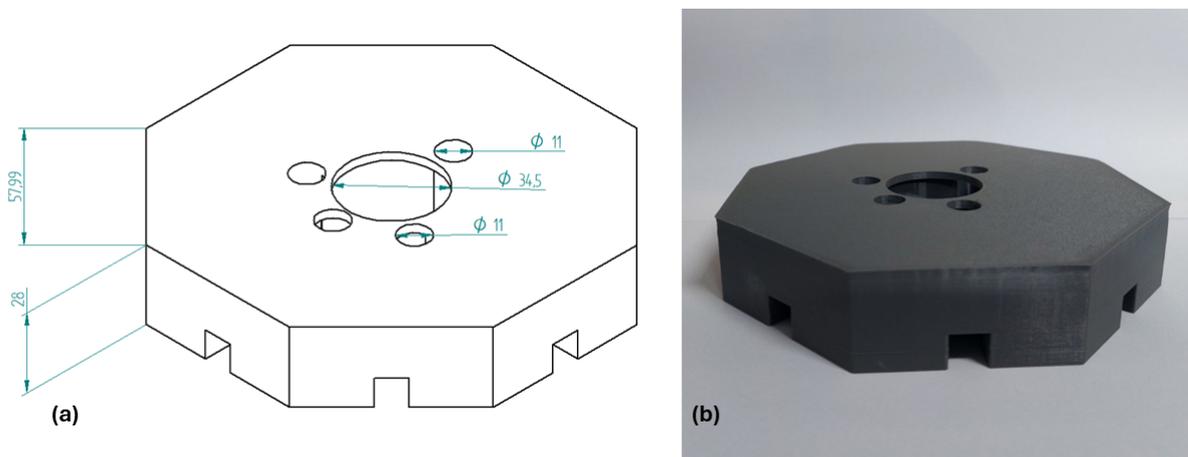


Figura 3.19 Vista isométrica da peça central: (a) Desenho técnico (b) Peça impressa.
Fonte: Própria autora.

A vista frontal da peça central é apresentada na Figura 3.20.

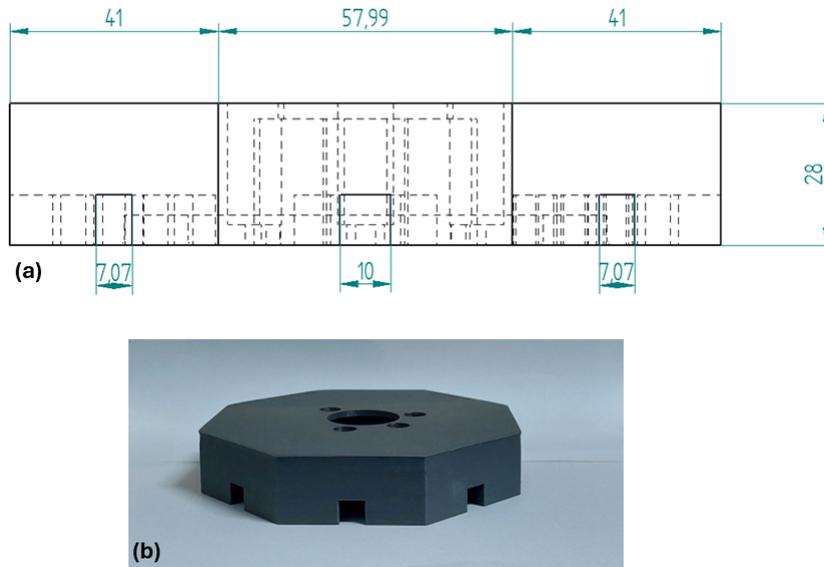


Figura 3.20 Vista frontal da peça central: (a) Desenho técnico (b) Peça impressa.
Fonte: Própria autora.

Já a vista inferior é apresentada na Figura 3.21.

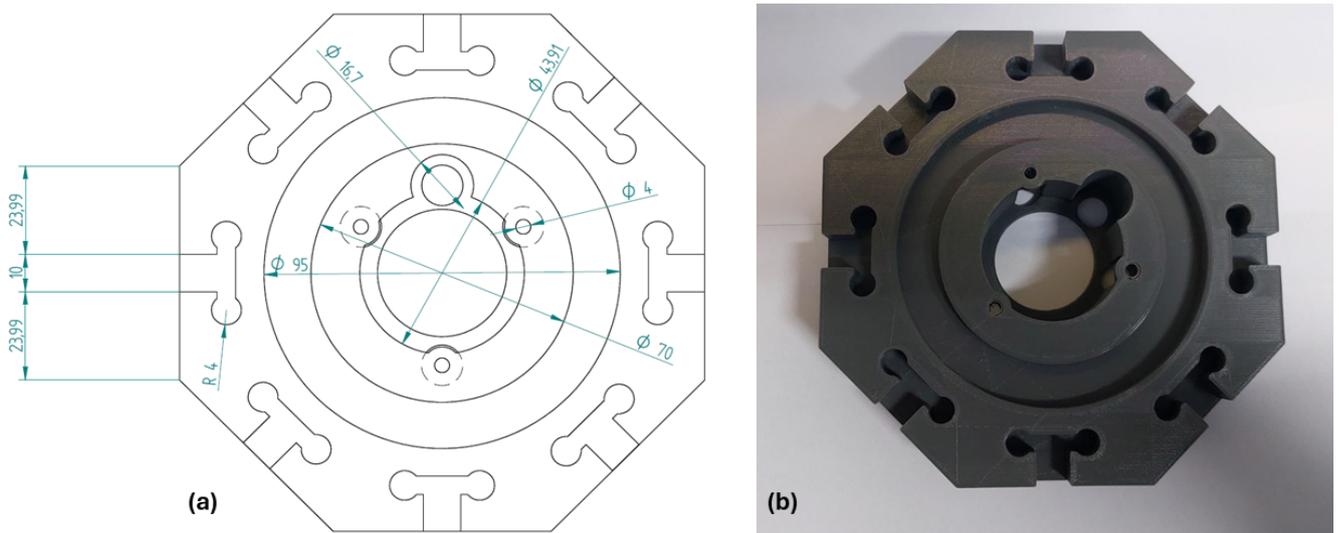


Figura 3.21 Vista inferior da peça central: (a) Desenho técnico (b) Peça impressa.
Fonte: Própria autora.

A disposição dos canais na estrutura do detector pode ser observada na Figura 3.22.

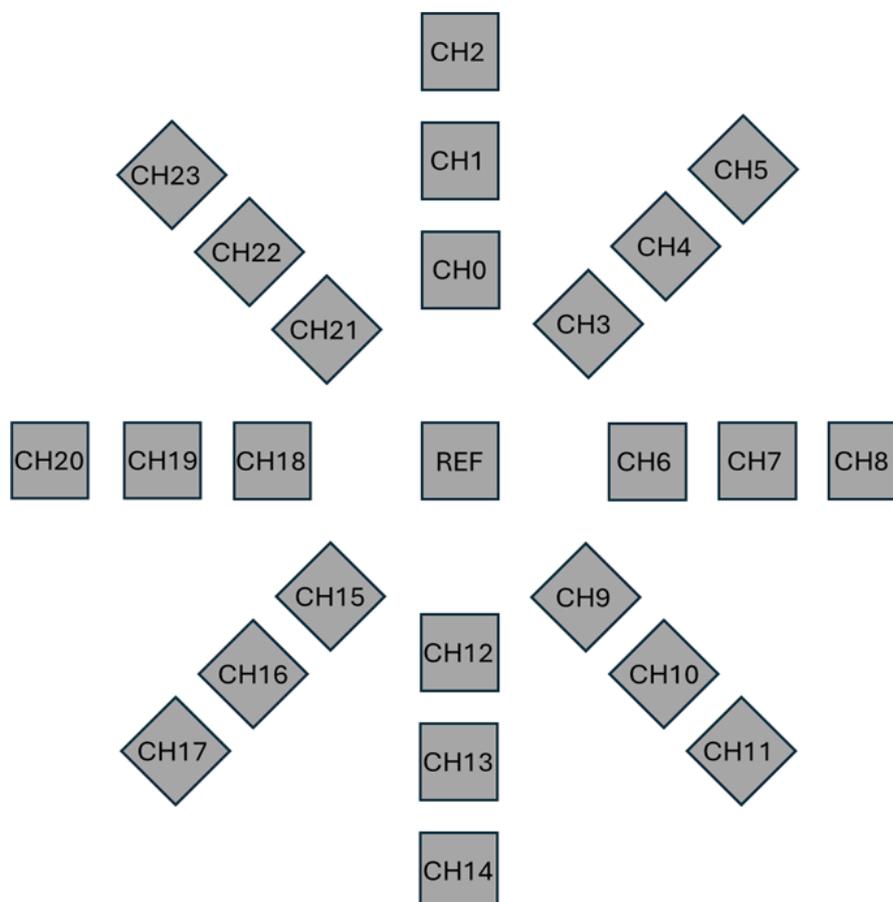


Figura 3.22 Disposição dos canais do radiômetro *fly-eye*.
Fonte: Própria autora.

O cabeamento do equipamento foi realizado pela parte interna de cada *rib*, sendo utilizado sete metros de cabo manga 4 x 26 AWG, com blindagem, em cada *rib*, passando por prensa cabos de 1/4". Um dos prensa cabos é de 3/8", porque nele passa o cabo mais espesso do piranômetro central. Para a conexão das células com o sistema de aquisição foram utilizados conectores mike-aviação com quatro vias para cada um dos oito *ribs* e para o piranômetro central foi usado um conector mike-aviação com três vias.

Para a proteção do sistema de aquisição de dados, este foi acomodado em uma caixa de PVC, IP68, com dimensões 500 x 400 x 200 mm. Nela foram fixados o sistema para condicionamento de sinal e o conversor analógico-digital, além do computador utilizado para monitoramento do sistema e dois ventiladores para arrefecimento.

A montagem da caixa seguiu algumas etapas:

- Fixação da caixa contendo o sistema para condicionamento de sinal e conversor analógico-digital;
- Fixação de prensa cabos de 1" para passagem de cabeamento do radiômetro *fly-eye* e cabo de rede;

Essas etapas são ilustradas na Figura 3.23.



Figura 3.23 Fixação do sistema de condicionamento de sinal e conversor analógico-digital na caixa de comando elétrico.

Fonte: Própria autora.

- Fixação de filtro de linha interno para alimentação da fonte chaveada do piranômetro central e do computador;
- Fixação de prensa cabos de 1/4" para passagem do cabo de alimentação do filtro de linha;
- Fixação do computador e fonte de alimentação para monitoramento do sistema.

Essas etapas são ilustradas na Figura 3.24.



Figura 3.24 Fixação do computador e filtro de linha na caixa de comando elétrico.
Fonte: Própria autora.

A caixa de PVC IP68 já pronta e conectada para aquisição de dados é mostrada na Figura 3.25.

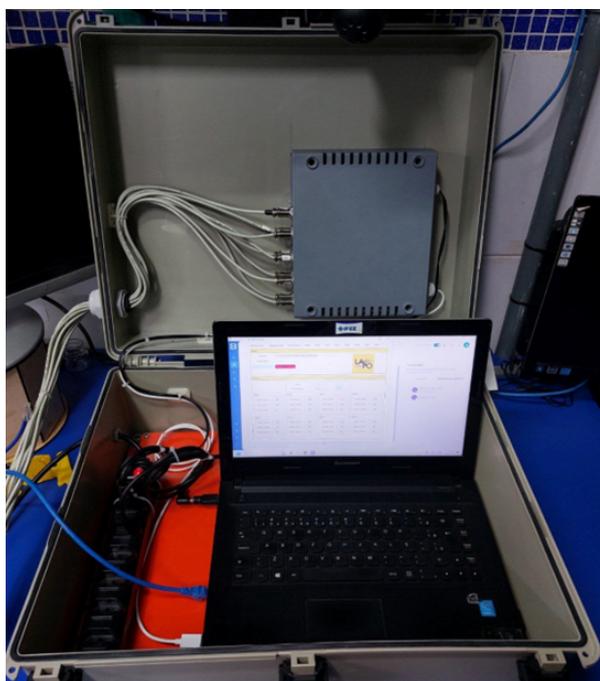


Figura 3.25 Sistema de aquisição pronto para instalação.
Fonte: Própria autora.

3.6 BANCO DE CARGA RESISTIVA E FILTRO RC

A irradiância solar, em princípio, determina a geração elétrica de uma célula solar, por exemplo, a quantidade de corrente elétrica produzida (corrente de curto-circuito, I_{SC}), sendo o valor desta corrente diretamente proporcional a essa irradiância. A célula solar de silício apresenta essa característica, o que possibilita a sua utilização como sensor da irradiância (ALBUQUERQUE, 2023);(SAMPAIO; DAVID; GUEDES, 2010).

A curva $I \times V$ é a curva característica de corrente elétrica versus tensão elétrica de uma célula solar. Essa curva apresenta informação acerca da qualidade e desempenho dessa célula (OLIVEIRA, 2015). Para determinar essa curva foi utilizado um arranjo de simulador solar baseado em LED branco (6500k), dotado de uma ótica que permite ajustar a focalização do feixe de luz e uma década variável de resistores (0 a 9999.9 Ω). Este aparato é apresentado na Figura 3.26.

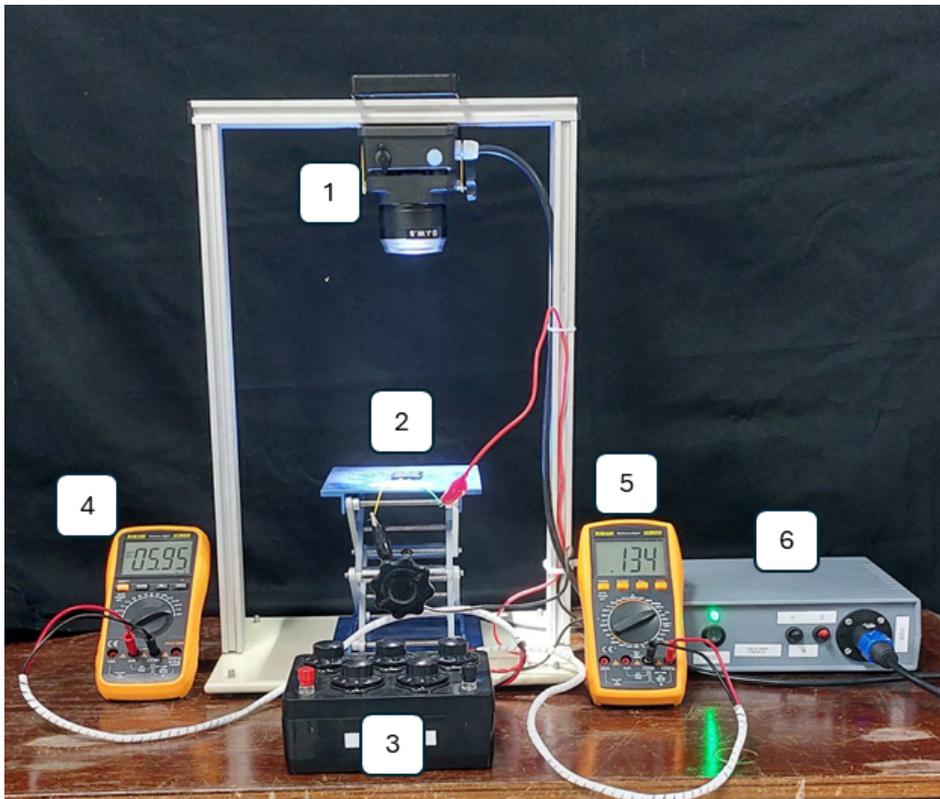


Figura 3.26 Aparato utilizado para determinação da curva $I \times V$ para a célula solar AK Solar utilizada no *fly-eye*: (1) Fonte de luz incidente com ajuste de foco (2) Célula solar testada (3) Década variável de resistores (4) Multímetro para a leitura da fotocorrente da célula (5) Multímetro para leitura da tensão na célula (6) Fonte de alimentação e ajuste de intensidade do LED.

Fonte: Própria autora.

À célula AK Solar 30 x 30 mm, usada no radiômetro desenvolvido, foram associados três valores de resistência de carga: 270 Ω com precisão de 1%, resistência para máxima entrega de potência, e duas outras de menor valor, 50 Ω e 15 Ω também com precisão 1%, escolhidas de acordo com a disponibilidade em laboratório, forçando a célula a fornecer uma corrente mais próxima da sua corrente de curto-circuito.

Para validar as três resistências elétricas escolhidas foram feitos testes de laboratório com ajuda do simulador solar fixo de bancada. Este simulador tem como fonte de luz uma matriz de LED branco, com potência de 100W, com temperatura de cor de 6500 K, montado num refletor parabólico de alumínio, suspenso por um guincho, o que permite variar a distância entre a fonte de luz e o dispositivo que está sendo testado. A partir da variação da distância entre o simulador solar fixo e o radiômetro, foram obtidas curvas de calibração para os três resistores citados.

As resistências também foram testadas em campo, montadas em um *rib* de teste dotado de três células solares. Na Figura 3.27, é possível ver esse *rib* teste.



Figura 3.27 Sistema utilizado para teste externo de resistência de carga.
Fonte: Própria autora.

Para condicionar o sinal de queda de tensão sobre as resistências de carga, foi projetado um filtro RC. O valor de resistência elétrica (R) e do capacitor (C) foram escolhidos de forma a obter um tempo RC ($\tau = R \times C$) da ordem de 2s, sem ocasionar uma queda de tensão elevada quando da conexão do filtro RC com a entrada do multiplexador montado na entrada do conversor analógico digital (ADC) do *Raspberry Pi Pico Zero*, que tem impedância de $10\text{ k}\Omega$. Assim, a resistência elétrica escolhida foi de $8,2\text{ k}\Omega$ e o capacitor utilizado, que seria de $244\text{ }\mu\text{F}$, foi substituído por $220\text{ }\mu\text{F}$, que é um valor comercial mais próximo. Essa constante de tempo foi escolhida por ser aproximadamente o tempo de processamento mínimo do *firmware* e do *software* para realizar um ciclo de aquisição.

3.7 DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE ABERTURA DO RADIÔMETRO FLY-EYE

Para a determinação do ângulo de abertura total do radiômetro foi necessário a obtenção do ângulo de abertura das células solares usadas no equipamento. Para isso, foi utilizado um goniômetro de mesa da RIGOKU CAT. NO. 1511, uma lanterna LED com ajuste de intensidade e foco, um multímetro de bancada da marca Rigol, modelo DM3062 e uma célula solar do mesmo modelo das que foram utilizadas no equipamento. A Figura 3.28 apresenta o aparato experimental utilizado.

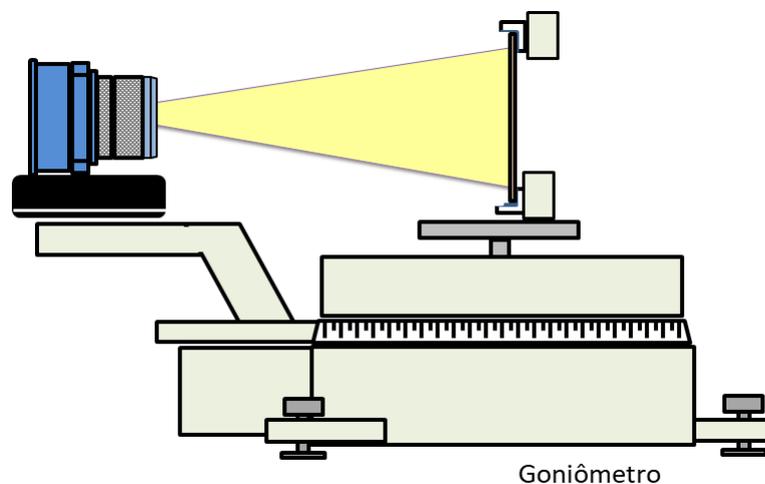


Figura 3.28 Diagrama do aparato experimental utilizado para a determinação do ângulo de abertura do equipamento.

O goniômetro utilizado possui um braço móvel onde estava fixada a fonte de luz que permitia a variação do ângulo de incidência. Essa variação foi realizada 90° para a direita e 90° para a esquerda, em intervalos de 3° . Deste modo a cada intervalo foram tomados os valores da fotocorrente gerada. O ângulo de abertura para o radiômetro comercial ALS20 também foi obtido utilizando o mesmo aparato experimental citado e a mesma

metodologia de variação do ângulo de incidência da fonte de luz, porém, para esse equipamento, a leitura realizada foi da tensão elétrica, já que o radiômetro tem sua resposta de saída em tensão. Esse aparato é mostrado na Figura 3.29.



Figura 3.29 Aparato experimental utilizado para a determinação do ângulo de abertura do *fly-eye* e do piranômetro ALS20.

Fonte: Própria autora.

3.8 TESTE DO RADIÔMETRO EM BANCADA

O radiômetro *fly-eye* foi desenvolvido com três anéis de detecção. O primeiro anel (canais em azul) é formado pelas células de cada *rib* que estão a 10° de inclinação em relação ao plano do piranômetro central. Já o segundo anel (canais em vermelho) e o terceiro (canais em rosa) são compostos pelas células que estão a 30° e 50° de inclinação, respectivamente, em relação a esse mesmo plano. Esses anéis são mostrados na Figura 3.30.

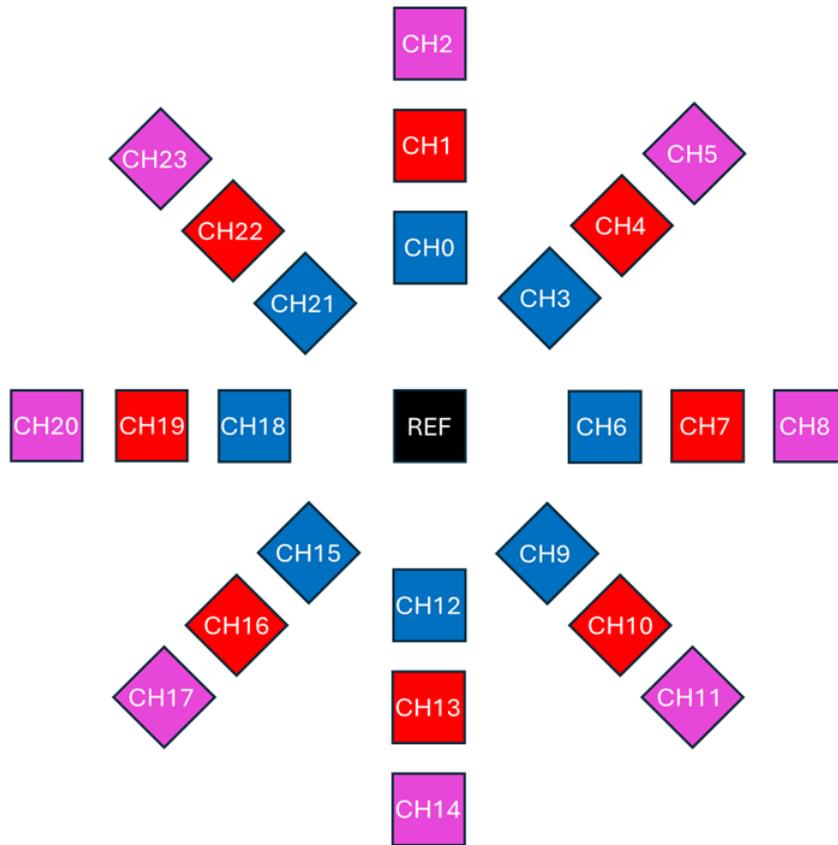


Figura 3.30 Diagrama com disposição dos anéis de células do *fly-eye*.
Fonte: Própria autora.

O simulador solar fixo de bancada pode ser visto na Figura 3.31, duas séries de testes foram feitas com o auxílio deste aparato. Na primeira série de testes, o radiômetro foi exposto à irradiância gerada pelo simulador em 15 diferentes distâncias, variando de 25 a 96 cm. A cada distância, a contagem de ADC era determinada para cada célula, de cada *rib*, como também para o piranômetro central. As medidas foram tomadas de forma automática pelo software desenvolvido.

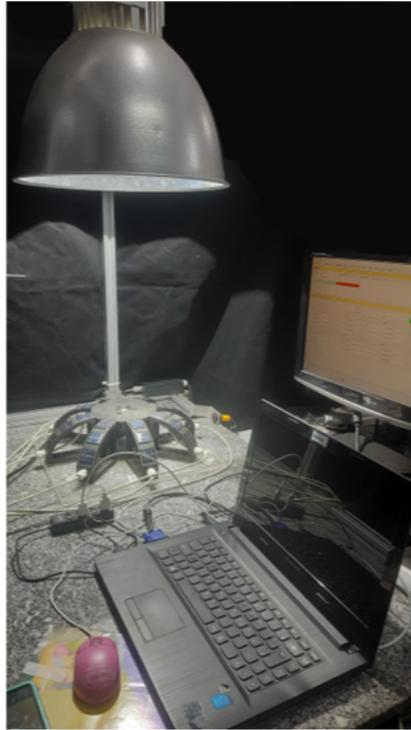


Figura 3.31 Simulador solar fixo de bancada, aparato utilizado para validação do equipamento para pequenas distâncias.

Fonte: Própria autora.

No segundo teste realizado, como dito anteriormente, a distância entre o simulador solar e o radiômetro foi alterada de forma a reproduzir o nascer e o pôr do Sol. Esse ensaio foi realizado também como forma de testar o funcionamento do equipamento pelo tempo necessário de aquisição, 12h por dia. Ele foi iniciado a partir da maior distância do simulador em relação ao equipamento (96 cm), ensaiando a menor irradiância solar ao nascer do Sol. À medida que a distância do simulador em relação ao equipamento diminui, a irradiância aumenta. Quando o simulador chega à menor distância (25 cm), o mais próximo do *fly-eye*, tem-se a maior irradiância do dia. Nessa posição o simulador foi mantido por mais tempo, simulando o Sol do meio-dia. Em seguida, a fonte de luz foi afastada novamente até a maior distância, e conseqüentemente mede-se a menor irradiância.

3.9 INSTALAÇÃO DO EQUIPAMENTO EM SÍTIO EXPERIMENTAL

O radiômetro *fly-eye* desenvolvido foi instalado na laje superior do Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia (IF - UFBA) no dia 10 de abril de 2024. Esse é um local onde é possível a realização das medidas de irradiância ao longo dos dias, mesmo apresentando pontos negativos como um sombreamento no fim da tarde, provocado por construções ao redor.

O equipamento foi fixado em uma estrutura em perfil de alumínio (Figura 3.32)

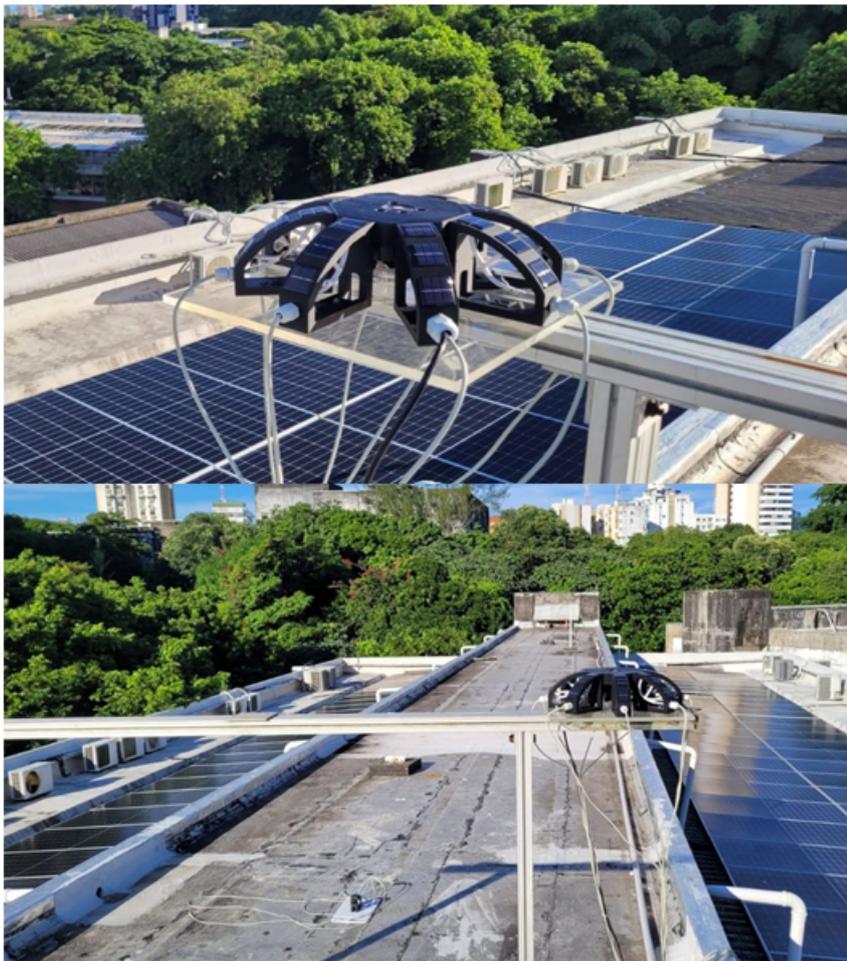


Figura 3.32 *fly-eye* instalado no terraço do Instituto de Física da UFBA.
Fonte: Própria autora.

Já seu cabeamento foi levado até a galeria de serviço situada logo abaixo da laje superior, onde foi acomodado o sistema de aquisição de dados (Figura 3.33).



Figura 3.33 Sistema de aquisição de dados acomodado em área coberta.
Fonte: Própria autora.

3.10 CALIBRAÇÃO DAS CÉLULAS

Ainda no início deste trabalho de dissertação, ao ser lançado o desafio do projeto, do desenvolvimento e da montagem de um radiômetro com topologia *fly-eye*, assumiu-se como racional que este equipamento deveria permitir ciclos de auto calibração. Seguindo esta racional, foi imaginada a existência de um radiômetro baseado em fotodiodo de silício no topo deste detector. Na prática, foi instalado um piranômetro ALS20, de fabricação Nzluliyuan, capaz de medir uma iluminância de 200.000 lux. Tal irradiância gera uma tensão elétrica de saída máxima de 2 Vdc, assim, cada lux corresponde a 10^{-5} V para este sensor. É importante lembrar que esse radiômetro precisa ser alimentado com tensão externa de 5V, portanto conta com um circuito de condicionamento de sinal embarcado.

De acordo com Balsan (2019), 1 W/m^2 corresponde aproximadamente a 127 lux. A partir dessa relação é possível estabelecer as seguintes outras relações:

(i) para uma dada tensão de saída do radiômetro $Q(V)$ é possível determinar a quantidade de iluminância $P(\text{lux})$ usando a Equação 3.1.

$$P(\text{lux}) = \frac{Q(V)}{(10^{-5}(V/\text{lux}))} \quad (3.1)$$

(ii) a quantidade de irradiância $R(\text{W/m}^2)$ pode ser determinada usando a Equação 3.2

$$R(\text{W/m}^2) = \frac{P(\text{lux})}{127(\text{lux}/\text{Wm}^2)} \quad (3.2)$$

A junção das expressões dos itens (i) e (ii) é apresentada na Equação 3.3.

$$R(\text{W/m}^2) = \frac{[\frac{Q(V)}{(10^{-5}(V/\text{lux}))}]}{[127(\text{lux}/\text{Wm}^2)]} \quad (3.3)$$

A calibração das células solares foi realizada a partir da confrontação dos valores medidos pelas células do anel superior do radiômetro (Figura 3.34) e as medidas do radiômetro ALS20, com o equipamento já instalado no terraço do Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia. Foi escolhido um dia ensolarado de medidas para realização dessa calibração. Com o fator de conversão para irradiância obtido para o piranômetro ALS20, a curva relacionando a irradiância no piranômetro com a contagem de ADC de cada célula solar do anel superior foi traçada, o que corresponde à curva de calibração para cada *rib*.

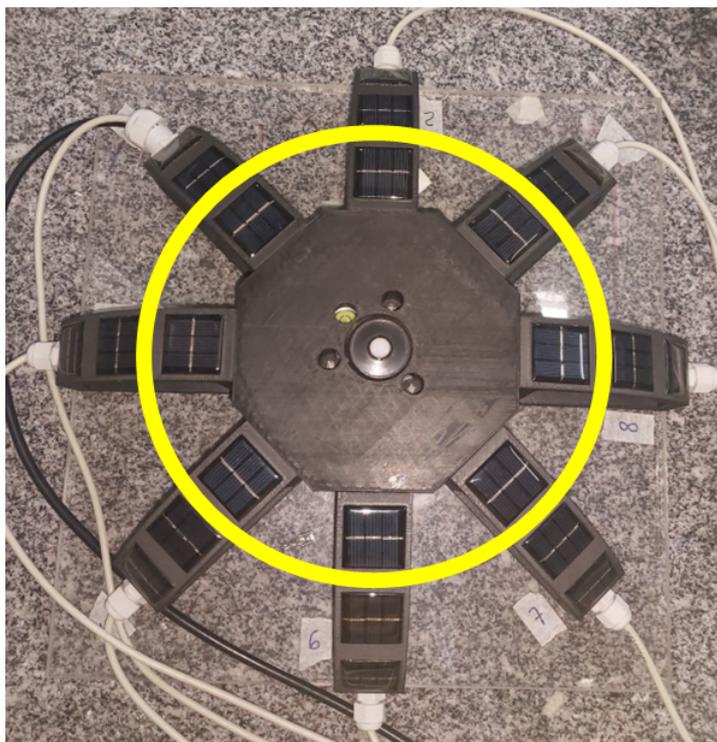


Figura 3.34 Células utilizadas para a calibração de cada *rib*.

Fonte: Própria autora.

3.11 METODOLOGIA PARA AS MEDIDAS

Os períodos de solstício e equinócio influenciam na posição do nascer do Sol. No período do equinócio o Sol nasce exatamente no Leste, já no período do solstício o nascer do Sol ocorre em regiões vizinhas a esse ponto cardinal.

Para análise dos resultados do radiômetro construído foram elaborados mapas de calor. Mapa de calor é uma representação gráfica que permite, através de uma escala de cores, a visualização de dados obtidos, o que facilita o entendimento do que ocorre, por exemplo, em uma superfície. O mapa de calor para o *fly-eye* foi construído no *software* Origin [®] a partir das médias diárias de irradiância.

Além dos mapas de calor, gráficos de barra comparando a irradiância entre o piranômetro central e o sensores foram traçados. Para a obtenção de todos esses gráficos e mapas de calor os dados adquiridos passaram por uma triagem para verificar se o dia poderia ser utilizado nas análises. O critério utilizado foi que o dia analisado precisava ter um dia solar completo, de 6h da manhã às 18h, sem interrupção. Com esse critério, os dias contabilizados para a análise foram 88 dias que estão separados por mês na Tabela 3.1.

Mês	Dias contabilizados
Abril	14
Maio	23
Junho	27
Julho	24
Total	88

Tabela 3.1 Dias contabilizados para análise.

Após a triagem dos dias que poderiam ser utilizados nas análises, os meses foram divididos em semanas e a avaliação da irradiância também foi realizada por semana para todo o período de aquisição de dados. Os intervalos de dias para cada semana são apresentados na Tabela 3.2.

Semana	Intervalo de dias
Semana 1	14 de abril - 20 de abril
Semana 2	21 de abril - 27 de abril
Semana 3	28 de abril - 04 de maio
Semana 4	05 de maio - 11 de maio
Semana 5	12 de maio - 18 de maio
Semana 6	19 de maio - 25 de maio
Semana 7	26 de maio - 01 de junho
Semana 8	02 de junho - 08 de junho
Semana 9	09 de junho - 15 de junho
Semana 10	16 de junho - 22 de junho
Semana 11	23 de junho - 29 de junho
Semana 12	30 de junho - 06 de julho
Semana 13	07 de julho - 13 de julho
Semana 14	14 de julho - 20 de julho
Semana 15	20 de julho - 27 de julho

Tabela 3.2 Intervalo de dias das semanas consideradas para análise.

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos testes realizados e suas devidas discussões.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 BANCO DE CARGA RESISTIVA E FILTRO RC

Nas Figuras 4.1 e 4.2 são apresentados, sob forma gráfica, os resultados para cada resistência testada. Os gráficos apresentam a relação entre a irradiância em W/m^2 medida no piranômetro central e a contagem de ADC medida na célula solar. Do resultado desse teste, foi escolhido o resistor de 15Ω por apresentar uma maior linearidade, sendo que a corrente elétrica obtida com esta carga resistiva tem valor mais próximo da corrente de curto-circuito da célula solar utilizada.

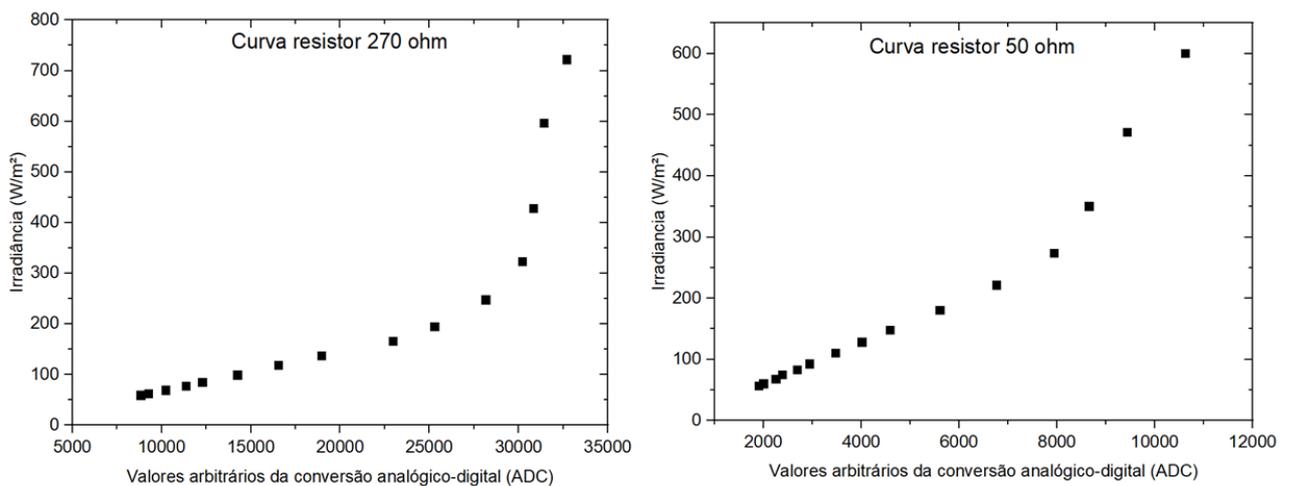


Figura 4.1 Curvas de calibração obtidas para os resistores de 270Ω e 50Ω , respectivamente.
Fonte: Própria autora.

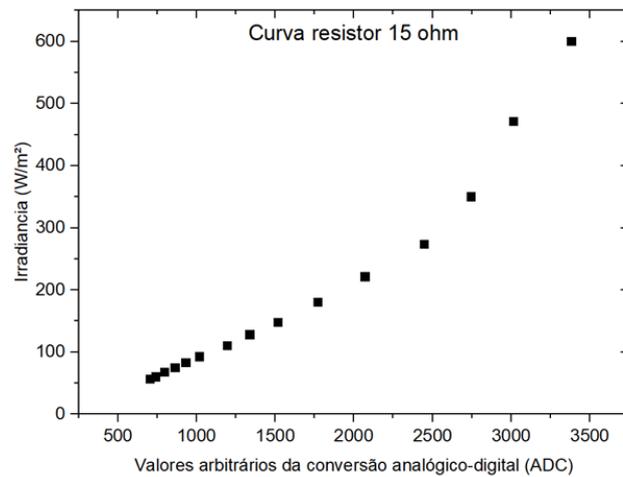


Figura 4.2 Curvas de calibração obtidas para o resistor de 15 Ω .
Fonte: Própria autora.

Na curva I x V da Figura 4.3 o ponto vermelho, em destaque, determina o valor da resistência de carga escolhida.

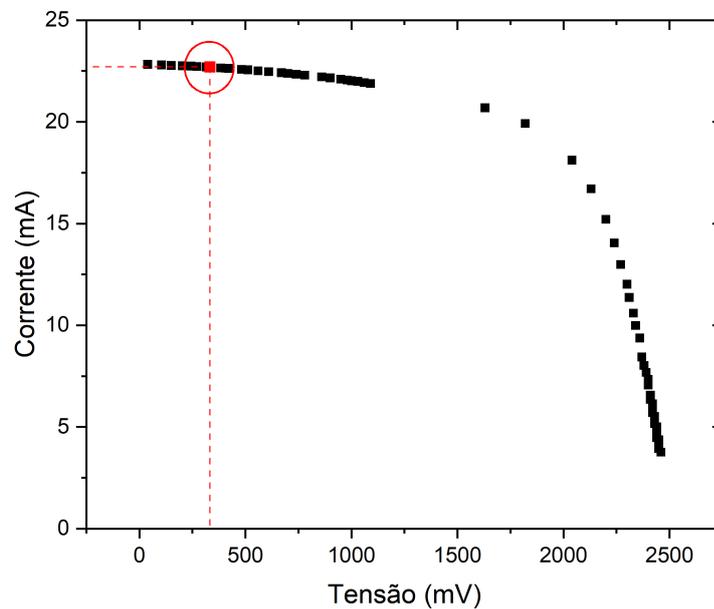


Figura 4.3 Curva I x V obtida para uma das células solares utilizadas.
Fonte: Própria autora.

Foi montado então, um banco de carga resistiva com vinte e quatro resistores de $15\ \Omega$ e precisão de 1%. Cada resistor foi montado em paralelo com a célula fotovoltaica correspondente, usada para compor o radiômetro com topologia *fly-eye*.

4.2 DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE ABERTURA DO RADIÔMETRO FLY-EYE

Com o sistema apresentado na Figura 3.28, foi possível obter a curva da intensidade de corrente normalizada versus ângulo de incidência da luz, a partir da qual foi encontrado o ângulo de visada das células solares. Essa curva é mostrada na Figura 4.4, junto com uma Lorentziana (curva tracejada em vermelho) ajustada aos dados experimentais com intuito de facilitar a compreensão do leitor.

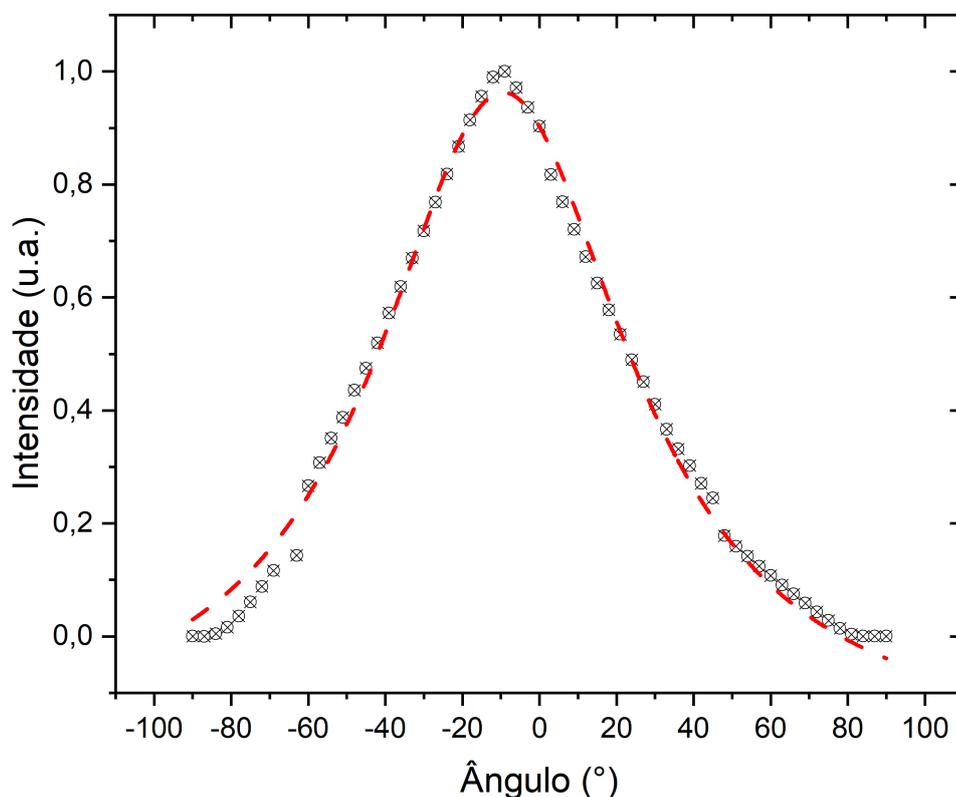


Figura 4.4 Curva intensidade de corrente normalizada versus ângulo de incidência do feixe de luz.

Fonte: Própria autora.

Segundo Silva (2022), é de grande importância considerar o ponto de corte para detecção em uma geometria semiesférica, pois o ângulo de abertura dessa geometria depende

dos limites de detecção impostos. A partir do trabalho citado, foram utilizados cinco limiares de detecção (-4, -3, -2, -1,5 e -1 dB) que serão apresentados na forma da atenuação da intensidade de corrente medida, isto para estimar o ângulo de abertura do *fly-eye* desenvolvido. A tabela 4.1 apresenta os ângulos obtidos para uma célula solar para cada atenuação.

Atenuação (dB)	Ângulo
-1	37°
-1,5	48°
-2	56°
-3	70°
-4	82°

Tabela 4.1 Ângulo de abertura para uma célula solar nos diferentes limiares de atenuação.
Fonte: Própria autora.

Na Figura 4.5 pode ser visto o corte lateral da estrutura mecânica do detector *fly-eye* proposto neste trabalho. A posição de cada célula solar foi determinada por uma construção angular que toma como referência a base desta estrutura mecânica. Como pode ser visto na figura, em relação a base do *fly-eye*, as células solares que compõem o anel superior deste detector estão colocadas no ponto assinalado como 80° em relação ao plano da base, os outros anéis estão colocados nos ângulos 60° e 40°, respectivamente. Como dito anteriormente, o projeto do posicionamento de cada célula solar seguiu esta metodologia, a referência tomada sempre foi o plano da base deste detector. Entretanto, na vida do dia a dia, para falar da posição de cada uma das células, é mais intuitivo tomar a angulação deste componente do detector desenvolvido usando um inclinômetro que determinou um ângulo quase igual ao ângulo complementar dos ângulos referidos acima. Assim, a célula de topo, que forma o anel superior será associada com o ângulo de inclinação de 10°, enquanto que as duas outras células que formam os dois outros anéis serão associadas às inclinações de 30° e 50°, respectivamente.

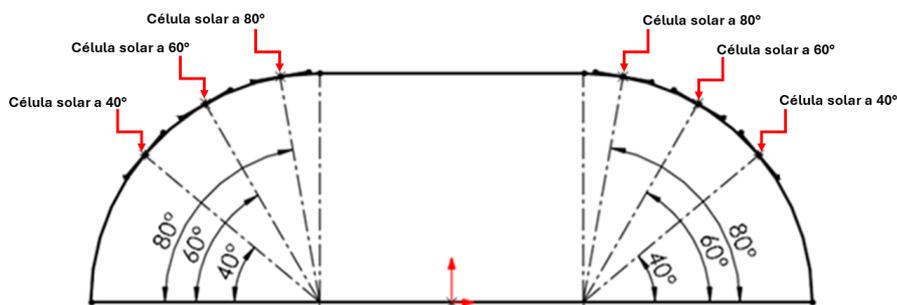


Figura 4.5 Vista lateral do *fly-eye*.
Fonte: Própria autora.

Assim, a Figura 4.6 ilustra o ângulo de abertura resultante para o equipamento considerando as atenuações de -4dB e -3dB.

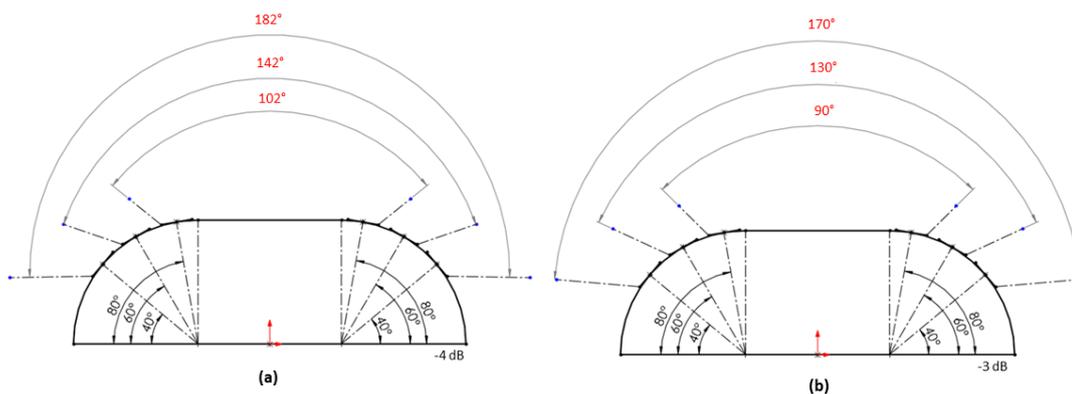


Figura 4.6 Ângulo de abertura do *fly-eye* para as atenuações de -4dB e -3dB, respectivamente.
Fonte: Própria autora.

Já a Figura 4.7 apresenta os ângulos obtidos para as atenuações -2, -1,5 e 1 dB.

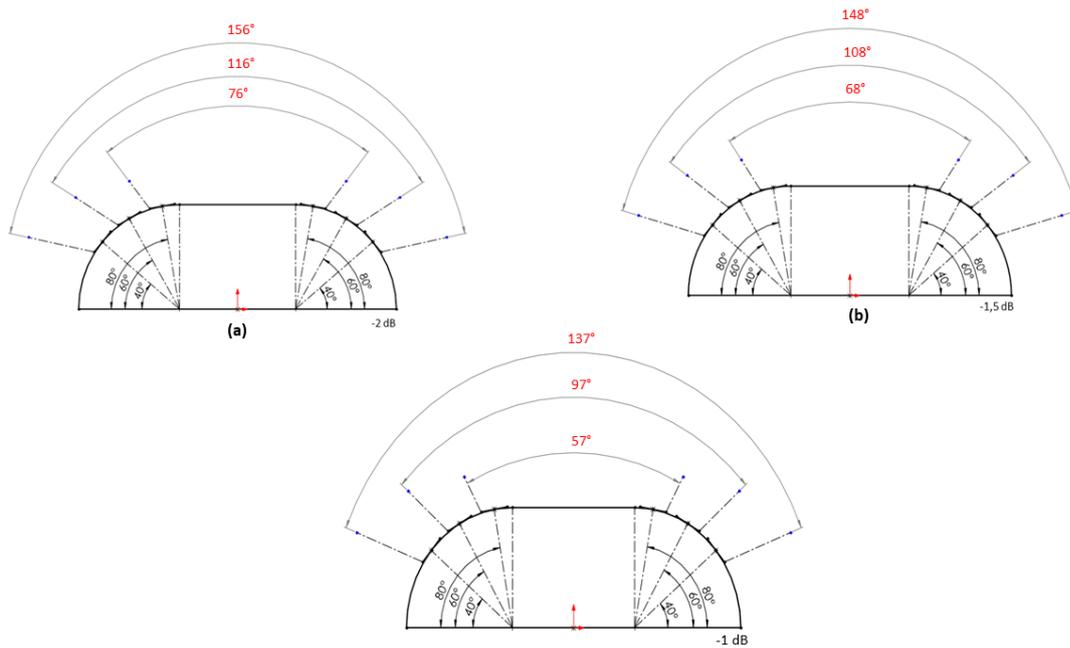


Figura 4.7 Ângulo de abertura do *fly-eye* para as atenuações de -2dB, -1,5dB e -1dB, respectivamente.

Fonte: Própria autora.

No trabalho de Silva (2022), o ângulo de abertura obtido para a atenuação de -4dB foi de 214°, já para o detector descrito neste trabalho, o ângulo de abertura foi de 182°. Comparando os ângulos dos dois detectores temos uma diferença de 32° entre os dois *fly-eyes*, o que corresponde a uma redução do ângulo de abertura de 14,95% entre o primeiro e o segundo equipamento.

O detector desenvolvido por Silva (2022) era capaz de enxergar 17° além da linha do horizonte para cada lado. O equipamento desenvolvido agora, mesmo com a redução do ângulo de abertura, ainda consegue captar luz até a linha do horizonte para os dois lados. Esta redução da capacidade de detecção fica minimizada quando comparado à diminuição do volume total do detector e do seu peso, que passou de 16 kg no caso do equipamento de (SILVA, 2022) para 4kg para o *fly-eye* aqui apresentado.

O ângulo de abertura para o radiômetro comercial modelo ALS20 também foi obtido. A curva para esse equipamento é mostrada na Figura 4.8. Essa curva foi ajustada pela Equação 4.1.

$$y = a \cdot \cos((x \cdot (\pi/180)) + b) + c$$

$$a = 789 \pm 5,67 \quad (4.1)$$

$$b = 0,05148 \pm 0,00734$$

$$c = -105,77797 \pm 4,1300$$

Sendo y o valor da irradiância em W/m^2 , o parâmetro "a", um valor de amplitude multiplicando o cosseno, o parâmetro "b" um termo de fase de uma equação oscilatória e o parâmetro "c" uma constante de proporcionalidade, com seus respectivos erros associados, e x o ângulo de incidência da fonte de luz em graus. O ajuste realizado apresenta um $R^2 = 0,98$, o que mostra que o modelo tem um bom ajuste aos dados.

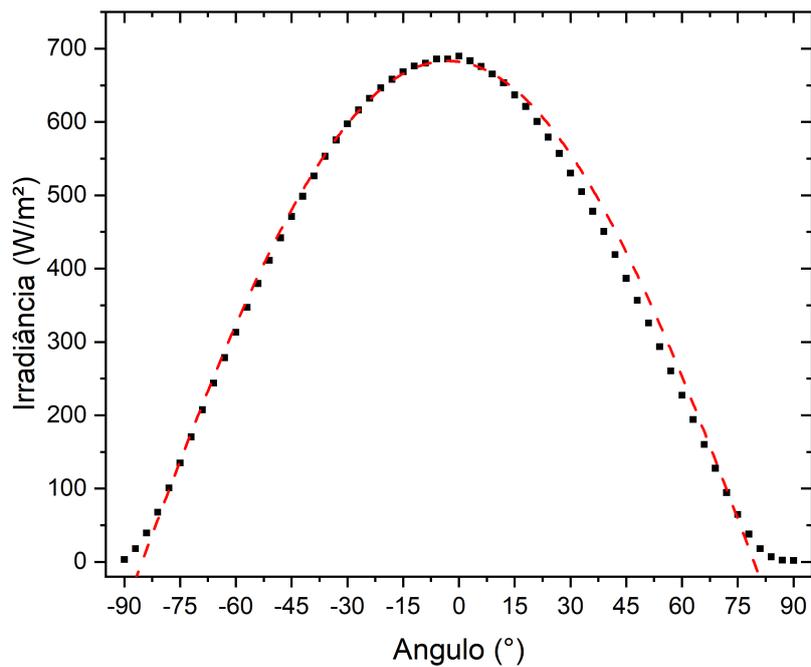


Figura 4.8 Ângulo de abertura do radiômetro ALS20.
Fonte: Própria autora.

4.3 TESTE DO RADIÔMETRO EM BANCADA

Os resultados do primeiro teste foram analisados a partir dos anéis formados pelas células solares e é apresentado na Figura 4.9.

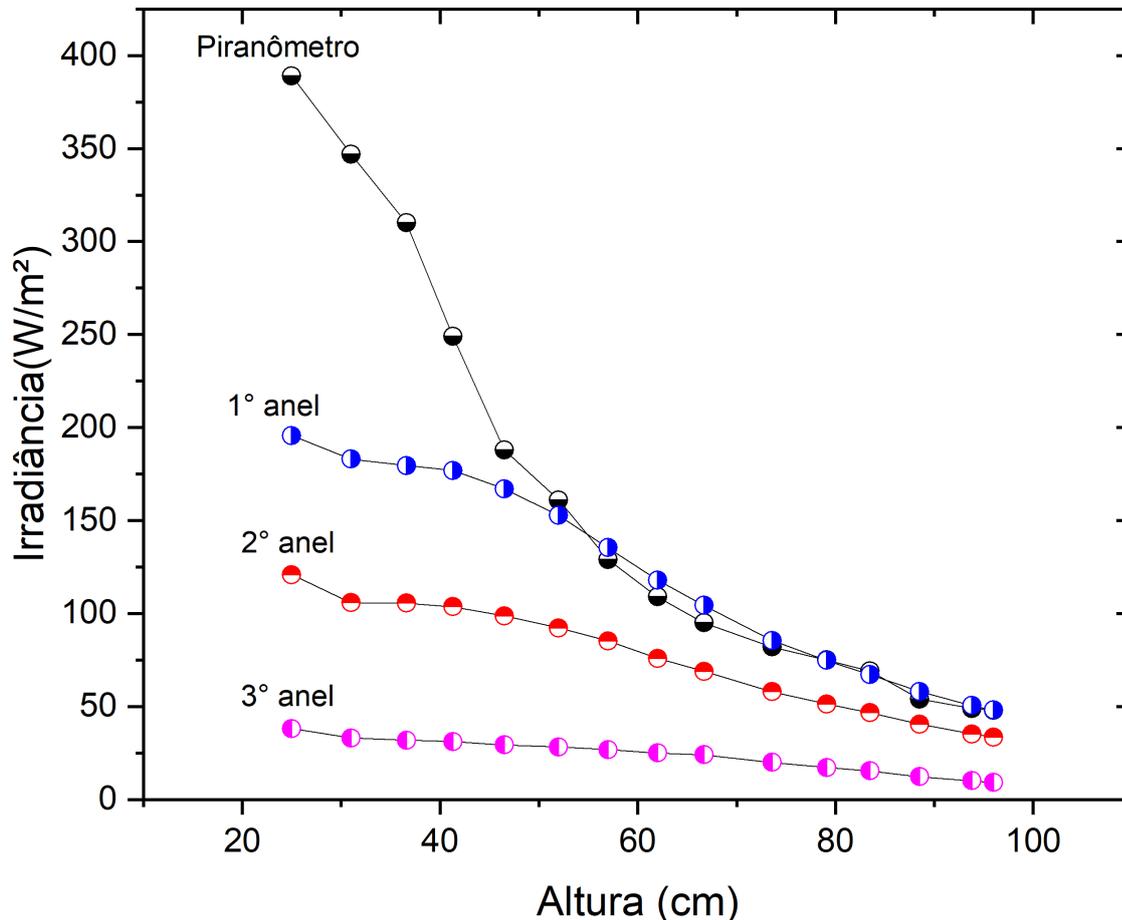


Figura 4.9 Resultado do teste em laboratório para os três anéis de sensores.
Fonte: Própria autora.

Dentre os anéis, o que apresentou a maior irradiância foi o 1º anel, formado pelos sensores que tem inclinação de -10° em relação ao plano do piranômetro central. Isso é explicado pelo fato desses sensores estarem mais próximos do piranômetro central e conseqüentemente recebendo luz de forma mais direta. A Figura 4.10 mostra a diferença entre a irradiância medida pelo piranômetro e o valor médio da irradiância medida pelo primeiro anel de células solares. A diferença observada está relacionada com a distribuição de luz conseguida com a ótica que forma o simulador solar. Observe-se que a matriz de LEDs, que serve de fonte luminosa para este simulador, não necessariamente tem homogeneidade intrínseca da luz produzida por cada um dos LEDs que compõem

essa matriz. De mesmo, a qualidade do espelho parabólico que serve de luminária para esse simulador, não necessariamente tem grande homogeneidade da sua qualidade especular, tendo sido produzido em um torno de repuxo. A partir dos 52 cm, já com o simulador solar um pouco mais afastado da superfície do piranômetro *fly-eye*, a diferença de irradiância entre o piranômetro central e a média da irradiância medida pelo 1° anel de sensores tende a zero, o que é consistente com o esperado para esse tipo de sensor.

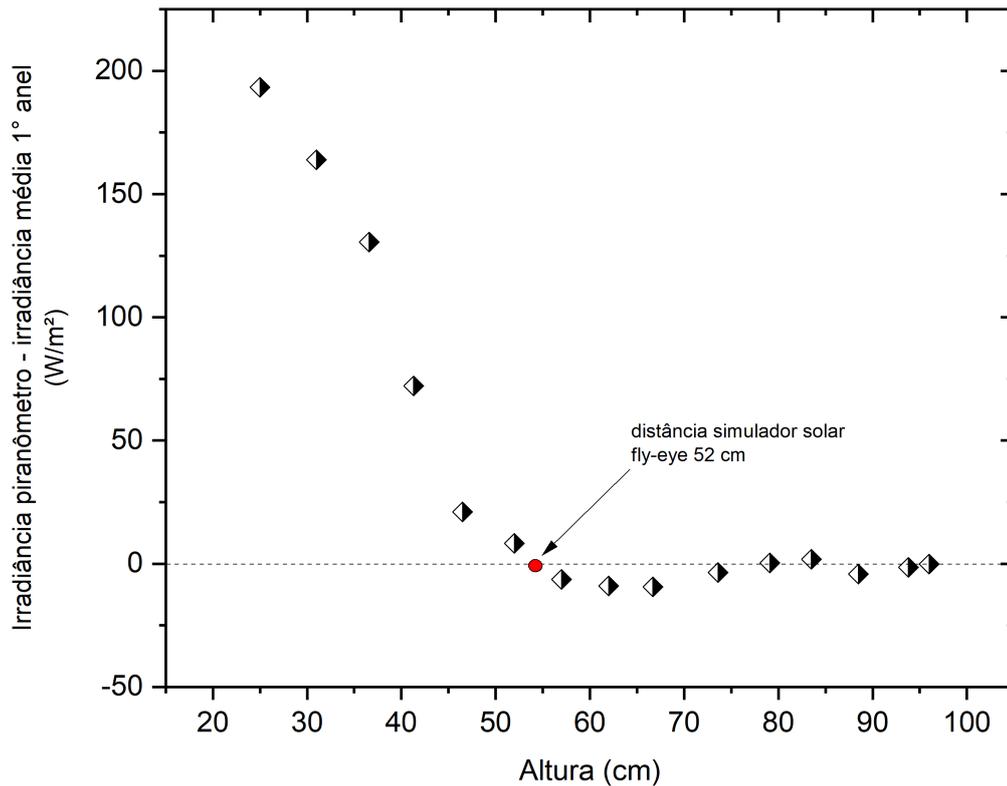


Figura 4.10 Diferença de irradiância entre o piranômetro central e a média da irradiância medida pelo 1° anel de sensores.

Fonte: Própria autora.

Para reforçar a tendência observada na Figura 4.10, para cada distância entre o simulador solar e o piranômetro *fly-eye* foi calculado o coeficiente das irradiâncias medidas pelas células solares e o radiômetro ALS20. A Figura 4.11 apresenta o resultado desse quociente, é possível notar que a partir de 52 cm esse parâmetro tende a um único valor.

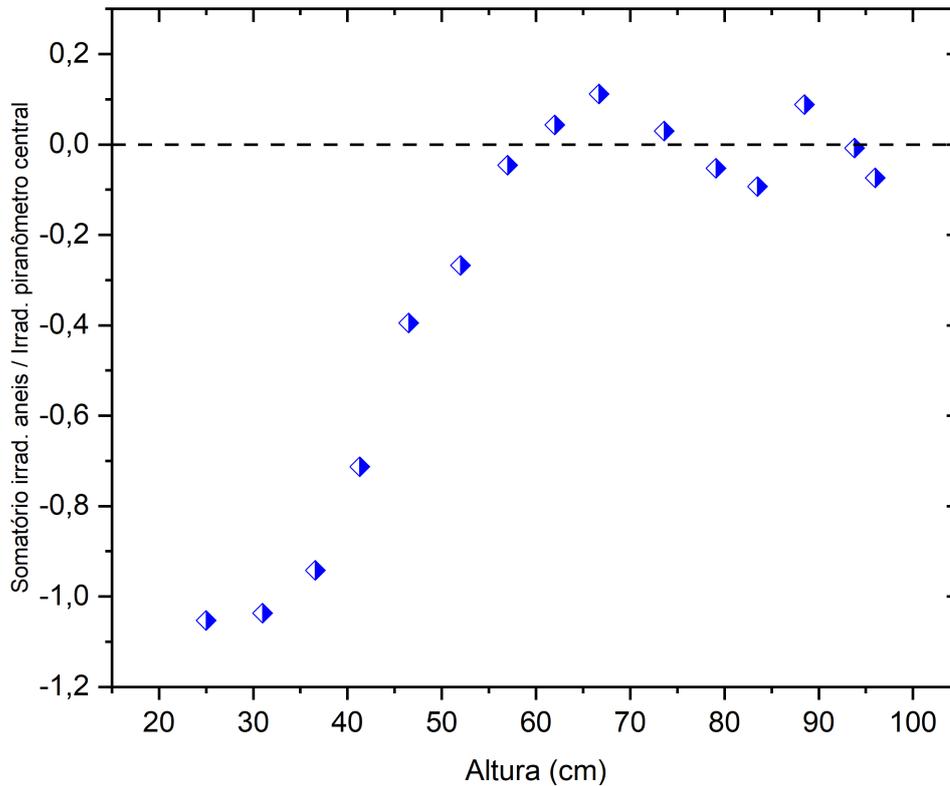


Figura 4.11 Irradiância medida pelas células solares dividido pela irradiância obtida pelo piranômetro ALS20.

Fonte: Própria autora.

Continuando a análise dos resultados de irradiância, para distâncias maiores que os 52 cm, se feito o somatório da irradiância medida para cada anel é possível afirmar que a soma das irradiâncias dista de um fator $1,96 \pm 0,07$ em relação aos valores medidos pelo radiômetro central.

As curvas apresentadas na Figura 4.9 mostram que a medição feita pelo radiômetro central e pelos anéis com as células solares inclinadas, em boa aproximação, têm a mesma tendência de diminuição do valor medido em função da altura, apesar de não haver uma forte correlação entre o formato das curvas que podem ser vistas nessa figura.

O resultado médio para o 1° anel é apresentado na Figura 4.12. A curva obtida foi ajustada por uma distribuição Lorentziana para facilitar a compreensão pelo leitor.

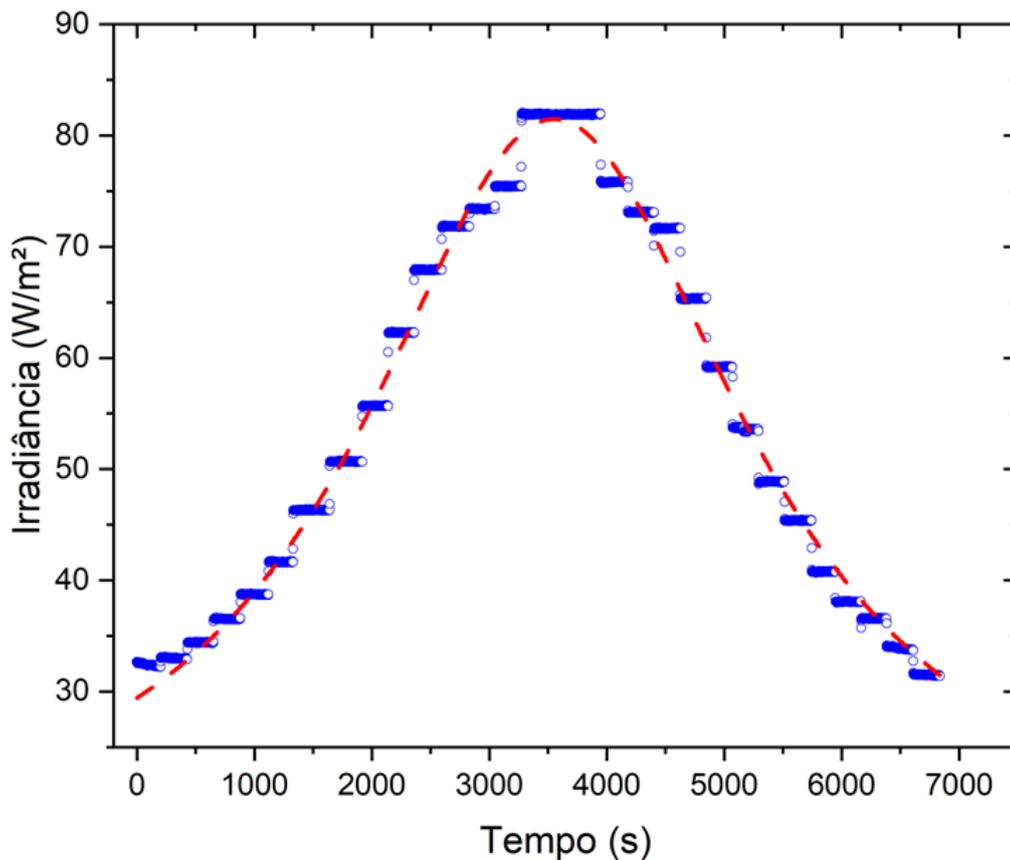


Figura 4.12 Resultado médio do segundo teste em bancada para o 1° anel de sensores.
Fonte: Própria autora.

4.4 CALIBRAÇÃO DAS CÉLULAS

Uma das curvas de calibração obtidas é apresentada na Figura 4.13. Essa curva foi obtida a partir do ajuste dos dados adquiridos utilizando a célula de topo desse *rib*, CH0, como calibrador das outras células do *rib*. Com as curvas de calibração, foi possível incluir na interface homem-máquina o fator de conversão para irradiância solar para cada uma das células usadas no equipamento.

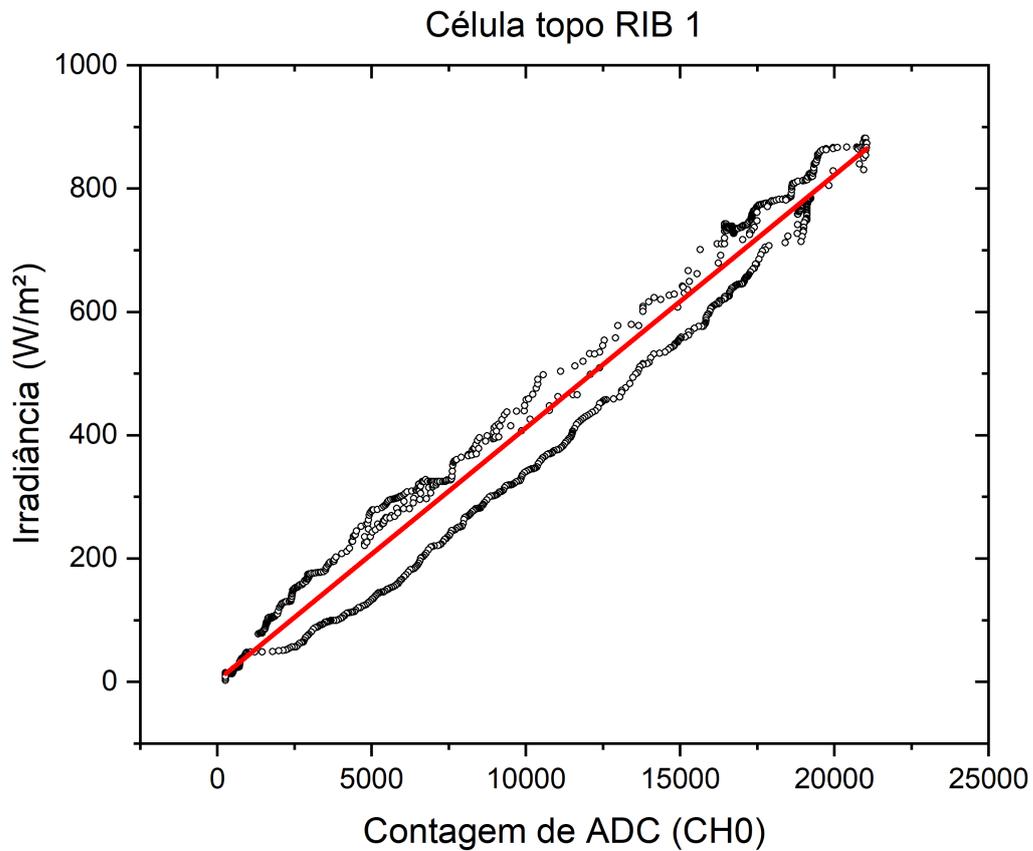


Figura 4.13 Curva de calibração de um dos *ribs* do *fly-eye*.
Fonte: Própria autora.

A curva da Figura 4.13 mostra os dados de irradiância versus contagem de ADC adquiridos durante um dia ensolarado. A curva de calibração para o *rib* 1 é apresentada na Equação 4.2.

$$y = a \cdot x + b$$

$$a = 0,04097$$

$$b = 2,31462$$

(4.2)

Sendo y o valor de irradiância em W/m^2 , "a" o coeficiente angular da reta e "b" o coeficiente linear. O ajuste realizado apresenta um $R^2 = 0,97782$, que mostra que o modelo tem um bom ajuste aos dados.

4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.5.1 Análise de irradiância a partir das condições climáticas do dia

Um dia ensolarado é caracterizado como um dia onde o céu se apresenta limpo, sem nuvens ou com poucas nuvens e por isso há uma incidência maior de raios solares na superfície da Terra. A Figura 4.14(a) apresenta o mapa de calor para o dia 20/06/2024, dia ensolarado de outono no hemisfério Sul. Nesse dia podemos observar que a distribuição média de irradiância medida foi de até 600 W/m^2 para o dia todo. O gráfico da Figura 4.14 (b) mostra a média de irradiância por anel de sensores ao longo de todo o período de aquisição do dia, onde a irradiância máxima para cada conjunto de canais a cada medida realizada chega próximo dos 700 W/m^2 .

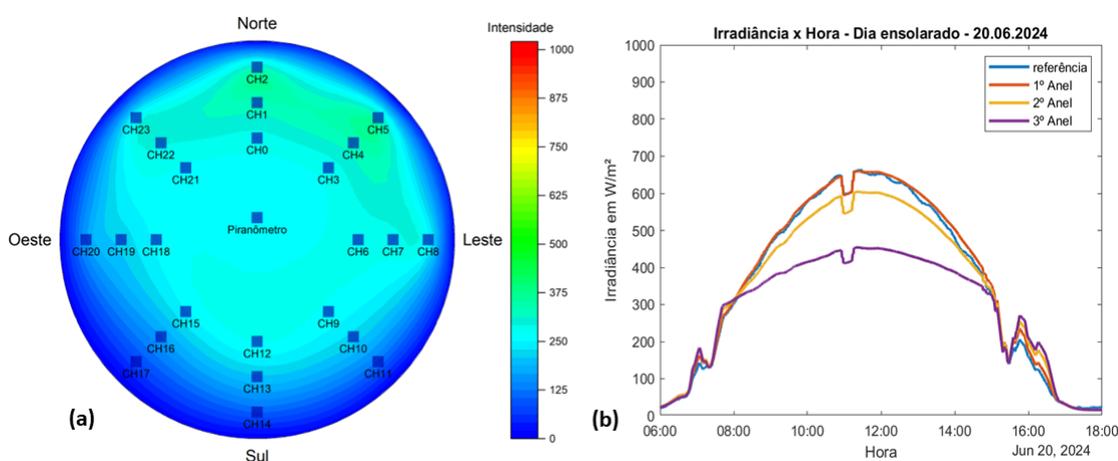


Figura 4.14 Dia ensolarado de outono no hemisfério Sul, 20/06/2024: (a) mapa de calor (b) gráfico da média de irradiância por anel.

Fonte: Própria autora.

Já em um dia chuvoso o céu apresenta muitas nuvens, sendo elas um bloqueador da luz solar. No dia 25/05/2024, o mapa de calor da Figura 4.15 (a), mostra um dia totalmente chuvoso durante o Outono, a distribuição média de irradiância medida foi de 250 W/m^2 . O gráfico da Figura 4.15(b) mostra uma média de irradiância para cada anel de sensores ao longo do dia de até 400 W/m^2 .

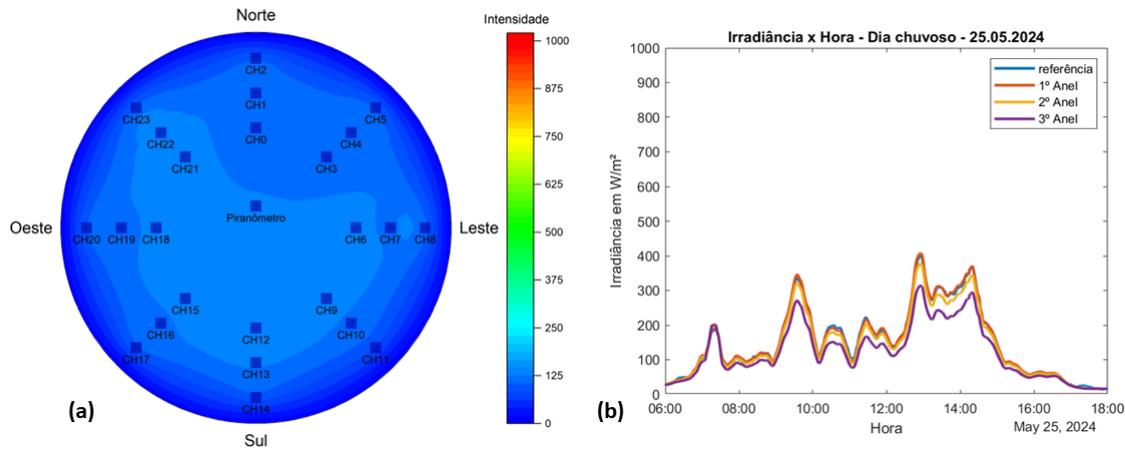


Figura 4.15 Dia chuvoso de outono no hemisfério Sul, 25/05/2024: (a) mapa de calor (b) gráfico da média de irradiância por anel.

Fonte: Própria autora.

O dia 07/06/2024 foi um dia intermediário entre o dia ensolarado e o dia chuvoso. Nesse dia o Sol apareceu, mas entre nuvens. A Figura 4.16(a) mostra o mapa de calor, onde foi observada uma distribuição média de irradiância de até $350 W/m^2$. Já o gráfico da Figura 4.16(b), apresenta a média de irradiância por anel de sensores para cada medida realizada nesse dia, onde a média de irradiância foi de até $700 W/m^2$.

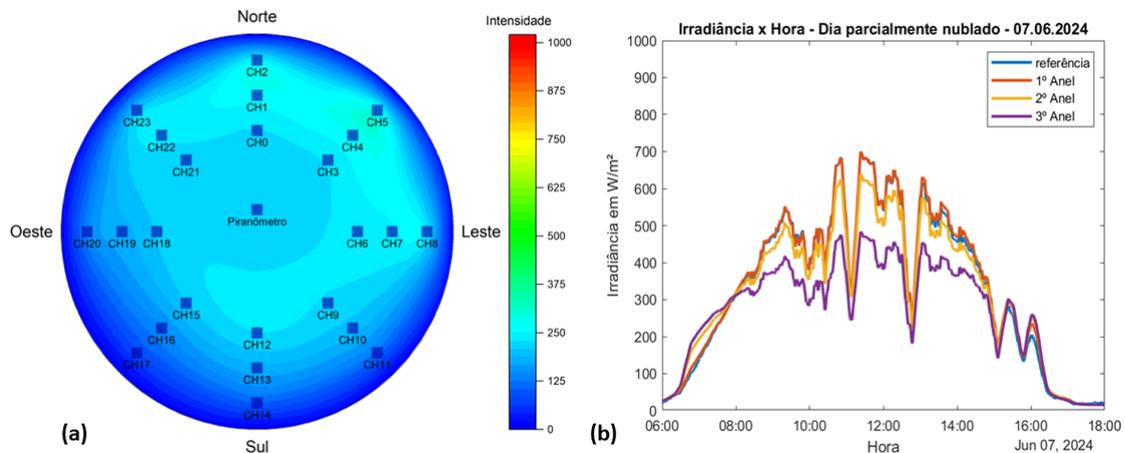


Figura 4.16 Dia nublado de outono no hemisfério Sul, 07/06/2024: (a) mapa de calor (b) gráfico da média de irradiância por anel.

Fonte: Própria autora.

Como explicado anteriormente o comportamento do Sol pode ser acompanhado pelo equipamento e pelo software desenvolvido, durante períodos do dia. A Figura 4.17 mostra o mapa de calor a cada 2h para o mesmo dia ensolarado citado anteriormente.

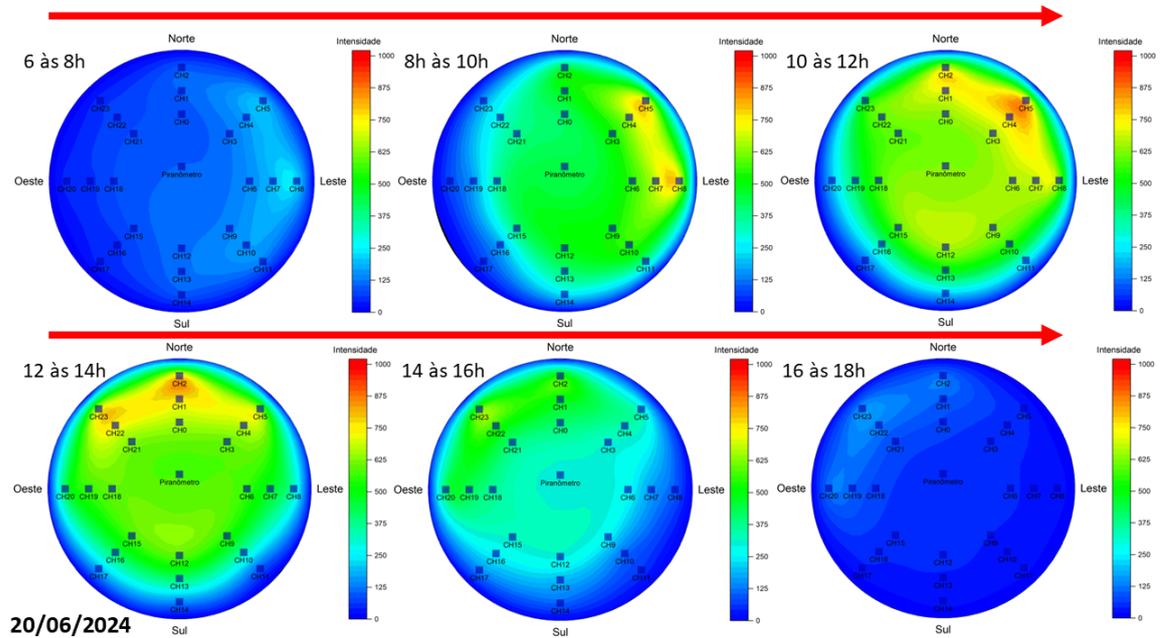


Figura 4.17 Mapa de calor 20/06/2024 a cada 2h.
Fonte: Própria autora.

A Figura 4.18 apresenta o mapa de calor por período do dia para o dia chuvoso citado.

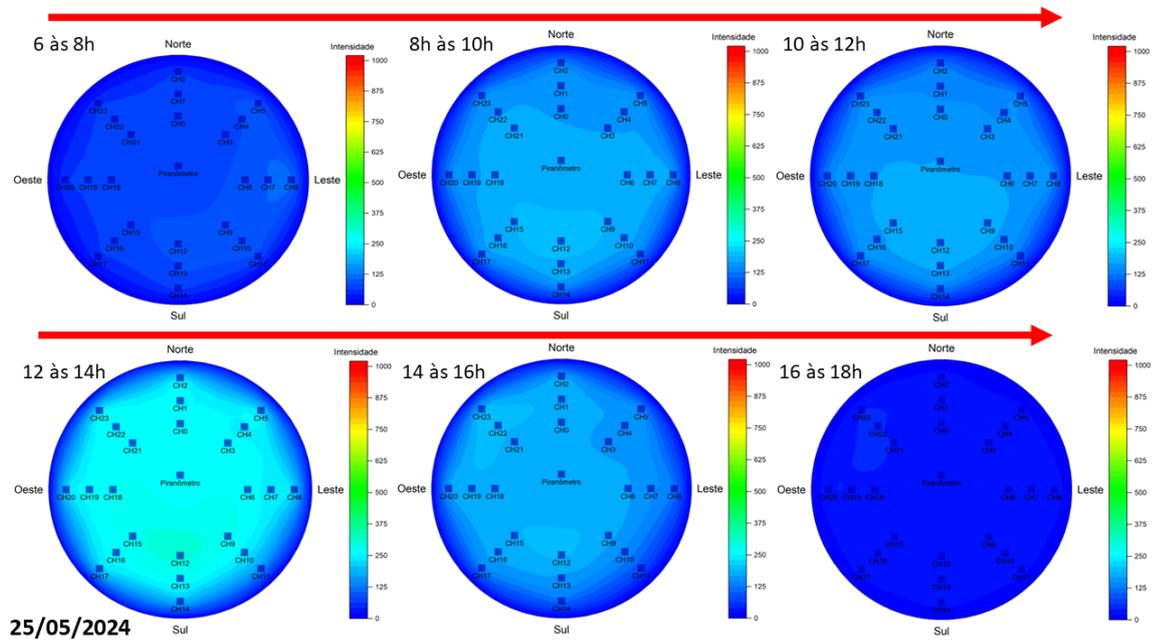


Figura 4.18 Mapa de calor 25/05/2024 a cada 2h.
 Fonte: Própria autora.

Já na Figura 4.19 é mostrado o mapa de calor por período de 2h para o dia 07/06/2024, dia nublado.

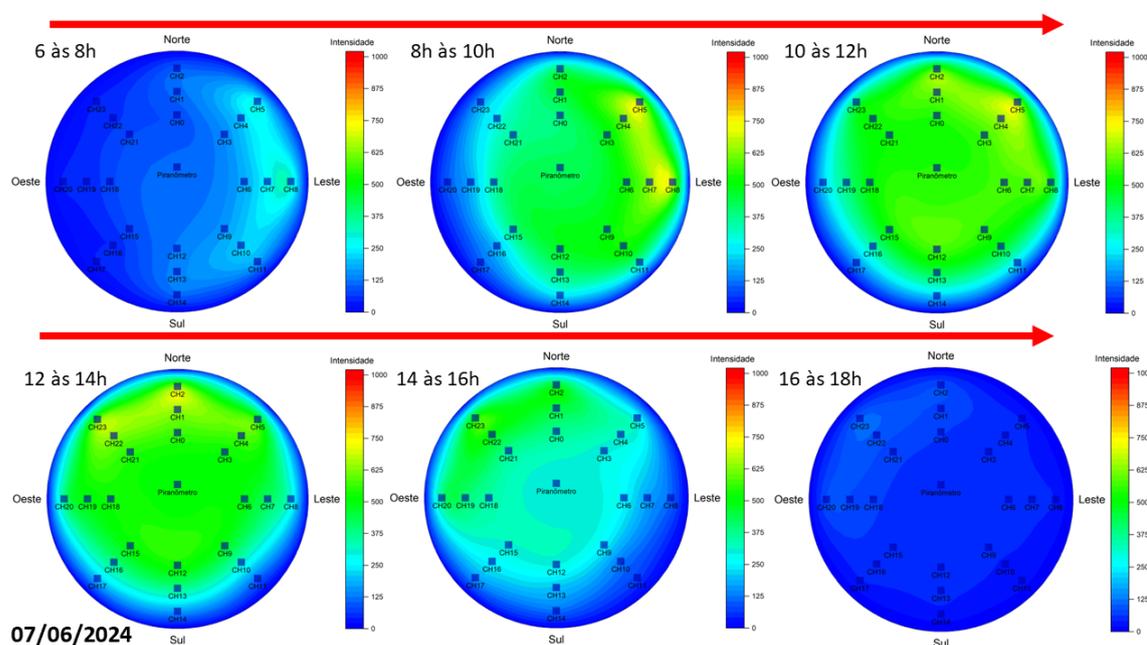


Figura 4.19 Mapa de calor 07/06/2024 a cada 2h.

Fonte: Própria autora.

Esses dias foram escolhidos para que fosse possível a visualização dos dois extremos, dia ensolarado e dia chuvoso, e um dia intermediário.

4.5.2 Análise da média de irradiância por semana

Os dados de irradiância, como já dito, foram obtidos no período de abril a julho de 2024, o que, em semanas, totalizam 15 semanas de aquisição de dados. O comparativo entre a média de irradiância medida pelo radiômetro ALS20 e as células solares em cada semana de medida, Figura 4.20, mostra uma irradiância média entre as semanas de 300 W/m^2 . Através desse gráfico, é possível observar também que a semana que tem a menor média de irradiância foi a semana 11, primeira semana do inverno.

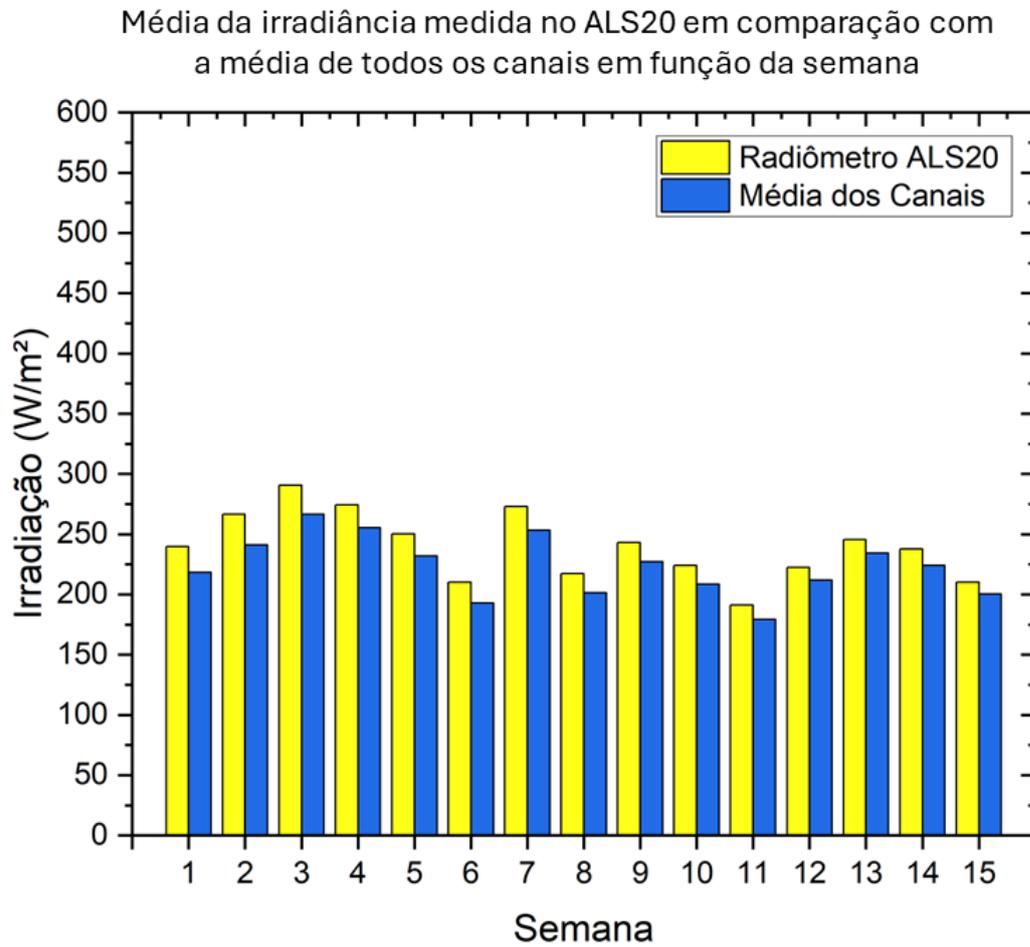


Figura 4.20 Média de irradiância medida no piranômetro ALS20 em comparação com a média de todos os canais em função da semana.

Fonte: Própria autora.

Os mapas de calor das 15 semanas de medidas também mostram a semana 11 como a semana de menor distribuição de irradiância. Esses mapas são mostrados na Figura 4.21.

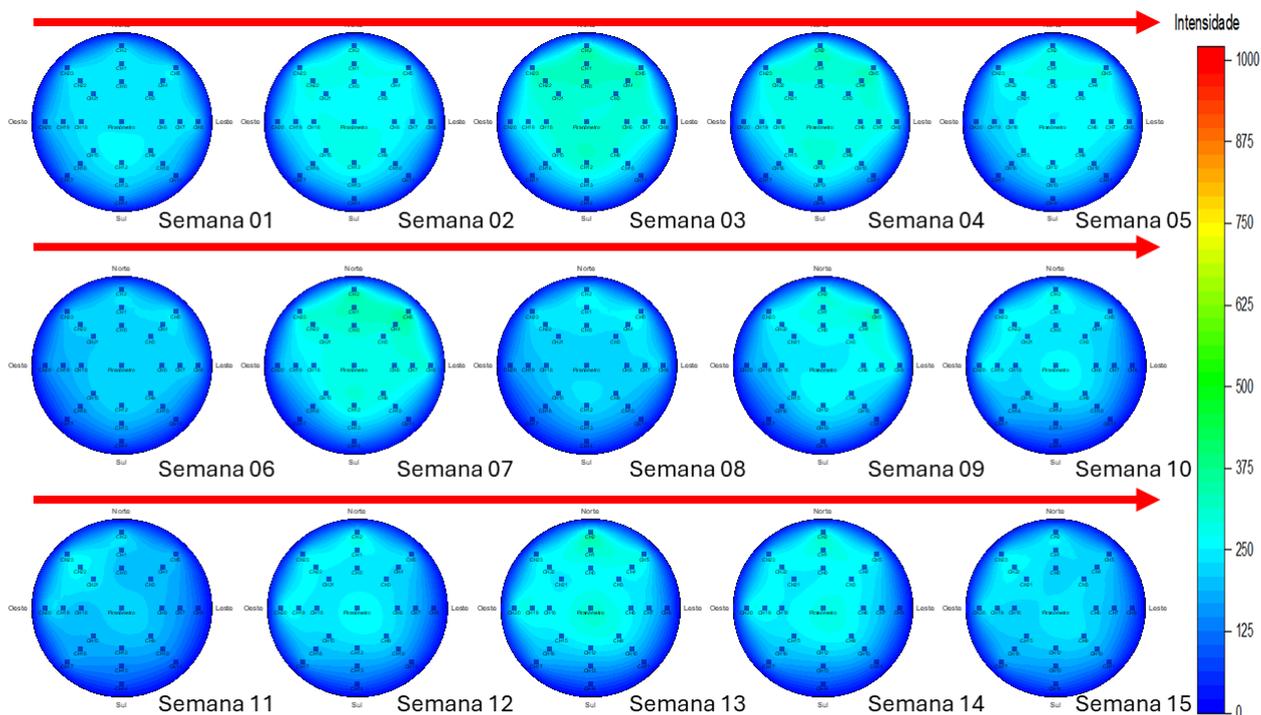
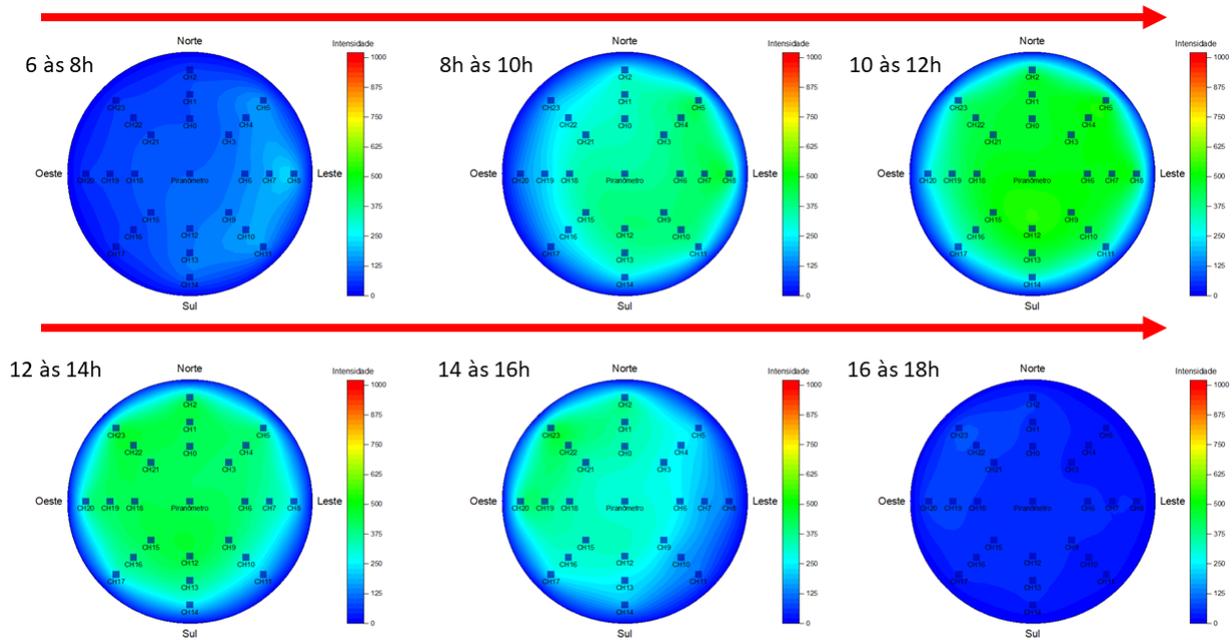


Figura 4.21 Distribuição de irradiância para as 15 semanas de medidas.
Fonte: Própria autora.

A distribuição de irradiância para cada semana podem ser observadas no período de 2h. A Figura 4.22 apresenta essa distribuição para a semana 1.



Semana 01

Figura 4.22 Distribuição de irradiância média medida pelo *fly-eye* em função do período do dia na semana 1.

Fonte: Própria autora.

Esses mapas de calor mostram algumas semanas com períodos com irradiâncias próximas a 700 W/m^2 e semanas com períodos com irradiância de até 600 W/m^2 . A partir deles é possível observar o comportamento do Sol ao longo das semanas de aquisição.

4.5.3 Análise da média de irradiância por mês

Como já dito, o radiômetro *fly-eye* desenvolvido foi instalado no terraço do IF-UFBA desde o dia 10/04/2024. Como mostrado na Tabela 3.1, 88 dias foram analisados no período de abril a julho de 2024.

A Figura 4.23 apresenta um comparativo da média de irradiância medida pelo piranômetro comercial ALS20 e a média de todos os canais para cada um dos meses analisados. Pela barra de desvio padrão mostrada no gráfico é possível inferir que as medidas de irradiância média entre o piranômetro e os canais são parecidas. Vale ressaltar que esse desvio considerado é um desvio qualitativo, isso porque a diferença entre os valores mínimos de irradiância e os valores máximos ao longo do dia solar é muito discrepante.

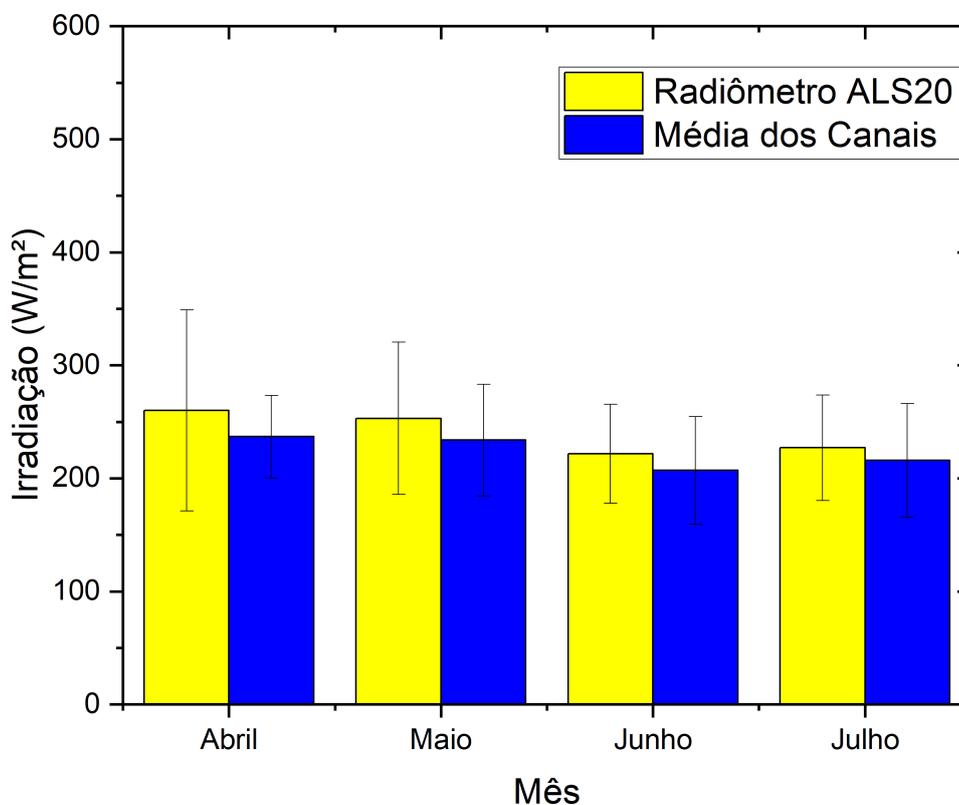


Figura 4.23 Média da irradiância medida no piranômetro ALS20 comparado com a média de irradiância de todos os canais em função do mês de aquisição.

Fonte: Própria autora.

Através da análise do comparativo entre a média de irradiância medida pelo piranômetro central e a média de irradiância medida por cada anel de sensores (Figura 4.24), é possível observar que o 1° anel apresenta uma média de irradiância praticamente igual à média do piranômetro de referência. Já os outros dois anéis apresentam uma média de medidas menor que a referência, sendo o 3° anel o que apresenta a menor média. Isso é explicado pelo posicionamento desses anéis, já que cada canal de cada anel tem uma angulação diferente em relação ao piranômetro central.

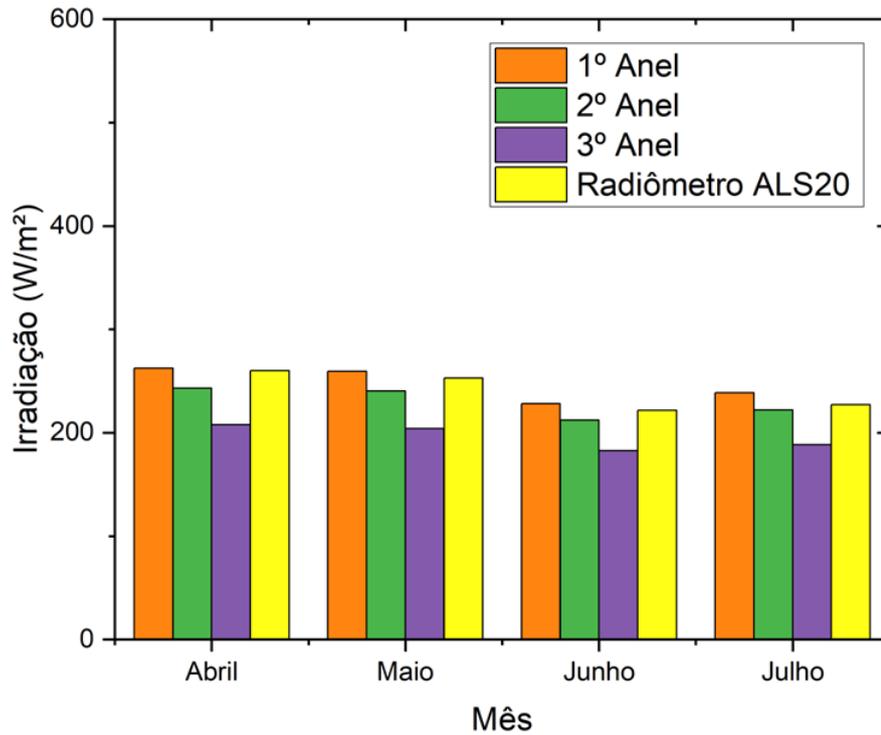


Figura 4.24 Média da irradiância medida no piranômetro ALS20 comparado com a média de irradiância de todos os canais em função do mês de aquisição.

Fonte: Própria autora.

Vários dias nublados e de chuva no período de abril a julho em Salvador-BA, principalmente no mês de abril, foram registrados. Pelo balanço apresentado pelo INMET... (2024b), para o mês de abril, a quantidade de chuva registrada foi de 821,7 mm, o que representa 188% acima da média normal para o período, influenciando assim na irradiância medida. Já o balanço do mês de maio, INMET... (2024a), mostra o total de precipitação de 276,4 mm, 9% abaixo da média normal para o período. Nos meses de junho e julho, o total de chuva registrado na Tabela de dados das estações foi de 178,3 mm e 94 mm, respectivamente (INMET..., 2024c). No mapa de calor de cada um desses meses (Figura 4.25) é possível confirmar esses dados, pois para esses meses a distribuição de irradiância média não ultrapassou os 300 W/m².

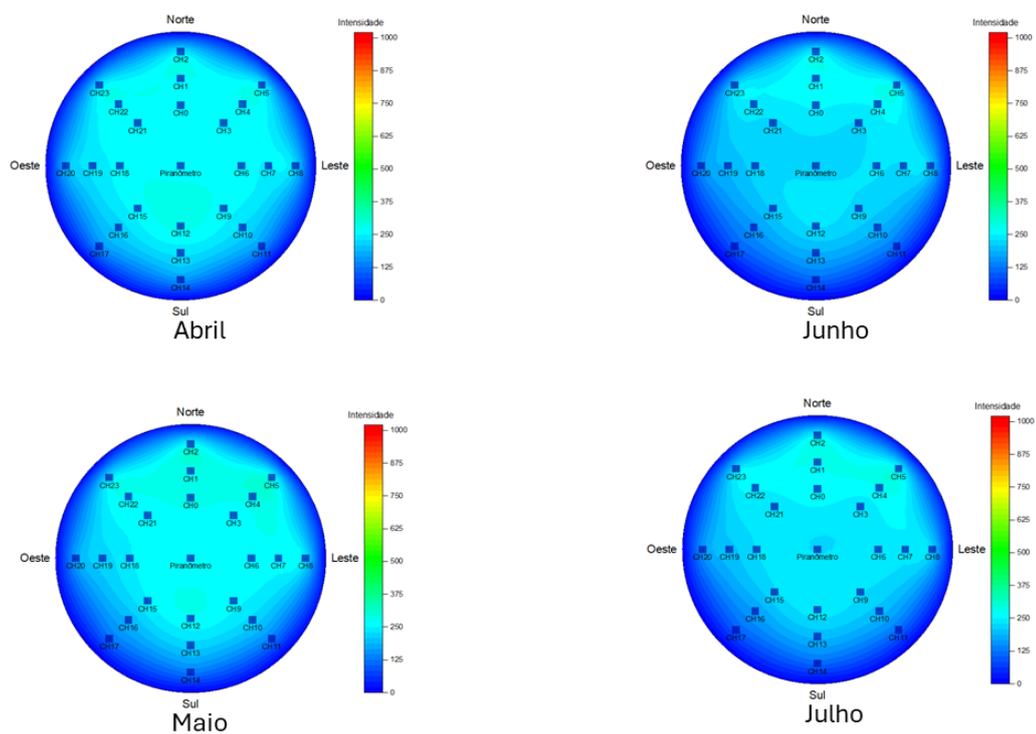
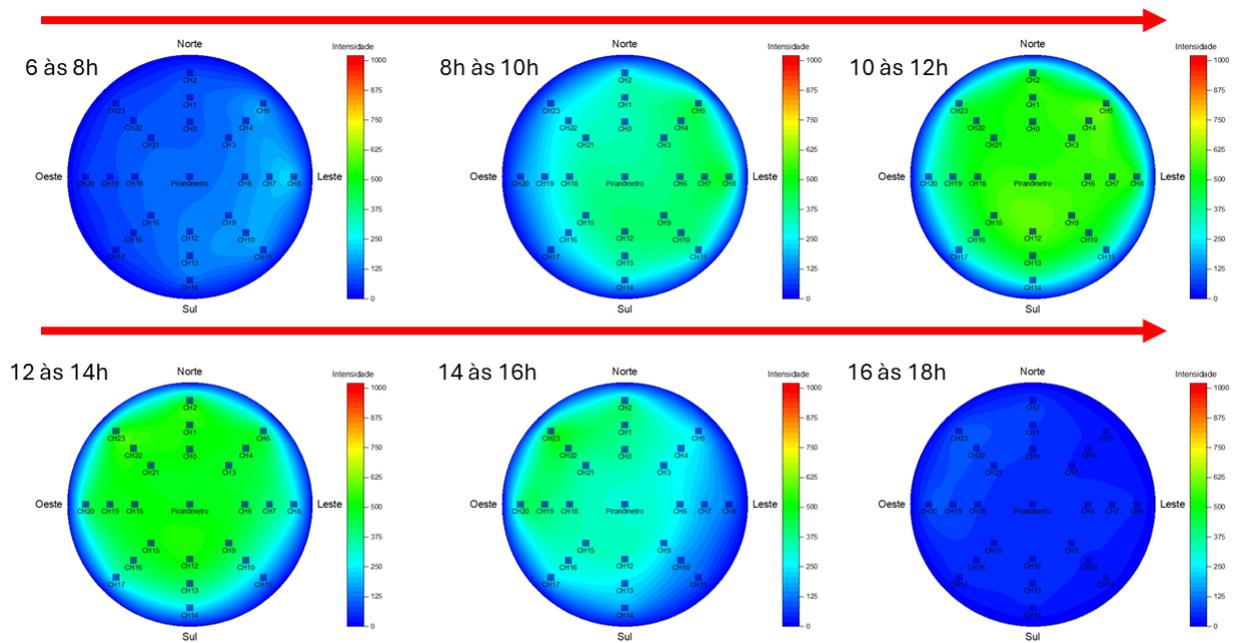


Figura 4.25 Distribuição da irradiância média medida pelo *fly-eye* por mês.
Fonte: Própria autora.

Os mapas de calor por período de 2h para cada um dos meses avaliados mostram uma irradiância média de até 400 W/m^2 . O mapa de calor para o mês de abril é mostrado na Figura 4.26.

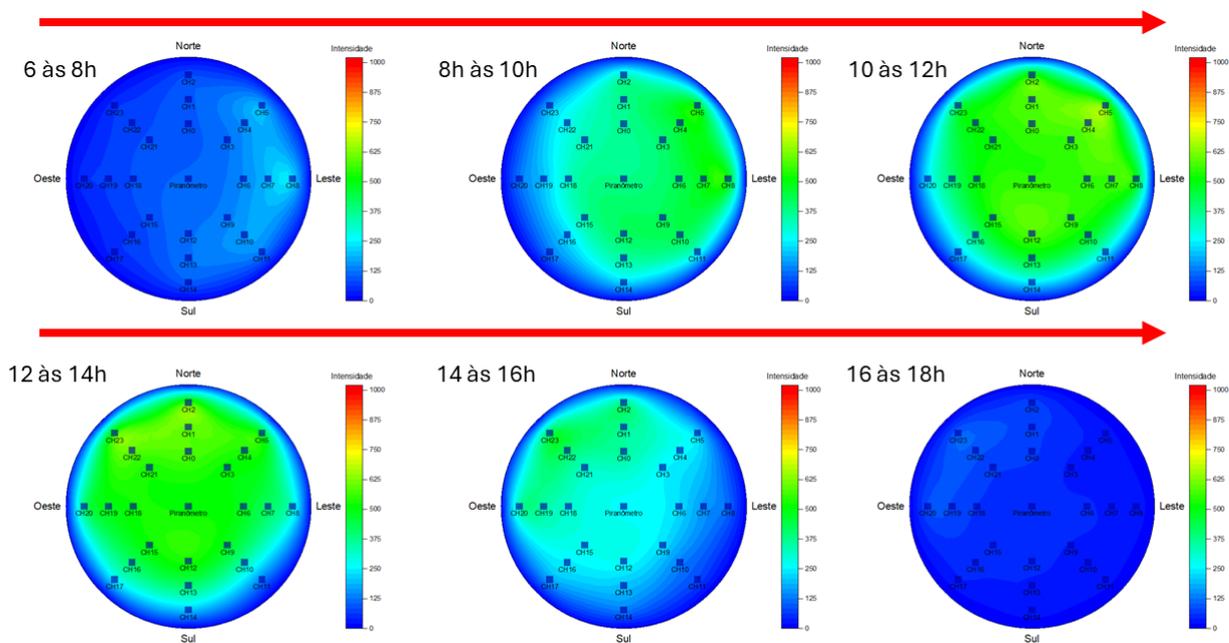


Abril

Figura 4.26 Distribuição da irradiância média medida pelo *fly-eye* em função do período do dia em abril.

Fonte: Própria autora.

Para o mês de maio, essa distribuição é mostrada na Figura 4.27.

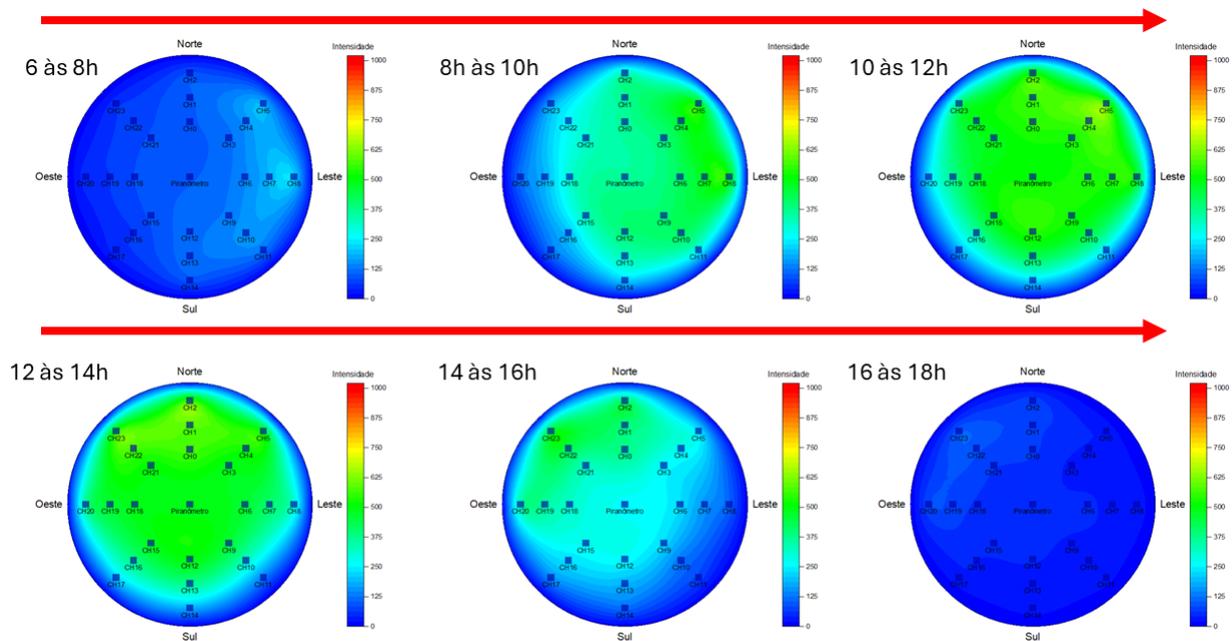


Maio

Figura 4.27 Distribuição da irradiância média medida pelo *fly-eye* em função do período do dia em maio.

Fonte: Própria autora.

Já a distribuição de irradiância para o mês de junho é mostrada no mapa de calor da Figura 4.28.

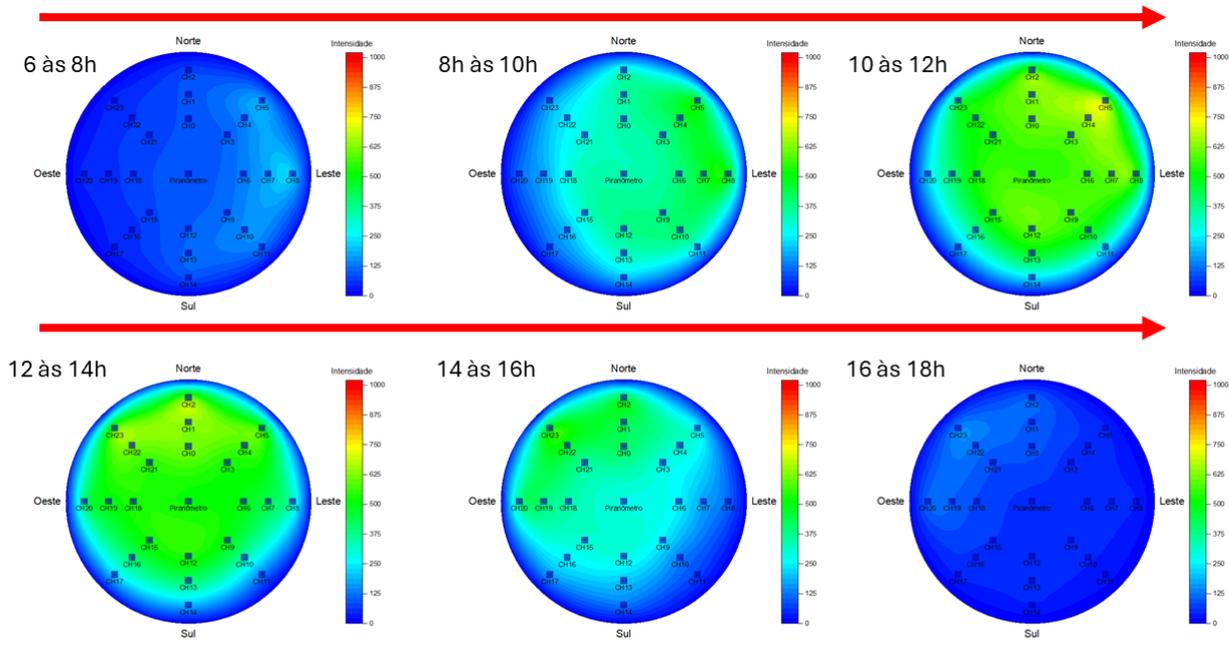


Junho

Figura 4.28 Distribuição da irradiância média medida pelo *fly-eye* em função do período do dia em junho.

Fonte: Própria autora.

O último mês avaliado, o mês de julho, tem sua distribuição de irradiância apresentada na Figura 4.29.



Julho

Figura 4.29 Distribuição da irradiância média medida pelo *fly-eye* em função do período do dia em julho.

Fonte: Própria autora.

Nos mapas de calor por período de 2h é possível perceber uma pequena diferença de irradiância média entre os meses analisados que corroboram com a quantidade de precipitação desses meses.

A leitura do Sol feita pelo rastreador aqui apresentado, corroborada pelos dados de média de irradiância local mensal, assim como os dados semanais, podem ser utilizados como balizadores do local e posição de instalação de painéis fotovoltaicos. Além disso, podem ajudar na automatização de painéis solares, tornando-os seguidores solares a partir do que é medido no rastreador. Esse rastreador ajuda a identificar se há uma irradiância local favorável à instalação, além de chamar atenção para pontos de sombreamento, por exemplo. A forma e local de instalação dos painéis solares é de suma importância para um melhor aproveitamento da sua potência geradora e conseqüente retorno financeiro.

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido.

CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES

Foi projetado e desenvolvido um equipamento em topologia *fly-eye* modelado e impresso utilizando manufatura aditiva com 350 mm de diâmetro e 24 células de silício policristalino, dispostas radialmente ao redor de um piranômetro comercial agrícola modelo ALS20, para aferição de irradiância solar local.

Para a estrutura mecânica do equipamento foi feita a impressão 3D das peças do radiômetro. Alguns materiais foram avaliados no que tange a sua resistência à exposição ao Sol e foi escolhido o Acrilonitrila Estireno Acrilato (ASA) por apresentar a resistência aos raios UV necessária ao equipamento sem a necessidade de nenhuma proteção adicional como o PLA que também foi testado.

A escolha das células solares utilizadas no *fly-eye* foi feita a partir de um conjunto de células da marca AK Solar 30x30 mm onde, as células com as maiores médias de tensão de circuito aberto foram selecionadas para o equipamento.

Em cada célula solar do radiômetro *fly-eye* foi adicionada uma resistência elétrica de carga de 15 Ω e 1% de precisão para materializar a tensão elétrica nas células, tendo em vista que células solares geram fotocorrente. Essa resistência foi escolhida porque as células solares estão sendo utilizadas como sensor, corroborando com os trabalhos feitos por Sampaio, David e Guedes (2010) e Albuquerque (2023), e por essa resistência apresentar uma resposta mais linear. Esses resistores foram instalados atrás de cada uma das células do equipamento, evitando assim a influência de resistências parasitas provenientes dos cabos e conexões.

Com a estrutura mecânica do *fly-eye* pronta, a acomodação dos sensores e o cabeamento foi realizado. Para isso, cabo do tipo manga 4x26 AWG foi utilizado em cada

conjunto de três células (*rib*), além de oito conectores mike-aviação quatro vias para a conexão dos *ribs* com o sistema de aquisição e um conector mike-aviação com três vias para a alimentação externa e conexão do piranômetro central com o sistema de aquisição.

O sistema de aquisição de dados para a caracterização da irradiância solar local foi desenvolvido utilizando o microcontrolador *Raspberry Pi Pico Zero* juntamente com dois multiplexadores 74HC4067 com 16 canais montados em placa de circuito universal. Nessa mesma placa foi adicionado um filtro passivo RC passa baixa para condicionar o sinal de saída de cada célula solar. O *firmware* de aquisição de dados embarcado foi escrito em linguagem de programação micropython utilizando a IDE Thonny.

O monitoramento e armazenamento dos dados coletados foi realizado através de uma IHM desenvolvida em linguagem Matlab®. Um sistema de representação das medidas de forma gráfica e mapa de calor foram desenvolvidos, sendo possível aferir os dados de irradiância local em tempo real e armazená-los para análise posterior.

Depois de pronto, o equipamento foi testado em bancada em duas séries de testes utilizando um simulador solar fixo. Na primeira série de testes, os resultados mostraram que o radiômetro tem seu funcionamento de acordo à teoria que diz que quanto maior a distância da fonte de luz menor a irradiância obtida. Além disso, a partir da análise por anéis de sensores, o 1° anel, que possui a menor inclinação com relação ao plano do piranômetro central, apresentou a maior irradiância, isso porque esse anel está mais próximo do piranômetro central e por isso recebe a luz de forma mais direta. Foi possível observar nesse teste também que há uma diferença entre a irradiância medida no piranômetro central e a média de irradiância medida pelo 1° anel de células. Essa diferença está ligada à distribuição de luz observada, já que a matriz de LEDs que forma a fonte de radiação do simulador não apresenta homogeneidade da luz devido a aspectos construtivos e características óticas intrínsecas ao iluminador. Foi observado que para uma altura maior que 52 cm do simulador solar em relação ao *fly-eye*, a diferença de irradiância medida no piranômetro central e a média no 1° anel de células tende a zero, o que é esperado.

O segundo teste também foi realizado utilizando a variação de distância entre o simulador e o equipamento, mas nesse teste buscou-se mimetizar o nascer e o pôr do Sol. A curva solar esperada foi obtida e a capacidade do sistema de aquisição e do equipamento de funcionar durante as 12h necessárias, ininterruptamente foi confirmada.

Através dos testes realizados foi obtido o ângulo de abertura do *fly-eye* que foi de 182°. Ao comparar o trabalho atual com o trabalho desenvolvido anteriormente por (SILVA, 2022), que tinha um ângulo de abertura de 214°, há uma diminuição desse ângulo do equipamento descrito aqui, mas ainda assim ele consegue enxergar luz até a linha do horizonte para os dois lados e, quando avaliamos a diminuição do volume total do detector e seu peso, que passou de 16 kg no anterior para 4 kg no *fly-eye* atual, a perda da capacidade de detecção fica minimizada.

Após a validação do equipamento em bancada, no dia 10/04/2024 ele foi instalado na laje superior do IF-UFBA para a aferição de dados solares. O recurso de auto calibração que o equipamento possui foi utilizado para a calibração das células com o equipamento já instalado. Um dia ensolarado foi escolhido para essa calibração e correlacionando a medida em contagem de ADC das células do 1° anel, anel mais próximo do piranômetro central, e a medida de irradiância do piranômetro central, uma curva de calibração para cada *rib* foi obtida.

Após um período de 88 dias, entre os meses de abril e julho de 2024, os dados obtidos foram selecionados de forma a ter um dia solar completo de medidas, ou seja, medidas de 6h às 18h, sem interrupção. Após essa triagem, os dados foram analisados através de gráficos de barra e mapas de calor considerando as condições climáticas de alguns dias escolhidos, os meses e as semanas de aquisição. Com essas análises foi possível observar as médias de irradiância em cada condição analisada e corroborar o funcionamento do equipamento como um rastreador de irradiância local podendo ser utilizado como ferramenta para a escolha do melhor local de instalação de painéis fotovoltaicos.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos com o radiômetro *fly-eye* aqui apresentado foram muito satisfatórios, porém realizar uma aquisição de dados por um período de tempo maior, de um ano ou mais, possibilitaria a comparação entre os mesmos períodos em anos diferentes. Além disso, estudar como melhorar a estrutura mecânica do equipamento de forma a proteger o cabeamento das células solares da chuva e a utilização de um microcontrolador wifi, possibilitando o armazenamento em nuvem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, A. A. T. d. *Sistema remoto de medição de irradiância solar para obtenção do desempenho global de sistemas fotovoltaicos*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2023.
- BALSAN, L. *Tratamento de efluente contendo metomil e imidacloprido em reator hermético fotolítico solar*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Mato Grosso, 2019.
- BARCZWSKI, B. F. et al. Aplicações da manufatura aditiva em oftalmologia. *Revista Brasileira de Oftalmologia*, SciELO Brasil, v. 81, p. e0052, 2022.
- BESKO, M.; BILYK, C.; SIEBEN, P. G. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3d. *Gestão Tecnologia e Inovação*, v. 1, n. 3, p. 9–18, 2017.
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos, (11aed.)*. [S.l.]: Pearson, 2013.
- CALÇA, M. V. C. *Controle de qualidade e consistência nas medidas das irradiâncias solares global, difusa e direta para construção de um banco de dados*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2019.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. [S.l.]: LTC, 2016.
- CAMPOS, É. T. d. S. Luminosidade, cores e fotometria. *Universidade de Brasília (UnB)*, 2017.
- CARNEIRO, J. A. Semicondutores: modelo matemático da célula fotovoltaica. *Escola de Ciências - Universidade do Minho*, 2010.
- CHEGAAR, M.; MIALHE, P. Effect of atmospheric parameters on the silicon solar cells performance. *Journal of Electron Devices*, Citeseer, v. 6, n. 173-176, 2008.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar engineering of thermal processes*. [S.l.]: Wiley New York, 1980.
- ENERGÉTICA, E. d. P. *Plano Nacional de Energia 2050 - Ministério de Minas e Energia*. [S.l.], 2020.

FREIRE, L. A. D. *Desenvolvimento de um piranômetro fotovoltaico*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

GIORDANO, C. M.; ZANCUL, E. d. S.; RODRIGUES, V. P. Análise dos custos da produção por manufatura aditiva em comparação a métodos convencionais. *Revista Produção Online*, v. 16, n. 2, p. 499–523, 2016.

GOMES, J. G. et al. Desenvolvimento de bancada de teste didática para o estudo da influência da temperatura na eficiência de células solares. In: *Anais do 51º Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia*. [S.l.: s.n.], 2023.

HONSBURG, C.; BOWDEN, S. *PV Education*. 2018. Acessado em 10 de junho de 2024. Disponível em: <<https://www.pveducation.org/>>.

INMET - Balanço de Maio de 2024 na capital baiana. 2024. Acesso em 30 de julho de 2024. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/Balanço-Salvador-BA-Maio.pdf>>.

INMET - Balanço de abril de 2024 em Salvador BA. 2024. Acesso em 30 de julho de 2024. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/Balanço-de-Salvador-abril_r.pdf>.

INMET - Tabela de dados das estações. 2024. Acesso em 30 de julho de 2024. Disponível em: <<https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/82915>>.

KUNKEL, M. et al. Manufatura aditiva do tipo fdm na engenharia biomédica. In: *Fundamentos e Tendências em Inovação Tecnológica*. [S.l.]: Seattle, United States: Kindle Direct Publishing, 2020. v. 1, cap. 4, p. 50–69.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão. *Revista virtual de química*, v. 7, 2015.

MOZETO, A. A. Química atmosférica: a química sobre nossas cabeças. *Cadernos temáticos de química nova na escola*, 2001.

OLIVEIRA, F. S. d. *Desenvolvimento de traçador de curvas IV portátil para arranjos fotovoltaicos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

PAIS, J. C. P. Manufatura aditiva numa empresa de fabrico de componentes para a indústria automóvel. *Universidade de Aveiro*, 2022.

PAULA, J. F. S. d. et al. Confecção e análise de um piranômetro fotovoltaico de baixo custo. In: *Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*. [S.l.: s.n.], 2020.

PEREIRA, E. B. et al. Atlas brasileiro de energia solar. *São José dos Campos: INPE*, v. 1, 2017.

- PEREIRA, F. D. S. *Manufatura aditiva: Barreiras e oportunidades para aplicação na indústria brasileira*. Dissertação (Mestrado) — Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2022.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Grupo de Trabalho de Energia Solar-GTES*. [S.l.], 2014.
- RODRIGUES, V. P. et al. Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações. *Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas*, v. 12, n. 3, p. 1–1, 2017.
- SAMPAIO, J. d. S.; DAVID, D. G.; GUEDES, G. P. Estudo de células fotovoltaicas de silício como radiômetros. In: *Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*. [S.l.: s.n.], 2010.
- SANTOS, J. C. d. Radiação ultravioleta: estudo dos índices de radiação, conhecimento e prática de prevenção a exposição na região ilhéus/itabuna-bahia. *Universidade Estadual de Santa Cruz*, 2010.
- SANTOS, J. M. d. A. *Sistema de aquisição de dados fotovoltaicos para a caracterização da insolação local para servir de apoio a micro e pequenos geradores*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Bahia, 2019.
- SANTOS, L. M. et al. Tipos de polímeros utilizados como matéria prima no método de manufatura aditiva por fdm: uma abordagem conceitual. *XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 2018.
- SILVA, I. T. d. *Desenvolvimento de um sistema mecatrônico para posicionamento de um painel fotovoltaico e comparação com painel fixo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Bahia, 2017.
- SILVA, L. B. d. *Detector fly eye para a determinação da irradiância solar local*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Bahia, 2022.
- SISTO, H. L. Influência dos parâmetros de impressão 3d na resistência ao impacto de peças impressas em material asa. *Universidade Federal de Santa Maria*, 2023.
- STAMBUK, R. H. Influência da temperatura de operação no desempenho de sistemas fotovoltaicos. *Universidade Tecnológica Federal do Paraná*, 2017.
- TECHNOLOGY, E. *ALS20 Ambient Light Sensor User Manual*. [S.l.], 2019.
- VEIT, D. R. *Impactos da Manufatura Aditiva nos sistemas produtivos e suas repercussões nos critérios competitivos*. Tese (Doutorado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2018.
- VERA, L. H.; BUSSO, A. J.; BENÍTEZ, F. Piranómetro fotovoltaico con sistema autónomo de adquisición de dados. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v. 9, 2005.

VILELA, W. A. *Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar*. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

VOLPATO, N.; CARVALHO, J. d. Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3d. In: *Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D*. [S.l.]: Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, 2017. v. 3, cap. 1, p. 15–29.



TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO DIGITAL NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFBA

1 Identificação do tipo de documento

Tese [] Dissertação [] Monografia [] Trabalho de Conclusão de Curso []

2 Identificação do autor e do documento

Nome completo: Juliane Grasiela de Carvalho Gomes

CPF: 043.513.015-38

Telefone: (071)98209-6241 e-mail: juliane.gomes@ufba.br

Programa/Curso de Pós-Graduação/Graduação/Especialização: Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica

Título do documento: Novo radiômetro solar em topologia fly-eye produzido por manufatura aditiva.

Data da defesa: 23/08/24

3 Autorização para publicação na Biblioteca Digital da UFBA

Autorizo com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998 e na Lei nº 10.973, de 2 de dezembro de 2004, a Universidade Federal da Bahia (UFBA) disponibilizar gratuitamente sem ressarcimento dos direitos autorais, o documento supracitado, de minha autoria, na Biblioteca Digital da UFBA para fins de leitura e/ou impressão pela Internet a título de divulgação da produção científica gerada pela Universidade.

Texto completo [] Texto parcial []

Em caso de autorização parcial, especifique a (s) parte(s) do texto que deverão ser disponibilizadas:

Salvador, 23/08/24

Local Data

Juliane Grasiela de Carvalho Gomes
Assinatura do (a) autor (a) ou seu representante legal

4 Restrições de acesso ao documento

Documento confidencial? [] Não

[] Sim Justifique: _____

Informe a data a partir da qual poderá ser disponibilizado na Biblioteca Digital da UFBA:

__/__/____ [] Sem previsão

Assinatura do Orientador: _____ (Opcional)

O documento está sujeito ao registro de patente? Não []

Sim []

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim []

Não []

Preencher em três vias. A primeira via deste formulário deve ser encaminhada ao Sistema de Bibliotecas da UFBA/Biblioteca Central; a segunda deve ser enviada para a Biblioteca de sua Unidade, juntamente com o arquivo contendo o documento; a terceira via deve permanecer no Programa de Pós-Graduação para o registro do certificado de conclusão do Curso.

Universidade Federal da Bahia
Sistema de Biblioteca da UFBA
Grupo Técnico da Biblioteca Digital da UFBA



CADASTRO DE INFORMAÇÕES PARA PUBLICAÇÃO DIGITAL
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFBA

1. Identificação do tipo de material	
Tese () Dissertação (X) Monografia () Trabalho de Conclusão de Curso ()	
2. Colegiado do Curso de Pós-Graduação:	
Título: Novo radiômetro solar em topologia fly-eye produzido por manufatura aditiva.	
Autor(a): Juliane Grasiela de Carvalho Gomes	
CPF: 043.513.015-38	E-mail: juliane.gomes@ufba.br
Orientador(a): :	
Nome: Iuri Muniz Pepe	
CPF: 328.133.845-34	E-mail lapo.if@gmail.com
Co-Orientadores	
Nome: Leandro do Rozário Teixeira	
CPF: 033.629.475-14	E-mail leandro.r.teixeira@gmail.com
Membros da Banca	
Nome: Iuri Muniz Pepe	
CPF: 328.133.845-34	E-mail lapo.if@gmail.com
Nome: Luciana Martinez	
CPF: 162.090.338-57	E-mail lucianam@ufba.br
Nome: Kleber Freire da Silva	
CPF: 341.733.235-49	E-mail kfreire@ufba.br
Nome:	
CPF:	E-mail
Data de Homologação Pós Graduação:	
Financiadores: CAPES	
Data: 23/08/2024	
Assinatura: <i>Juliane Grasiela de Carvalho Gomes</i>	

DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins que o texto final apresentado para a conclusão do meu curso de mestrado em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia é de minha autoria. Declaro também que quaisquer informações utilizadas neste texto, mas que sejam provenientes de outros trabalhos, têm fonte claramente expressa e, quando for o caso, o seu uso foi devidamente autorizado pelo(s) respectivo(s) autor(es).

Salvador, 23 de agosto de 2024.

Juliane Grasiela de Carvalho Gomes
Nome: Juliane Grasiela de Carvalho Gomes
CPF: 043.513.015-38