

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA E FÍSICA  
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

ULISSES CALÇADA EVANGELISTA

ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL HORIZONTAL UTILIZANDO  
O SENSOR MULTIESPECTRAL AS7341

Alegre/ES  
2023

ULISSES CALÇADA EVANGELISTA

ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL HORIZONTAL UTILIZANDO  
O SENSOR MULTIESPECTRAL AS7341

Trabalho de conclusão de curso da disciplina  
Trabalho de Conclusão de Curso 2, elaborado  
por Ulisses Calçada Evangelista no curso de  
Licenciatura em Física do Departamento de  
Química e Física da Universidade Federal do  
Espírito Santo - Campus Alegre. Orientador:  
Prof. Dr. Roberto Colistete Júnior

Orientador: Prof. Dr. Roberto Colistete Júnior  
Co-orientador: Prof. Dr. Cláudio Moises Ribeiro

Alegre/ES

2023

ULISSES CALÇADA EVANGELISTA

ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL HORIZONTAL UTILIZANDO  
O SENSOR MULTIESPECTRAL AS7341

Trabalho de conclusão de curso da disciplina  
Trabalho de Conclusão de Curso 2, elaborado  
por Ulisses Calçada Evangelista no curso de  
Licenciatura em Física do Departamento de  
Química e Física da Universidade Federal do  
Espírito Santo - Campus Alegre. Orientador:  
Prof. Dr. Roberto Colistete Júnior

Aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Roberto Colistete Júnior  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Departamento de Física e Química  
Orientador

---

Prof. Dr. Cláudio Moises Ribeiro  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Departamento de Física e Química  
Avaliador 1

---

Prof. Dr. Guilherme Rodrigues Lima  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Departamento de Física e Química  
Avaliador 2

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço à minha família, meus pais Ana Verônica de Oliveira Calçada e João Geraldo Martins Evangelista, minha irmã Elena Calçada Evangelista, minha noiva Larissa Gonçalo Cabral, minha avó Genilda de Oliveira Calçada e padrasto Josimar da Silva Peçanha pelo apoio tanto moral quanto financeiro. Visto que sem o apoio de todos eles, todo o percurso percorrido até aqui para a realização deste trabalho seria muito mais árduo.

Ao meu orientador, Cláudio Moises Ribeiro, agradeço pelos apontamentos e direcionamentos, pela disponibilidade e paciência e pelos materiais disponibilizados e apoio moral.

Ao professor Roberto Colistete Júnior, agradeço pelos materiais disponibilizados e pelas dicas relativas à programação e ao *hardware*.

Aos meus amigos e colegas, agradeço pela paciência relacionada a minha ausência, principalmente no período de tempo em que foi realizado este trabalho.

Aos professores e colegas da graduação, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para a minha formação, tornando-me melhor preparado para a execução deste trabalho.

## RESUMO

Sabe-se que entendimento adequado do comportamento da irradiância solar pode melhorar o projeto e o diagnóstico de sistemas fotovoltaicos, especialmente quando estes passam a ser protagonistas da geração de energia elétrica. Algumas previsões colocam as células fotovoltaicas como a principal rota tecnológica para geração de energia elétrica em escala global em um futuro não muito distante. Deste modo, para tal entendimento, são necessários instrumentos de medição específicos como Radiômetros, Piranômetros, Espectrômetros, Espectrofotômetros e Solarímetros que, apesar da alta confiabilidade e precisão, possuem um custo elevado. Contudo, diversos sensores espectrais e multiespectrais de custo relativamente baixos estão disponíveis para a medição espectral. Neste sentido, com o intuito de obter mais informações sobre as possibilidades de utilização desses sensores em aplicações futuras na área de geração de energia elétrica, o presente trabalho pretende fazer a estimativa da irradiância solar global no plano horizontal com dados obtidos por meio do sistema de medição com sensor multiespectral de baixo custo As7341 utilizando o solarímetro Seaward Solar Survey 200R base comparativa. Ao longo do trabalho, será apresentada a construção do sistema de medição de baixo custo além dos testes feitos com o sensor, posteriormente, serão abordados o banco de dados coletados para a obtenção da estimativa da irradiância global no plano horizontal e, por fim, a estimativa irradiância global no plano horizontal. Os resultados obtidos foram: um protótipo da Estação de Coleta de Dados referente ao sensor As7341 com estrutura e sistema de coleta de dados funcionais e dois modelos fortes para a estimativa da irradiância global no plano horizontal.

**Palavras-chaves:** Sensor As7341. Sensores multiespectrais. Irradiância solar. Irradiância global horizontal.

## ABSTRACT

It is known that a proper understanding of the behavior of solar irradiance can improve the design and diagnosis of photovoltaic systems, especially when they become protagonists in the generation of electricity. Some predictions place photovoltaic cells as the main technological route for generating electricity on a global scale in the not too distant future. Thus, for such an understanding, specific measuring instruments are needed such as Radiometers, Pyranometers, Spectrometers, Spectrophotometers and Solarimeters which, despite their high reliability and precision, have a high cost. However, several relatively low cost spectral and multispectral sensors are available for spectral measurement. In this sense, with the aim of obtaining more information about the possibilities of using these sensors in future applications in the area of electric power generation, the present work intends to estimate the global solar irradiance in the horizontal plane with data obtained through the system of measurement with low-cost multispectral sensor As7341 using the Seaward Solar Survey 200R solarimeter base comparison. Throughout the work, the construction of the low-cost measurement system will be presented, in addition to the tests carried out with the sensor, later, the database collected to obtain the estimate of the global irradiance in the horizontal plane will be approached and, finally, the global irradiance estimation in the horizontal plane. The results obtained were: a prototype of the Data Collection Station referring to the As7341 sensor with a functional structure and data collection system and two strong models for estimating the global irradiance in the horizontal plane.

**Keywords:** Sensor As7341. Multispectral sensors. Solar irradiance. Global horizontal irradiance.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Espectro de emissão solar . . . . .	20
Figura 2 – Comparação entre as curvas de Irradiância do corpo negro, no topo da atmosfera e após atravessar a atmosfera (atenuada) . . . . .	20
Figura 3 – Geometria Sol-Terra na determinação das estações do ano . . . . .	21
Figura 4 – Ângulos notáveis que permitem descrever a posição do Sol em relação à Terra. . . . .	22
Figura 5 – Componentes da irradiação Solar . . . . .	24
Figura 6 – Diagrama de fotodiodos do sensor As7341. . . . .	24
Figura 7 – Gráfico referente à resposta normalizada pelo canal 8 dos centros das bandas espectrais do sensor As7341 em comprimentos de onda. . . . .	29
Figura 8 – (a) Foto da estação de coleta de dados aberta sem o limitador de cartolina, (b) foto da placa difusora de plástico com espessura de 0,01 m e do limitador de cartolina, (c) foto da estação de coleta de dados aberta com o limitador de cartolina e (d) foto da estação de coleta de dados. .	31
Figura 9 – Diagrama da montagem do teste 1 de avaliação do sensor. . . . .	32
Figura 10 – (a) Foto do aparato experimental do teste montando com a fonte luminosa a 0,03 m do sensor, (b) foto do sensor As7341 e do Esp32 fixados nos cavaleiros posicionados no primeiro trilho magnético, (c) foto do aparato experimental do teste montando com difusor a 0,03m e fonte luminosa a 1,50 m do sensor e (d) foto do sensor As7341 fixado no cavaleiro e da placa difusora a 0,05m posicionados no primeiro trilho magnético . . . . .	33
Figura 11 – (a) Foto do aparato experimental do segundo teste montando, (b) foto da base transferidora utilizada no teste, (c) foto da régua utilizada no ajuste de posição da estação e (d) foto das lentes colimadoras com distâncias focais de 5 e 25 cm utilizadas no teste. . . . .	35
Figura 12 – Diagrama da montagem do teste 2 de avaliação do sensor. . . . .	36
Figura 13 – (a) Foto da Estação de coleta de dados no momento da medição em 03 de maio e (b) foto do céu claro e sem nuvens no momento da medição em 03 de maio. . . . .	37
Figura 14 – (a) Foto da Estação de coleta de dados no momento da medição em 15 de maio e (b) foto do céu claro e com nuvens no momento da medição em 15 de maio. . . . .	38
Figura 15 – (a) Foto da Estação e do Solarímetro 200R do momento da coleta de dados no dia 28 de junho e (b) foto do céu claro e sem nuvens no momento da coleta de dados também no dia 28 de junho. . . . .	40

Figura 16 – Gráfico da contagem de fótons em função do ganho, configurações da medição: sem placa difusora, fonte a 0,1 m, $ATIME = 39$ e $ASTEP = 599$ . . . . .	41
Figura 17 – Contagem de fótons dos centros de bandas nas condições: sem difusor e com difusor a 0,03 e 0,05 metros e a fonte a 1 metro. . . . .	42
Figura 18 – Gráfico referente a média das leituras selecionadas e niveladas com difusor normalizadas pelas leituras selecionadas e niveladas sem difusor referente aos centros de banda dos canais VIS, NIR e <i>clear</i> . . . . .	43
Figura 19 – (a) Gráfico da contagem de fótons da Estação de coleta de dados em função do ângulo, com as seguintes configurações fixas $g = 8$ , $ATIME = 39$ , $ASTEP = 599$ , $D_{fonte} = 1,15m$ e feixe colimado; (b) gráfico da contagem de fótons de (a) normalizada em função do ângulo e o a função cosseno ( $\cos_{ref}$ ). . . . .	44
Figura 20 – (a) Gráfico da resposta média normalizada da Estação de coleta de dados em função do ângulo de incidência e a função cosseno ( $\cos_{ref}$ ), (b) gráfico da resposta normalizada mínima recomendada pelo manual do As7341 em função do ângulo de incidência. . . . .	44
Figura 21 – (a) Gráfico da resposta média normalizada da Estação em função do ângulo referente aos feixes colimado e não colimado da fonte de luz e (b) gráfico da resposta média normalizada da Estação em função do ângulo referente aos lados liso e áspido do difusor . . . . .	45
Figura 22 – (a) Gráfico da contagem básica de cada medição do dia 3 de maio, (b) gráfico da contagem básica de cada medição do dia 15 de maio e (c) gráfico da contagem básica de cada medição do dia 22 de junho. . . . .	46
Figura 23 – (a) Gráfico da contagem de fótons normalizada pelo <i>clear</i> em função do tempo de integração do dia 3 maio, (b) gráfico da contagem de fótons normalizada pelo <i>clear</i> em função do tempo de integração do dia 15 maio e (c) gráfico da contagem de fótons normalizada pelo <i>clear</i> em função do tempo de integração do dia 22 junho. . . . .	47
Figura 24 – (a) Gráfico da contagem de fótons normalizada pelo <i>clear</i> em função do ganho do dia 3 maio, (b) gráfico da contagem de fótons normalizada pelo <i>clear</i> em função do ganho do dia 15 maio e (c) gráfico da contagem de fótons normalizada pelo <i>clear</i> em função do ganho do dia 22 junho.	48
Figura 25 – Gráfico da soma da contagem básica do VIS e NIR em função da contagem básica do <i>clear</i> dos dados do dia 15 de maio. . . . .	48

Figura 26 – (a) Gráficos da contagem de fótons em função do tempo em que ocorreu a medição, referente a medição comparativa do dia 28 de junho, com os parâmetros de ganho e tempo de integração fixos, respectivamente, em 0 e 141 ms e (b) gráfico da resposta normalizada da contagem de fótons dos canais VIS e NIR pelo <i>clear</i> em função do tempo em que ocorreu a medição, referente a medição comparativa do dia 28 de junho, com os parâmetros de ganho e tempo de integração fixos, respectivamente, em 0 e 141 ms. . . . .	50
Figura 27 – Gráfico da contagem de fótons do canal <i>clear</i> do As7341 (com os parâmetros de ganho e tempo de integração fixos em 0 e 141 ms respectivamente) e da irradiância do <i>Survey 200R</i> em função do tempo em que ocorreu a medição, referente a medição comparativa do dia 28 de junho. . . . .	51
Figura 28 – Gráfico dos valores das medições da irradiância do Solarímetro <i>Survey 200R</i> do dia 28 de junho em função de dois eixos x distintos: o superior referente aos valores estimados pelo modelo de regressão linear múltipla $\hat{Y}_{bandas}$ e o inferior referente aos valores das medições do dia 28 de junho do canal <i>clear</i> da Estação de coleta de dados. . . . .	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela da coleta de dados do teste 1 de avaliação do sensor As7341, com medições sem difusor, com <i>ASTEP</i> e <i>ATIME</i> fixos em 600 e 30 respectivamente, <i>g</i> variando de 1 a 8 para cada um dos <i>D<sub>fonte</sub></i> que assumiu os seguintes valores em metros: 0,03, 0,05, 0,10, 0,20, 0,50, 1,00, 1,50, 2,00, 2,50 e 3,00 . . . . .	34
Tabela 2 – Tabela da coleta de dados do teste 2 de avaliação do sensor As7341 com $\theta_i$ variando de 70° a -70° de 10° em 10°, feixe colimado, difusor com lado liso voltado para o lado externo da estação de coleta de dados e fonte de luz incidente a 1,15 m. . . . .	36
Tabela 3 – Tabela da coleta de dados do teste 2 de avaliação do sensor As7341 com $\theta_i$ variando de 70° a -70° de 10° em 10°, feixe não colimado, difusor com lado áspero voltado para o lado externo da estação de coleta de dados e fonte de luz incidente a 1,15 m. . . . .	36
Tabela 4 – Tabela da coleta de dados do teste 2 de avaliação do sensor As7341 com $\theta_i$ variando de 70° a 0 de 10° em 10°, feixe não colimado, difusor com lado liso voltado para o lado externo da estação de coleta de dados e fonte de luz incidente a 1,15 m. . . . .	36
Tabela 5 – Tabela da coleta de dados do teste 2 de avaliação do sensor As7341 com $\theta_i$ variando de 70° a 0 de 10° em 10°, feixe não colimado, difusor com lado liso voltado para o lado externo da estação de coleta de dados e fonte de luz incidente a 0,6 m. . . . .	37
Tabela 6 – Tabela da coleta de dados do teste 2 de avaliação do sensor As7341 com $\theta_i$ variando de 70° a 0 de 10° em 10°, feixe colimado, difusor com lado liso voltado para o lado externo da estação de coleta de dados e fonte de luz incidente a 0,6 m. . . . .	37
Tabela 7 – Tabela da coleta de dados do teste 3 de avaliação do sensor As7341 com <i>ASTEP</i> assumindo os valores 200, 400, 600, 800, 1000 e <i>g</i> valores de 1 a 4. . . . .	38
Tabela 8 – Tabela da coleta de dados do teste 3 de avaliação do sensor As7341 com <i>ASTEP</i> assumindo os valores 200, 400, 600, 800, 1000 e <i>g</i> valores de 0 a 2. . . . .	39
Tabela 9 – Tabela da coleta de dados do teste 3 de avaliação do sensor As7341 com <i>ATIME</i> , <i>ASTEP</i> e <i>g</i> assumindo os valores fixos 50, 1000 e 0 respectivamente. . . . .	39
Tabela 10 – Tabela da coleta de dados para a estimativa da irradiância global no plano horizontal. . . . .	40

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Artigos encontrados na revisão literatura . . . . .	16
Quadro 2 – Materiais utilizados para a montagem da estrutura da estação de coleta de dados. . . . .	28
Quadro 3 – Comparação entre os sensores multiespectrais de baixo custo inicialmente considerados para esta trabalho . . . . .	29
Quadro 4 – Recursos disponibilizados pelo Esp32 Node MCU. . . . .	30
Quadro 5 – Materiais utilizados no primeiro teste . . . . .	32
Quadro 6 – Materiais utilizados no segundo teste . . . . .	35
Quadro 7 – Materiais utilizados no terceiro teste . . . . .	37

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGAIN	Parâmetro do sensor As7341 relacionado ao quantidade de fótons máxima contada
ASTEP	Parâmetro do sensor As7341 relacionado ao tempo da janela de leitora de dados
ATIME	Parâmetro do sensor As7341 relacionado ao tempo da janela de leitora de dados
BC	banda de condução
BV	banda de valência
CB	contagem básica
CF	Contagem de fótons
FWHM	Largura a meia altura
I2C	Protocolo de comunicação serial
MDF	Material feito com fibras de madeira, resinas sintéticas e outros aditivos químicos.
NIR	Espectro infravermelho próximo
SQE	Soma de quadrados dos erros
SQReg	Soma de quadrados da regressão
STQ	Soma total de quadrados
TINT	Tempo de integração
TSI	Irradiância Solar Total
UV	Espectro ultravioleta
VIS	Espectro visível

## LISTA DE SÍMBOLOS

$Ar$	Argônio
$CH_4$	Metano
$CO_2$	Dióxido de carbono
$G_0$	Irradiância solar total
$G$	Irradiância solar horizontal
$G_{dir}$	Irradiância solar direta
$G_{dif}$	Irradiância solar difusa
$G_n$	Irradiância solar normal
$H_2$	Hidrogênio
$He$	Hélio
$K$	Kelvin
$km$	Quilômetros
$Kr$	Criptônio
$m$	Metros
$N_2$	Nitrogênio
$O_2$	Oxigênio
$O_3$	Ozônio
$R^2$	Coeficiente de determinação
$Rn$	Radônio
$Xe$	Xenônio
$X$	Matriz das variáveis independentes
$Y$	Matriz da variável dependente
$\hat{Y}$	Matriz dos valores estimatidos
$W$	Watts

$W/m^2$  Watts por metro quadrado

$\hat{\beta}$  Matriz de coeficientes

$\delta$  Ângulo solar

$\omega$  Ângulo horário solar

$\theta_z$  Ângulo azimutal

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS . . . . .</b>	<b>18</b>
2.1	OBJETIVO GERAL . . . . .	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	18
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO . . . . .</b>	<b>19</b>
3.1	RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA . . . . .	19
3.2	ESPECTRO SOLAR . . . . .	19
3.3	PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUENCIAM NA IRRADIAÇÃO SOLAR . . . . .	20
3.3.1	Fatores astronômicos . . . . .	21
3.3.2	Ângulos Solares . . . . .	21
3.3.3	Fatores atmosféricos . . . . .	23
3.4	COMPONENTES DA IRRADIÂNCIA . . . . .	23
3.5	DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO SENSOR . . . . .	24
3.6	CONTAGEM BÁSICA . . . . .	25
3.7	MÉTODO ESTATÍSTICO UTILIZADO NA ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA . . . . .	26
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS . . . . .</b>	<b>28</b>
4.1	MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL . . . . .	28
4.1.1	Aparato experimental . . . . .	30
4.1.2	Testes para a avaliação do sensor As7341 . . . . .	31
4.2	BASE DE DADOS COLETADOS PARA A ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA . . . . .	39
4.3	ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA . . . . .	40
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISE . . . . .</b>	<b>41</b>
5.1	RESULTADOS DO TESTE 1 . . . . .	41
5.2	RESULTADOS DO TESTE 2 . . . . .	43
5.3	RESULTADOS DO TESTE 3 . . . . .	45
5.4	RESULTADOS DA MONTAGEM DA ESTAÇÃO DE COLETA DE DADOS . . . . .	49
5.5	RESULTADOS DA ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA GLOBAL NO PLANO HORIZONTAL . . . . .	49

6	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS . . . . .	54
	REFERÊNCIAS . . . . .	56
	APÊNDICE A – ARQUIVOS AUXILIARES. . . . .	60

## 1 INTRODUÇÃO

A transformação da radiação solar em energia elétrica por meio das células fotovoltaicas tem se tornado uma das melhores opções de geração de energia e desenvolvimento sustentável para o futuro, visto que o recurso solar em si possui uma vasta disponibilidade natural, não contribui para a degradação ambiental e, do ponto de vista econômico, é de fácil aquisição. Neste sentido, a implementação desta matriz energética de forma eficaz envolve estudos sobre o comportamento da radiação solar.

Estes estudos mostram que a vida na Terra está diretamente relacionada à radiação advinda do sol, pois todos os processos sejam químicos, físicos ou biológicos são dependentes do recurso solar e qualquer tipo de variação desse recurso pode provocar mudanças nas temperaturas dos processos e, consequentemente, no clima e também na química da atmosfera (GÓMEZ *et al.*, 2018).

O Sol é caracterizado como uma fonte inesgotável de energia, pois esse é capaz de produzir uma potência da ordem de  $10^{26}$  W (watts) aproximadamente invariável há bilhões de anos. Toda esta energia, relacionada a essa potência, provém da camada solar mais interna, o núcleo solar, local em que ocorrem as reações de fusão nuclear dos isótopos de hidrogênio, as quais são responsáveis pela produção de energia e gás hélio ao final da reação. A energia produzida nas reações transita entre as camadas solares até chegar à fotosfera, camada visível solar, na qual ocorre a emissão dessa energia na forma de radiação eletromagnética (GÓMEZ *et al.*, 2018; HAAG, 2007; MARTINS *et al.*, 2017).

A fotosfera possui temperatura de  $5778\text{ K}$  (kelvin) e espectro de emissão composto por ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultra violeta, raios-x e raios-gama, similar ao de um corpo negro<sup>1</sup> à temperatura de  $6000\text{K}$  (GÓMEZ *et al.*, 2018; TIPLER; LLEWELLYN, 2017). Uma das principais medições relativas à radiação solar é a constante solar ou TSI (Irradiância Solar Total). Trata-se da taxa de energia emitida pelo sol que incide no topo da atmosfera da Terra a 1 UA (unidade astronômica) de distância. A TSI possui uma média de  $1,366\text{ kW/m}^2$  e pode ser obtida em função dos comprimentos de onda do espectro de emissão solar (GÓMEZ *et al.*, 2018; MARTINS *et al.*, 2017).

A TSI sofre interferência de inúmeros fatores até atingir o solo terrestre, dentre os quais podemos citar: fatores astronômicos relativos aos movimentos da Terra em relação ao Sol; atmosféricos ligados à composição da atmosfera, aos processos de espalhamento e absorção da radiação; fatores meteorológicos como as nuvens; e físicos como árvores, montanhas, prédios, entre outros. A TSI, ao atravessar a atmosfera da Terra e sofrer as alterações dos fatores de variação, é decomposta em componentes denominadas Irradiância Direta ( $G_{dir}$ )

---

<sup>1</sup> Segundo Tipler e Llewellyn (2017), corpo negro é um corpo ideal que é capaz de absorver e emitir todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético conhecido.

e Irradiância Difusa ( $G_{dif}$ ). A soma dessas compõem a Irradiância Global ( $G$ ) (GÓMEZ *et al.*, 2018; MARTINS *et al.*, 2017; BOTERO-VALENCIA; MEJIA-HERRERA, 2021; ZHANG *et al.*, 2021), grandeza de interesse deste trabalho.

As medições da irradiância solar exigem instrumentos próprios para este fim, que podem fornecer elementos de referência relevantes para estudos de climatologia da radiação solar, avaliação técnica e econômica de projetos de aproveitamento do recurso energético solar e desenvolvimento e validação de modelos (MARTINS *et al.*, 2017). De forma geral, os instrumentos comerciais destinados à medição da irradiação solar possuem bandas de captação espectral mais ampla proporcionando maior resolução para análise do comportamento da radiação solar. No entanto, equipamentos comerciais de alta performance possuem um custo bastante elevado tornando-os pouco acessíveis, podendo chegar a valores de milhares até dezenas de milhares de reais.

Por outro lado, diversos sensores capazes de fornecer dados a respeito da radiação solar, com custo relativamente baixo, se comparados aos instrumentos comerciais, estão disponíveis no mercado e possuem custo entre centenas e milhar de reais. Esses sensores podem apresentar características distintas entre si, algumas delas são: fazer medições somente regiões espectrais específicas; ter muitas, poucas ou somente uma banda de leitura, isto é, a medição ocorre em algumas ou somente uma região do espectro solar; proporcionar dados em unidades de medição diferentes, como contagem de fótons e lux.

Para obter mais informações a respeito do uso desses sensores de baixo custo, foi feita uma revisão de literatura que buscou por artigos que utilizaram o sensor multiespectral As7341, o qual também foi utilizado neste trabalho e será explorado com mais detalhes no capítulo de materiais e métodos. Para tal, a base de dados utilizada foi o *Google Acadêmico* com a palavra chave As7341.

Após a filtragem dos trabalhos, foram obtidos como resultado da pesquisa dezessete artigos, os quais foram divididos em diferentes categorias de aplicação e podem ser vistos no quadro 1.

Quadro 1 – Artigos encontrados na revisão literatura

Categoría	Tipo de aplicação	Nº de Artigos
1	Caracterização da Radiação	7
2	Detecção de Materiais	4
3	Análise Biológica	3
4	Qualificação de plantas	3

Fonte: produzido pelo autor

A **categoria 1** referente à caracterização da radiação é composta por: Bäumker *et al.*

(2021) e Hegemann *et al.* (2022), cujas aplicações são voltadas para obtenção da radiação fotossinteticamente ativa (PAR); Botero-Valencia e Mejia-Herrera (2021) e Zhang *et al.* (2021) que possuem aplicações voltadas para a reprodução do espectro solar por meio de aprendizagem de máquina; Botero-Valencia, Mejia-Herrera e Pearce (2022) com aplicação voltada para obtenção de albedo<sup>2</sup>; Baird e Sparks (2023) com aplicação voltada para a detecção de cores e; Filhol *et al.* (2023) cuja aplicação é voltada para obtenção de dados meteorológicos.

A **categoria 2** está ligada à detecção de materiais e é composta pelos seguintes trabalhos: Gualdrón, Jiménez *et al.* (2022) e Angarita e Ruiz (2022), com aplicações são voltadas para a detecção de Cádmio (Cd); Niño, Ardila e Barajas (2022), cuja aplicação é voltada para a detecção de metais pesados no solo e; Pasuy, Marín *et al.* (2022) que a aplicação é voltada para a detecção das propriedades do solo por meio de aprendizagem de máquina.

A **categoria 3** tratada análise e quantificação biológica e conta com os seguintes trabalhos: Yu *et al.* (2023), aplicado à análise de fluidos biológicos; Jesuraj e Hassan (2023), com aplicação voltada para o monitoramento de atividades enzimáticas; Kadja, Sun e Chodavarapu (2023) que é relacionado à extração de ácido nucleico;

Por fim, a **categoria 4** aborda a qualificação de plantas e nela estão presentes os seguintes trabalhos: Tran *et al.* (2022) voltado para a avaliação de atributos de plantas; Comella *et al.* (2022) ligado ao monitoramento do desenvolvimento das copas de árvores e plantas em geral e; Kumari *et al.* (2023) voltado para a detecção precoce do vírus da necrose do broto do amendoim em plantação de tomates.

De acordo com a pesquisa nota-se que, apesar das várias áreas das muitas aplicações distintas do sensor, a maior parte concentra-se na caracterização da radiação, contudo não há nenhum trabalho empenhado na estimativa da irradiância global no plano horizontal, com o sensor As7341.

Neste sentido, o presente estudo pode ser importante para fornecer mais informações sobre o sensor As7341 para estudos relacionados ao comportamento da irradiação solar incidente, bem como, outras possíveis aplicações nesta e em diversas outras áreas de estudo.

Assim, este trabalho pretende, primordialmente, fazer estimativas da irradiância global horizontal obtidas a partir das medições realizadas por um sistema composto por um sensor multiespectral de baixo custo utilizando como base de comparação os dados obtidos com um Solarímetro.

---

<sup>2</sup> Conforme Martins *et al.* (2017) albedo é a componente da radiação solar refletida nas diferentes superfícies.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do projeto consiste em estimar a irradiância global no plano horizontal com dados obtidos a partir do sensor multiespectral As7341 utilizando como base de comparação os dados do Solarímetro Seaward Solar Survey 200R.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Montar o aparato experimental da estação de coleta de dados;
- Avaliar o sensor As7341 quanto a sensibilidade, direcionalidade e características do difusor;
- Coletar dados para a estimativa da irradiância solar global no plano horizontal;
- Fazer a estimativa da irradiância global no plano horizontal a partir dos dados mensurados pela estação de coleta e dos dados do solarímetro.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados os conceitos importantes para a compreensão deste trabalho.

#### 3.1 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

De acordo com o princípio da complementariedade de Bohr, a radiação eletromagnética possui natureza dual e complementar, ora marcada por suas características ondulatórias, ora por suas características corpusculares.

A natureza ondulatória tem origem na variação temporal dos campos elétrico ( $\vec{E}$ ) e magnético ( $\vec{B}$ ) provocada por cargas em movimento acelerado, gerando ondas eletromagnéticas que possuem direção de propagação ortogonal à direção de oscilação dos campos e velocidade constante igual a velocidade da luz no vácuo ( $c = 299792458 \text{ m/s}$ ) (GÓMEZ *et al.*, 2018). Além disso, outras propriedades relevantes são a frequência de oscilação dos campos ( $\nu$ ) e o comprimento de onda ( $\lambda$ ) os quais são relacionados a  $c$  da seguinte forma (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016):

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (3.1)$$

Já a natureza corpuscular traz o princípio da quantização da energia ( $E$ ) calculado por Max Planck e trata a luz como uma série de partículas com energias discretas denominadas fótons os quais obedecem a equação:

$$E = nh\nu \quad (3.2)$$

sendo  $E$  a energia associada a  $n$  fótons,  $h = 6,6260693 \times 10^{-34} \text{ Js}$  a constante de Planck e  $n$  um número inteiro positivo (TIPLER; LLEWELLYN, 2017).

Relacionando as duas naturezas da luz, é possível obter a energia do fóton em função do comprimento de onda substituindo a equação 3.1 na 3.2:

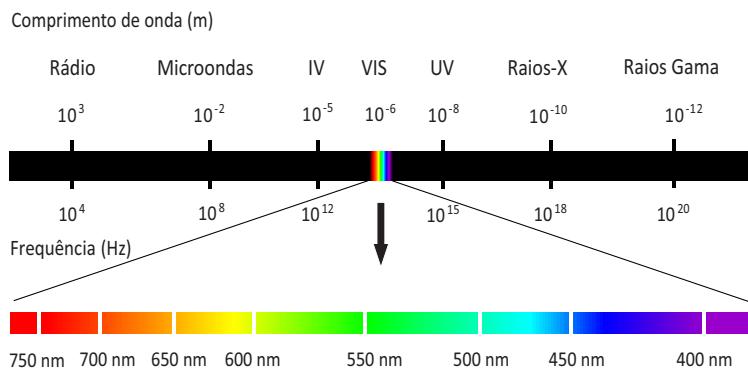
$$E = nh\frac{c}{\lambda} \quad (3.3)$$

#### 3.2 ESPECTRO SOLAR

O espectro eletromagnético é a intensidade de radiação em cada componente espectral, por exemplo em função dos comprimentos de ondas ( $\lambda$ ), usualmente ordenados de forma crescente de energia. Neste sentido, as faixas podem ser agrupadas de acordo quantidade de energia formando as regiões espetrais, como: Ondas de Rádio (baixa energia), Micro-ondas, Infravermelho (IV), Visível (VIS), Raios Ultravioleta (UV), Raios-X, Raios-Gama (alta energia) (GÓMEZ *et al.*, 2018).

O Sol é uma estrela de tamanho médio, cuja radiação provém do seu núcleo e flui pela fotosfera, local onde a estrela apresenta a temperatura mais baixa em relação às outras partes, sendo responsável pelo espectro eletromagnético da Figura 1 (MARTINS *et al.*, 2017).

Figura 1 – Espectro de emissão solar

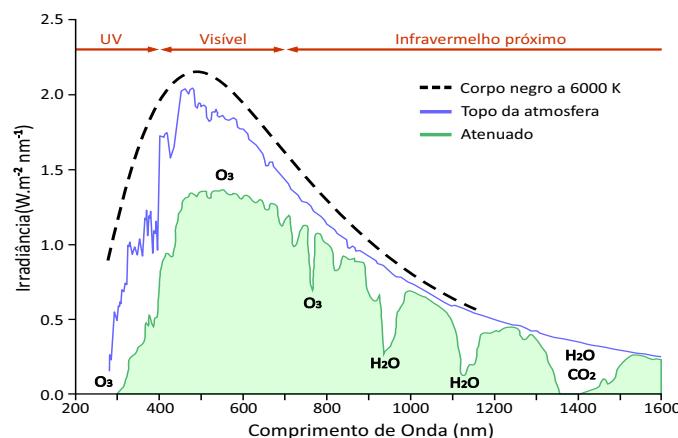


Fonte: produzido pelo autor

### 3.3 PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUENCIAM NA IRRADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar que incide na superfície da Terra apresenta grande discrepância com relação à que é emitida efetivamente pela superfície solar, sendo as regiões de maior relevância VIS e NIR (ROSA; TOLEDO, 2021), como mostra a comparação de Irradiância da Figura 2, isso ocorre devido aos fatores de variação ao longo do trajeto até a superfície terrestre.

Figura 2 – Comparação entre as curvas de Irradiância do corpo negro, no topo da atmosfera e após atravessar a atmosfera (atenuada)



Fonte: Martins *et al.* (2017)

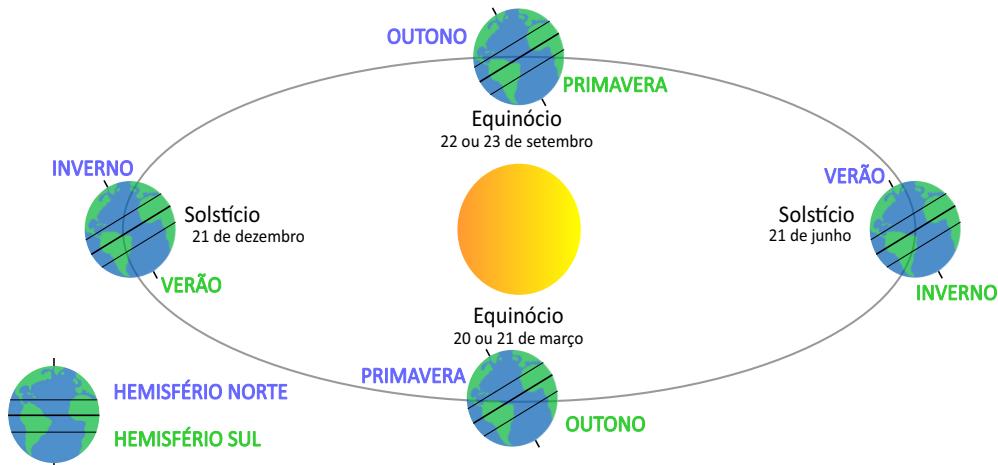
### 3.3.1 Fatores astronômicos

A variação da radiação solar em relação às dimensões de espaço e tempo estão diretamente conectadas a condições astronômicas que influenciam o sistema Terra/Sol.

O movimento de translação da Terra descreve uma órbita elíptica que chega a uma distância máxima de  $1,52 \cdot 10^8 \text{ km}$  e mínima de  $1,47 \cdot 10^8 \text{ km}$ , possuindo uma duração de 365,25 dias terrestres por ciclo. Deste modo, a disponibilidade do recurso solar pode, ao longo da órbita, fazer a irradiância variar de  $1,325 \text{ W/m}^2$  a  $1,412 \text{ W/m}^2$ , atingindo uma média de  $1,366 \text{ W/m}^2$  no topo da atmosfera como dito anteriormente (MARTINS *et al.*, 2017).

A radiação solar que atinge um ponto da superfície da Terra está sujeita alterações temporais no seu módulo, devido ao movimento de rotação, o qual caracteriza o ciclo diário, e a inclinação de  $23,45^\circ$  do eixo axial terrestre em relação ao plano orbital, que caracteriza o ciclo anual. A latitude do Sol se altera em relação ao dia e a duração do dia muda com relação ao ano, o que traz como consequência as estações do ano determinadas pelos solstícios<sup>1</sup> e equinócios<sup>2</sup> ilustrado na Figura 3 (MARTINS *et al.*, 2017).

Figura 3 – Geometria Sol-Terra na determinação das estações do ano



Fonte: Martins *et al.* (2017)

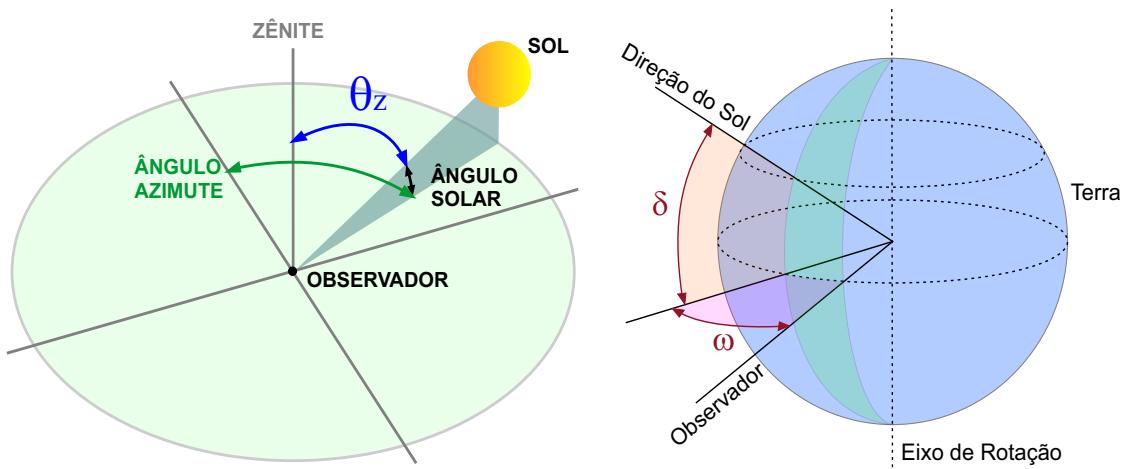
### 3.3.2 Ângulos Solares

Outros conceitos fundamentais relacionados à oscilação da energia solar inseridas no contexto dos dois ciclos, diário e anual, são as determinações geométricas dos Ângulos Solares representados na Figura 4.

<sup>1</sup> Segundo Martins *et al.* (2017), solstícios são momentos de menor latitude do Sol em relação a linha do Equador

<sup>2</sup> Conforme Martins *et al.* (2017), momentos em que a estrela cruza o paralelo central terrestre

Figura 4 – Ângulos notáveis que permitem descrever a posição do Sol em relação à Terra.



Fonte: Martins *et al.* (2017)

O ângulo azimutal varia entre  $\pm 180^\circ$ , é positivo no sentido horário marcando  $0^\circ$  no Norte e é determinado pelo ângulo entre a linha que liga o ponto da posição do observador ao ponto de projeção do Sol na superfície e o meridiano do observador.

O ângulo horário Solar  $\omega$  varia entre  $\pm 180^\circ$  assumindo valores  $\omega > 0^\circ$  durante o período da manhã, valores  $\omega < 0^\circ$  durante o período da tarde e valores  $\omega = 0^\circ$  durante o período da noite.  $\omega$  é determinado pelo movimento do ciclo diário da Terra e o deslocamento relativo do Sol (ZHANG *et al.*, 2021).

O ângulo solar  $\delta$  varia entre  $\pm 23^\circ 27'$  de acordo com o ciclo anual, sendo  $\delta > 0^\circ$  no acima do Equador,  $\delta < 0^\circ$  abaixo do Equador e é determinado pela superfície que corta a Terra na linha do Equador e a reta na direção Terra-Sol.  $\delta$  pode ser calculado por (MARIN; ASSAD; PILAU, 2008):

$$\delta = 23^\circ 27' \operatorname{sen} \left[ \frac{360(D - 80)}{365} \right], \quad (3.4)$$

em que  $D$  corresponde à data Juliana que é o número correspondente ao dia nos 365 dias do ano.

O ângulo zenital ou zênite  $\theta_z$  é determinado entre a reta na direção Terra-Sol e a reta vertical no ponto do observador, quando o Sol se encontra no nascente e no poente  $\theta_z$  assume o valor de  $90^\circ$  (MARTINS *et al.*, 2017). Além disso,  $\theta_z$  pode ser obtido por meio da seguinte equação(MARIN; ASSAD; PILAU, 2008):

$$\theta_z = \arccos [\operatorname{sen}(\text{latitude local})\operatorname{sen}(\delta) + \operatorname{cos}(\text{latitude local})\operatorname{cos}(\delta)\operatorname{cos}(h)], \quad (3.5)$$

e  $h$  é dado por(MARIN; ASSAD; PILAU, 2008):

$$h = (\text{hora local} - 12)15^\circ, \quad (3.6)$$

sendo *hora local* definida entre 0 e 23 horas da localidade que se deseja calcular  $\theta_z$ . A equação 3.6 é uma aproximação para a estimativa de  $\theta_z$ , contudo para resultados mais precisos de  $\theta_z$  é necessário utilizar a hora solar verdadeira que pode ser vista em Haag (2007).

### 3.3.3 Fatores atmosféricos

Os comprimentos de ondas associados a radiação emitida pelo Sol incidentes na atmosfera interagem com esta devido aos gases que a compõem. Sendo parte dos gases responsáveis por processos de absorção da radiação e outra parte responsável pelos processos de espalhamento da radiação solar (ZHANG *et al.*, 2021).

Os gases presentes na composição da atmosfera são: nitrogênio ( $N_2$ ), oxigênio ( $O_2$ ), argônio( $Ar$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), hélio( $He$ ), ozônio( $O_3$ ), hidrogênio( $H_2$ ), criptônio( $Kr$ ), metano ( $CH_4$ ), xenônio ( $Xe$ ) e radônio ( $Rn$ ). Além disso, há presença de água nos três estados físicos (HAAG, 2007).

Neste sentido, os processos físicos de espalhamento são causados pelos gases constituintes e partículas em suspensão. Já os processos físicos de absorção são causados principalmente por  $CO_2$ ,  $O_3$ ,  $O_2$  e vapor de água. A atenuação provocada por estes processos gera uma diminuição considerável na parcela da irradiação que atinge o topo da atmosfera atingindo um limite próximo de  $1000\text{ W/m}^2$  na superfície da Terra em condições ideais para o Sol (MARTINS *et al.*, 2017).

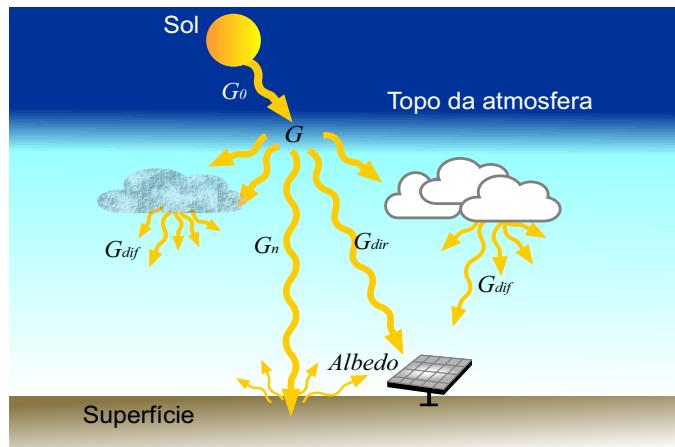
Relacionado às condições meteorológicas , as nuvens constituem como um dos principais fator de espalhamento devido a sua composição, opacidade e densidade.

## 3.4 COMPONENTES DA IRRADIÂNCIA

A irradiação solar Total, a qual atinge o topo da atmosfera, é representada por  $G_0$ . Após  $G_0$  cruzar a atmosfera tem-se a componente global que incide em uma superfície horizontal representada por  $G$ . A componente  $G$ , por sua vez, é determinada pela soma de duas outras componentes,  $G_{dir}$  e  $G_{dif}$ , as quais representam respectivamente a parcela que não sofrem influência dos fatores de variação meteorológicos e a parcela que sofre tais influências. Outra componente relevante é a parcela da  $G_{dir}$  que incide uma superfície de forma ortogonal, denominada irradiação direta normal  $G_n$ . Por fim, o albedo é determinado pela reflexão das componentes em alguma superfície(MARTINS *et al.*, 2017).

As componentes da irradiação solar são ilustradas de acordo com a Figura 5.

Figura 5 – Componentes da irradiação Solar

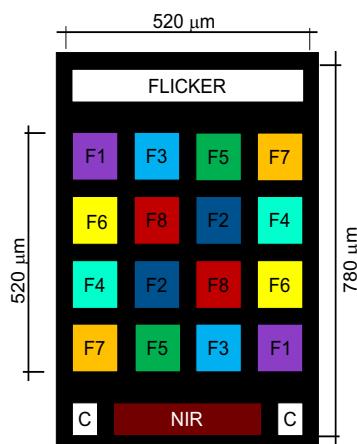


Fonte: Martins *et al.* (2017)

### 3.5 DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO SENSOR

O sensor de baixo custo adotado é formado por: uma matriz quadrada 4 por 4 de fotodiodos com filtros<sup>3</sup>, sendo 2 fotodiodos para cada um dos canais responsáveis pelas bandas do espectro visível, que estão representados na Figura 6 numerados de F1 a F8; um fotodiode para detecção da frequência de mudança de cor, que é representado por *Flicker* na Figura 6; um fotodiode para captação do NIR, representado por *NIR* na Figura 6; e dois fotodiodos para o clear que corresponde ao canal sem filtro, representado por c na Figura 6 (AMS, 2020; AMS, 2021).

Figura 6 – Diagrama de fotodiodos do sensor As7341.



Fonte: AMS (2020)

<sup>3</sup> São filtros de interferência nano-ópticos depositados diretamente na matriz de fotodiodos que proporcionam características precisas, reprodutíveis e estáveis a relação ao tempo e à temperatura (AMS, 2020).

Os fotodiodos são componentes eletrônicos formados por materiais semicondutores cuja energia possui bandas proibidas (*gaps*) que podem ser explicadas pelo princípio de exclusão de Pauli. De acordo com o princípio, há uma quantidade máxima de elétrons que uma banda de energia comporta, bem como não há níveis de energia entre as bandas os quais os elétrons possam contemplar, tem-se então uma banda proibida (ALVES, 2007).

O *gap* pode ser definido como a quantidade de energia, da ordem de elétrons-volts (eV), necessária para acontecer uma mudança eletrônica entre o topo da banda de valência (última banda completamente vazia) e o fundo da banda de condução (primeira banda completamente vazia), BV e BC respectivamente (ALVES, 2007).

Os fotodiodos podem intensificar a própria condutividade com colisões de fótons na própria superfície, desde que a energia dos fótons seja de maior que a requerida pelo *gap*, provocando a intensificação da condutividade em conformidade com a energia do fóton incidente, resultando na transferência de elétrons da BV para a BC, que gera corrente para o funcionamento do sensor (BRITO, 2016; ALVES, 2007). Deste modo, para o As7341, essa corrente gerada proporciona a contagem de fótons por meio do circuito do sensor, isto é, os dados brutos do sensor, de acordo com a respectiva banda espectral do sensor (AMS, 2020).

### 3.6 CONTAGEM BÁSICA

A Contagem Básica (*CB* dado em  $n\_{fótons}/ms$ ) é um método proposto pela própria fabricante do As7341 para fins de verificação das medições, isto é, se as medições estão corretas ou não. De acordo com AMS (2021) a contagem de fótons do sensor (*CF*) depende das configurações dos parâmetros ganho (*AGAIN*) e tempo de integração (*TINT*), porém a modificação desses não muda o valor da contagem real em condições constantes.

O parâmetro ganho está ligado aos atributos físicos do sensor e depende de  $g$  um número inteiro (entre 0 e 10) atribuído ao ganho durante a configuração de parâmetros do sensor. O ganho é dado por (AMS, 2020):

$$AGAIN = 2^{g-1} \quad (3.7)$$

Já o tempo de integração está ligado ao tempo que a janela de leitura fica aberta. Além disso, o *TINT* é composto por outros dois parâmetros, o passo (*ASTEP*) e o tempo (*ATIME*) e é dado pela seguinte equação (AMS, 2020):

$$TINT = (ASTEP + 1) \cdot (ATIME + 1) \cdot 0,00278 \text{ ms.} \quad (3.8)$$

A *CB* é dada pela equação a seguir(AMS, 2021):

$$CB = \frac{CF}{AGAIN \cdot TINT} \text{ } n\_{fótons}/ms$$

$$CB = \frac{CF}{2^{g-1} \cdot [(ASTEP + 1) \cdot (ATIME + 1) \cdot 0,00278]} \text{ } n\text{ó fótons/ms} \quad (3.9)$$

### 3.7 MÉTODO ESTATÍSTICO UTILIZADO NA ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA

A regressão linear múltipla é um método que objetiva encontrar uma função matemática linear, por meio dos mínimos quadrados, que descreva uma variável dependente ( $y$ ) em função das demais variáveis independentes observadas ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) de uma sistema ou base de dados em estudo. Esse método pode ser empregado quando um ajuste de reta simples não correlaciona de forma satisfatória o conjunto de informações em estudo, permitindo que se incluam outras variáveis independentes para aumentar a correlação entre a variável dependente e as independentes (MAIA, 2017).

A equação que descreve o método está representada abaixo:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_j x_{ji} + \epsilon_i \quad (3.10)$$

, sendo  $\epsilon_i = y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_j x_{ji})$  o erro associado (isto é, o valor vertical entre o valor real e o valor estimado da reta obtida) e  $\beta_j$  o coeficiente associado a  $n$ -ésima variável (MAIA, 2017).

De acordo com Maia (2017), os coeficientes podem ser calculados minimizando a soma de quadrados dos erros ( $SQE$ ) por meio da seguinte forma:

$$SQE = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_j x_{ji})]^2 \quad (3.11)$$

Em seguida calcula-se as derivadas parciais com relação a cada um dos coeficientes igualando cada uma das equações obtidas a zero como se segue:

$$\frac{\partial SQE}{\partial \beta_0} = -2 \sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^q \beta_j x_{ji} \right) = 0; \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial SQE}{\partial \beta_j} = -2 \sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^q \beta_j x_{ji} \right) x_{ji} = 0, \quad (3.13)$$

sendo a equação 3.12 é referente ao termo  $\beta_0$  e a 3.13 ao termo geral  $\beta_j$  que corresponde ao restante dos termos. E como resultado tem-se um sistema com  $q + 1$  equações chamadas de equações normais de regressão. Resolvendo o sistema de equações é possível obter os valores de beta (MAIA, 2017).

Contudo, quanto maior é o valor de  $q$  maior é a complexidade do sistema de equações normais de regressão, implicando na necessidade da utilização de *softwares* para encontrar uma solução para o sistema. Esses *softwares* costumam utilizar notação matricial para resolver este tipo de problema, utilizando a notação matricial:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_j x_{ji} + \epsilon_i \Rightarrow Y = X\hat{\beta} + \varepsilon, \quad (3.14)$$

sendo  $Y$  a matriz correspondente às variáveis dependentes,  $X$  às variáveis independentes,  $\hat{\beta}$  aos coeficientes lineares e angulares e  $\varepsilon$  aos erros, como se segue:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_i \end{bmatrix}; \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1i} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{j1} & x_{j2} & \dots & x_{ji} \end{bmatrix}; \quad \hat{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_i \end{bmatrix}; \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Analogamente:

$$SQE = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \varepsilon^t \varepsilon = (Y - X\hat{\beta})^t \cdot (Y - X\hat{\beta}) \quad (3.16)$$

Fazendo  $\frac{\partial SQE}{\partial \hat{\beta}} = 0$ :

$$X^t X \hat{\beta} = X^t Y \Rightarrow \hat{\beta} = (X^t X)^{-1} X^t Y \quad (3.17)$$

é possível obter a matriz  $\hat{\beta}$  (MAIA, 2017).

Somado a isso, substituindo 3.17 em 3.14 obtém-se o modelo produzido:

$$\hat{Y} = X\hat{\beta} = X \cdot (X^t X)^{-1} X^t Y, \quad (3.18)$$

sendo  $\hat{Y}$  o modelo estimado.

Fazendo  $Y - \hat{Y}$  obtém-se a matriz resíduo  $e$  a qual corresponde à diferença entre os valores reais e os valores estimados do modelo calculado.

Segundo Maia (2017), o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é responsável por indicar o quanto forte ou fraca é a correlação entre as variáveis dependentes e independentes,  $R^2$  assume valores entre 0 e 1, quanto mais próximo  $R^2$  é de 1 mais forte se torna a correlação.  $R^2$  é dado por:

$$R^2 = \frac{SQReg}{STQ}, \quad (3.19)$$

em que  $SQReg$  é a soma de quadrados da regressão e dado por:

$$SQReg = \hat{\beta}^t X^t Y - n\bar{Y}^2, \quad (3.20)$$

(sendo  $n$  igual a quantidade de medições) e  $STQ$  é a soma total de quadrados dada por:

$$STQ = Y^t Y - n\bar{Y}^2. \quad (3.21)$$

Substituindo 3.20 e 3.21 em 3.19 temos:

$$R^2 = \frac{\hat{\beta}^t X^t Y - n\bar{Y}^2}{Y^t Y - n\bar{Y}^2}. \quad (3.22)$$

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho foram executadas as etapas que se seguem.

### 4.1 MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL

Esta seção contempla: os materiais utilizados na montagem da estação de coleta de dados, o sistema de aquisição de dados fundamentado no microcontrolador, a base para fixação dos sensores, a proteção ambiental, os elementos de correção relacionados ao ângulo de incidência e os materiais e métodos empregados nos testes de domínio do sensor e do difusor.

Os materiais utilizados para a montagem da estação de coleta de dados podem ser vistos no Quadro 2, com destaque para dois deles, o sensor e o microcontrolador adotados.

Quadro 2 – Materiais utilizados para a montagem da estrutura da estação de coleta de dados.

Materiais	Função
Sensor multiespectral As7341	Fazer a contagem de fótons
Microcontrolador Esp32 NodeMCU	Controlar sensor e servidor de dados
Protoboard 8x6	Interligar sensor e microcontrolador
Jumpers	Interligar sensor e microcontrolador
Placa difusora de plástico de 1 mm de espessura	Difundir a luz incidente na janela de leitura
Cartolina	Limitar a entrada de luz
Parafusos	Fixar componentes
Porcas	Fixar componentes
Abraçadeiras	Fixar componentes
Caixa de MDF	Proteger o sensor
Tinta na cor preto	Minimizar a reflexão interna da estrutura

Fonte: produzido pelo autor

O sensor As7341 é um sensor multiespectral que faz a contagem dos fótons incidentes na janela de coleta, possui onze canais que já foram mencionados na seção 3.5 e possui os seguintes centro das bandas<sup>1</sup> dos canais 415, 445, 480, 515, 555, 590, 630 e 680 nm no VIS, com uma margem de erro FWHM<sup>2</sup> de 26, 30, 36, 39, 39, 40, 50, 52 nm respectivamente em cada centro, e 910 nm no NIR como mostra a Figura 7. Comparando o As7341 com outras opções sensores considerados<sup>3</sup> no início do trabalho, Quadro 3, Logo, é possível notar que, apesar do As7341 não possuir o maior número de canais, ele apresenta bandas

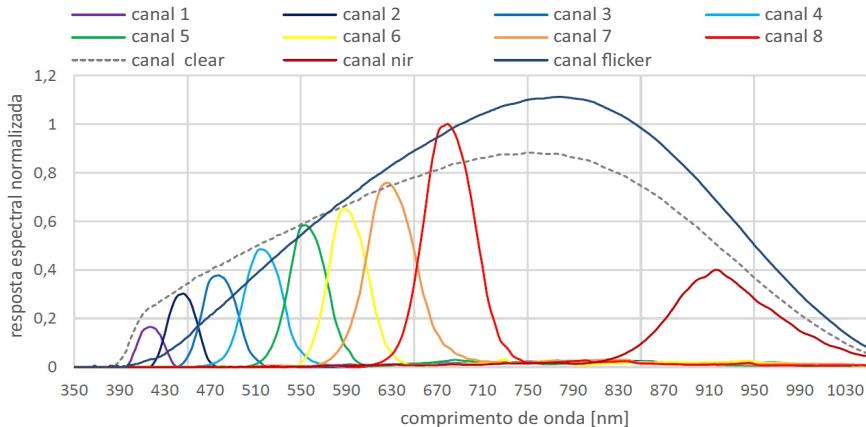
<sup>1</sup> Os centro de bandas relacionados aos canais *Clear* e *Flicker* não foram definidas pela AMS (2020) por não se tratarem de respostas filtradas.

<sup>2</sup> As margens de erro da largura a meia altura (FWHM) não foram definidas pela AMS (2020) para os canais NIR, *Clear* e *Flicker*.

<sup>3</sup> Os sensores considerados além do As7341 são As7262, As7263 e As7265x cujas informações podem ser encontradas em AMS(2016, 2017, 2018).

compreendidas dentro da região de maior relevância do espectro solar em termos de geração de energia elétrica com células fotovoltaicas de silício e com um custo próximo da metade do custo do As7265x.

Figura 7 – Gráfico referente à resposta normalizada pelo canal 8 dos centros das bandas espectrais do sensor As7341 em comprimentos de onda.



Fonte: AMS (2020)

Quadro 3 – Comparaçāo entre os sensores multiespectrais de baixo custo inicialmente considerados para esta trabalho

Sensores	Centros de banda espectral [nm]	Custo médio [R\$]
As7262	VIS: 450; 500; 550; 570; 600; 650	100
As7263	VIS: 610; 680 NIR: 730; 760; 810; 860	100
As7265x	VIS: 410; 435; 460; 485; 510; 535; 560; 585; 610; 645; 680; 705 NIR: 730; 760; 810; 860; 900; 940	350
As7341	VIS: 415; 445; 480; 515; 555; 590; 630; 680 NIR: 910	150

Fonte: produzido pelo autor

Neste sentido, a escolha do As7341 para este trabalho deveu-se a alguns fatores: a convergência entre as bandas espectrais do sensor e a região de interesse, o custo do sensor e a disponibilidade do *driver* público para o As7341 em que pode ser visualizado em Hamerling (c2022).

De acordo com EXPRESSIF (2017), o Esp32 Node MCU é um microcontrolador, isto é, um dispositivo eletrônico que pode ser programado para promover ações condicionadas ou não, efetuar cálculos, promover interação com o meio externo e muitas outras possibilidades relacionadas à internet das coisas. A função do Esp32 neste trabalho é exercer todo o gerenciamento da coleta de dados e também a disponibilização destes por meio dos muitos recursos que o microcontrolador oferece e podem ser vistos no Quadro 4.

Quadro 4 – Recursos disponibilizados pelo Esp32 Node MCU.

Esp32 Node MCU - Recursos
Microprocessador dual core de baixa potência
Arquitetura 32 bits
<i>Clock</i> 160 MHz
<i>WIFI</i>
<i>Bluetooth</i>
512 KB de memória RAM
16 Mb de memória <i>flash</i>
36 GPIO (portas programáveis de entrada e saída de dados)
Interfaces de comunicação: SPI, I2C, UART, I2S e CAN
18 ADC (conversores de sinal analógico para digital)
2 DAC (conversores de sinal digital para analógico)

Fonte: produzido pelo autor

Deste modo, a escolha do Esp32 deu-se em função: da disponibilidade; da familiaridade com uma das linguagens de programação que podem ser utilizadas pelo Esp32, a MicroPython<sup>4</sup>, e; do *driver* citado anteriormente que também se encontra em linguagem MicroPython.

#### 4.1.1 Aparato experimental

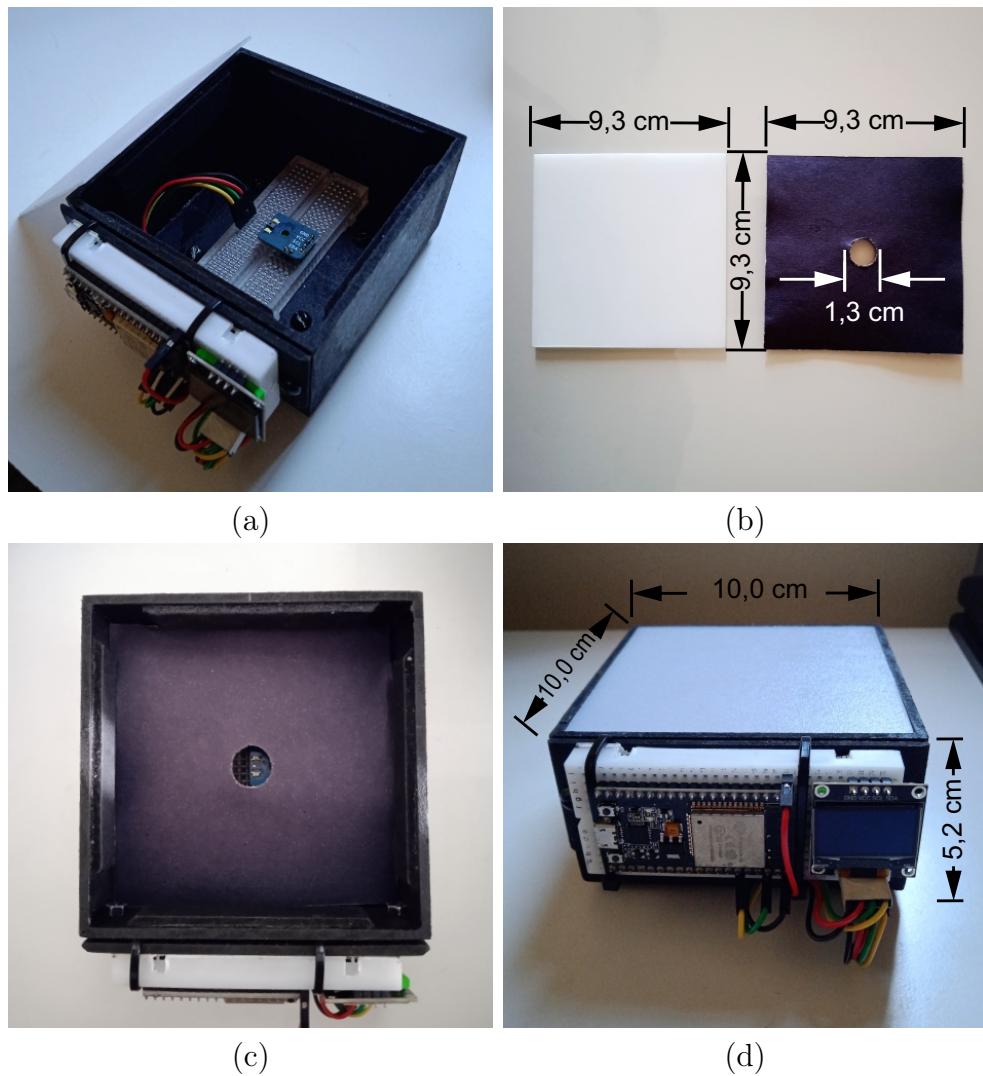
O sistema de aquisição de dados é o programa escrito na linguagem micropython e tem a função de promover a comunicação, por meio do protocolo I2C, entre Esp32 e As7341 priorizando a aquisição e o armazenamento de dados espectrais, como também a interação entre Esp32 e usuário favorecendo exibição de status relacionados à medição e disponibilização dos dados armazenados.

A base de fixação e a proteção ambiental seguem conforme a Figura 8. De modo que, o sensor, o microcontrolador e o *display* foram fixados em duas *protoboards* as quais estabelecem comunicação comunição por intermédio dos *Jumpers*, bem com as *protoboards* foram fixadas com abraçadeiras, parafusos e porcas na caixa de MDF<sup>5</sup> que foi pintada de preto a fim de evitar reflexões internas e provocar ruídos na medição e tem a função de proteger ambientalmente o sensor.

<sup>4</sup> Trata-se de uma versão otimizada da linguagem Python 3 voltada para a programação de microcontroladores. Mais informações a respeito desta linguagem pedem ser vistas na documentação no link: <https://docs.micropython.org/en/latest/>.

<sup>5</sup> MDF, fibras de média densidade, é o produto gerado da mistura entre fibras de madeira e resina sintética.

Figura 8 – (a) Foto da estação de coleta de dados aberta sem o limitador de cartolina, (b) foto da placa difusora de plástico com espessura de 0,01 m e do limitador de cartolina, (c) foto da estação de coleta de dados aberta com o limitador de cartolina e (d) foto da estação de coleta de dados.



Fonte: produzido pelo autor

Além disso, dentro da caixa se encontra a cartolina (cortada com o tamanho das dimensões internas da base da caixa e uma abertura circular no centro com o diâmetro de 1,3 cm) que possui a função de limitar a quantidade de luz que chega na janela de leitura do sensor. E no topo da caixa se encontra a placa difusora, o elemento de correção relacionado ao ângulo de incidência, cuja função é dispersar a luz incidente que chega ao ângulo sólido de captação do sensor.

#### 4.1.2 Testes para a avaliação do sensor As7341

Três testes foram realizados com a finalidade de compreender o funcionamento do sensor, os impactos do difusor nos dados e a configuração adequada para ambiente externo.

O primeiro teste foi executado no Laboratório de Física Experimental II da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) no Campus da cidade de Alegre, no período da noite com luzes ambientes apagadas para evitar ruídos. O teste buscou encontrar pontos de saturação relacionados ao parâmetro *AGAIN* do As7341 quando  $g$  é alterado e entender o comportamento do difusor com fonte de luz em ângulo zero de incidência. Os materiais utilizados neste primeiro teste estão dispostos no Quadro 5 e montados como mostram as Figuras 9 e 10.

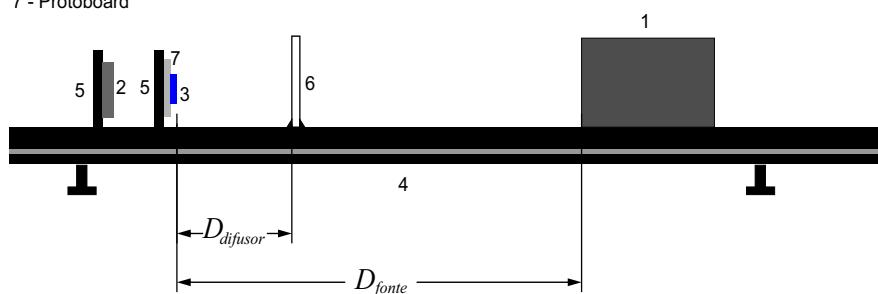
Quadro 5 – Materiais utilizados no primeiro teste

Materiais	Função
Sensor multiespectral As7341	Fazer a contagem de fôtons
Microcontrolador Esp32 NodeMCU	Controlar o sensor e o servidor de dados
Protoboard 8x6	Interligar sensor e microcontrolador
Jumpers	Interligar sensor e microcontrolador
Placa difusora de plástico de 1 mm de espessura	Difundir a luz incidente no sensor
Cabo usb	Conectar microcontrolador e notebook
Notebook	Ajustar parâmetros do sensor
Fonte incandescente de 12V e 21W	Emitir fôtons para a captação do sensor
Fonte DC 12V/2A	Alimentar a fonte luminosa
Trilhos magnéticos	Fixar os cavaleiros metálicos
Cavaleiros metálicos	Fixar sensor e microcontrolador
Abraçadeiras ou fita adesiva	Fixar sensor e microcontrolador ao cavaleiro
Cartolina na cor preta	Minimizar reflexão da fonte luminosa nos trilhos
Trena maior ou igual a 3m	Indicar a distância entre a fonte e o sensor

Fonte: produzido pelo autor

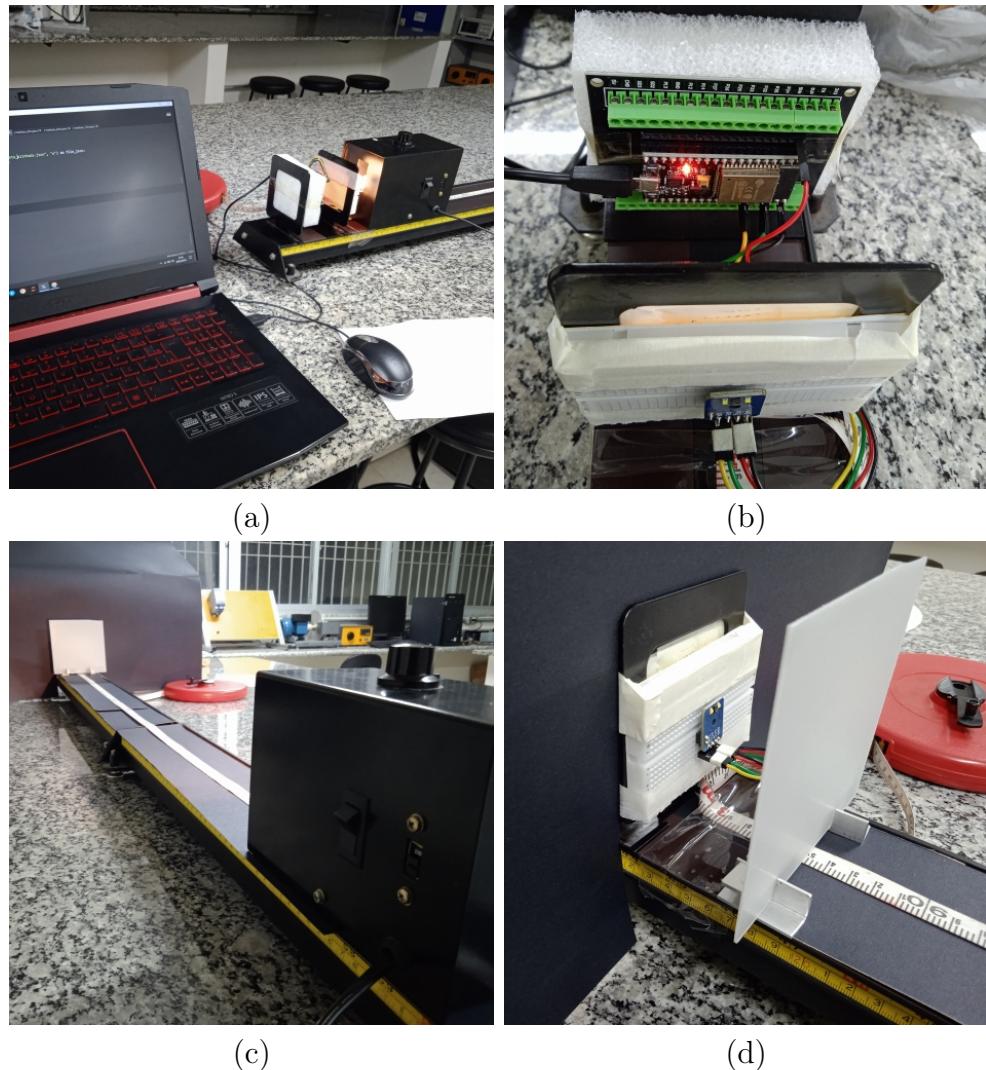
Figura 9 – Diagrama da montagem do teste 1 de avaliação do sensor.

- 1 - Fonte de incandescente de 21W.
- 2 - Microcontrolador Esp32.
- 3 - Sensor As7341.
- 4 - Trilho magnético.
- 5 - Cavaleiro metálico.
- 6 - Placa difusora de plástico com espessura de 1mm.
- 7 - Protoboard



Fonte: produzido pelo autor.

Figura 10 – (a) Foto do aparato experimental do teste montando com a fonte luminosa a 0,03 m do sensor, (b) foto do sensor As7341 e do Esp32 fixados nos cavaleiros posicionados no primeiro trilho magnético, (c) foto do aparato experimental do teste montando com difusor a 0,03m e fonte luminosa a 1,50 m do sensor e (d) foto do sensor As7341 fixado no cavaleiro e da placa difusora a 0,05m posicionados no primeiro trilho magnético



Fonte: produzido pelo autor

Neste sentido, os dados do primeiro teste foram coletados de acordo com a Tabela 1, que pode ser vista no apêndice A no arquivo denominado tabelas.html, com *ASTEP* e *ATIME* fixos em 600 e 30 respectivamente. O processo de medição da Tabela 1 foi repetido para  $D_{difusor} = 0,03\text{ m}$  e  $D_{difusor} = 0,05\text{ m}$  gerando um total de 216 leituras do sensor para cada um dos nove canais do espectro de interesse.

Tabela 1 – Tabela da coleta de dados do teste 1 de avaliação do sensor As7341, com medições sem difusor, com  $ASTEP$  e  $ATIME$  fixos em 600 e 30 respectivamente,  $g$  variando de 1 a 8 para cada um dos  $D_{fonte}$  que assumiu os seguintes valores em metros: 0,03, 0,05, 0,10, 0,20, 0,50, 1,00, 1,50, 2,00, 2,50 e 3,00 .

$D_{difusor}[m]$	$D_{fonte}[m]$	$g$	Canais									
			F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
s/ dif.	0,03	1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
s/ dif.	0,03	2	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
s/ dif.	0,03	8	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
s/ dif.	0,05	1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
s/ dif.	0,10	1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
s/ dif.	0,20	1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
s/ dif.	0,50	1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
s/ dif.	1,00	1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
s/ dif.	1,50	1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
s/ dif.	2,00	1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
s/ dif.	2,50	1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
s/ dif.	3,00	1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
s/ dif.	3,00	8	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear

O segundo teste também foi executado no Laboratório de Física Experimental II da UFES Campus Alegre, no período da noite com luzes ambientes apagadas para evitar ruídos, e teve como objetivo compreender os impactos do difusor para os diferentes ângulos de incidência ( $\theta_i$ ) nos dados mensurados fazendo uma comparação dos dados obtidos com a função cosseno ( $\cos_{ref}$ )<sup>6</sup> e verificar se há diferença nas medições entre os lados liso e áspido do difusor. Os materiais utilizados e a montagem deste segundo teste podem ser vistos no Quadro 6 e a montagem seguiram de acordo com as Figuras 11 e 12.

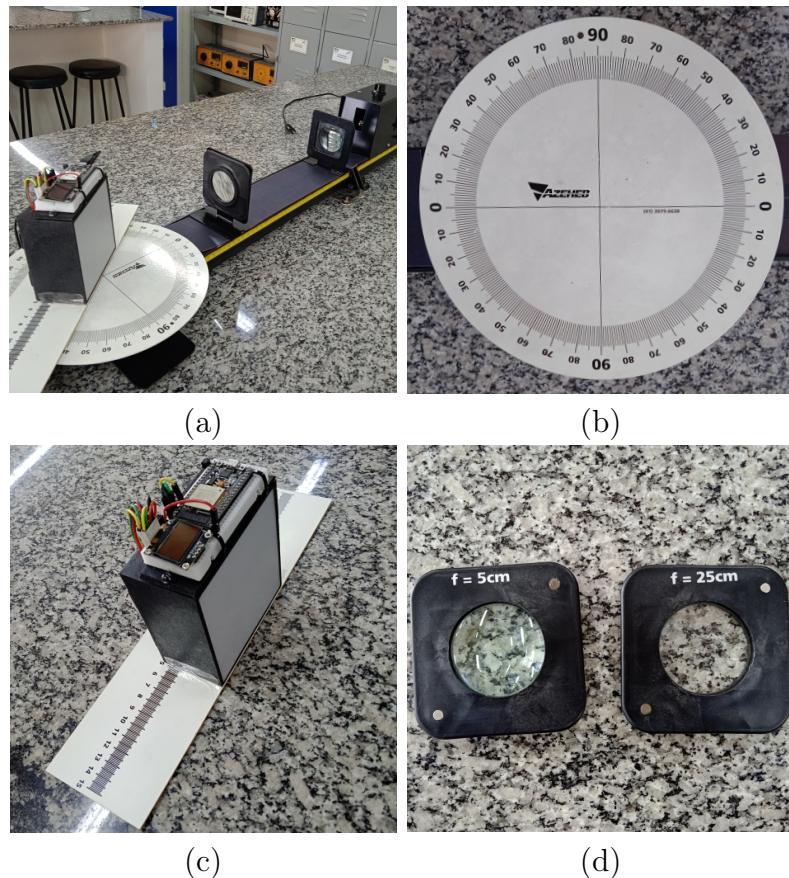
<sup>6</sup> A comparação com a função cosseno está relacionada à lei do cosseno de Lambert, a qual diz que a intensidade da radiação incidente, em uma superfície ideal difusa ou radiadora difusa ideal, tem relação de proporção direta com o cosseno do ângulo entre a reta perpendicular à superfície e a linha de incidência da radiação (PEDROTTI; PEDROTTI; PEDROTTI, 2017).

Quadro 6 – Materiais utilizados no segundo teste

Materiais	Função
Estação de Coleta de dados	Mensurar e armazenar dados
Notebook	Ajustar parâmetros da Estação
Fonte de luz incandescente 12V e 21W	Emitir fôtons para a captação da Estação
Fonte DC 12V/2A	Alimentar a fonte luminosa
Trilhos magnéticos	Fixar cavaleiros metálicos
Cavaleiros metálicos	Fixar as lentes focais
Lentes focais de 5 e 25 cm	Colimar o feixe de luz da fonte
Base transferidora	Auxiliar no reposicionamento da Estação
Régua graduada	Auxiliar no reposicionamento da Estação

Fonte: produzido pelo autor

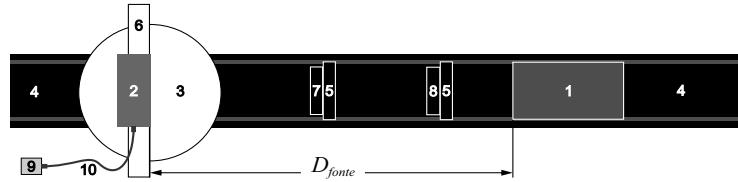
Figura 11 – (a) Foto do aparato experimental do segundo teste montando, (b) foto da base transferidora utilizada no teste, (c) foto da régua utilizada no ajuste de posição da estação e (d) foto das lentes colimadoras com distâncias focais de 5 e 25 cm utilizadas no teste.



Fonte: produzido pelo autor

Figura 12 – Diagrama da montagem do teste 2 de avaliação do sensor.

- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| 1 - Fonte de incandescente de 21W. | 6 - Réguas graduadas..                  |
| 2 - Estação de coleta de dados.    | 7 - Lente com distância focal de 5 cm.  |
| 3 - Base transferidora.            | 8 - Lente com distância focal de 25 cm. |
| 4 - Trilho magnético.              | 9 - Fonte de alimentação.               |
| 5 - Cavaleiro metálico.            | 10 - Cabo usb.                          |



Fonte: produzido pelo autor.

As medições do teste 2 foram executadas conforme as Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6 a seguir e podem ser vistas no apêndice A no arquivo denominado tabelas.html.

Tabela 2 – Tabela da coleta de dados do teste 2 de avaliação do sensor As7341 com  $\theta_i$  variando de  $70^\circ$  a  $-70^\circ$  de  $10^\circ$  em  $10^\circ$ , feixe colimado, difusor com lado liso voltado para o lado externo da estação de coleta de dados e fonte de luz incidente a 1,15 m.

$\theta_i$	Feixe	LD	$D_{fonte}[m]$	Canais									
				F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
70	colimado	liso	1,15										
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
-70	colimado	liso	1,15	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear

Tabela 3 – Tabela da coleta de dados do teste 2 de avaliação do sensor As7341 com  $\theta_i$  variando de  $70^\circ$  a  $-70^\circ$  de  $10^\circ$  em  $10^\circ$ , feixe não colimado, difusor com lado áspero voltado para o lado externo da estação de coleta de dados e fonte de luz incidente a 1,15 m.

$\theta_i$	Feixe	LD	$D_{fonte}[m]$	Canais									
				F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
70	n/ colimado	áspero	1,15										
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
-70	n/ colimado	áspero	1,15	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear

Tabela 4 – Tabela da coleta de dados do teste 2 de avaliação do sensor As7341 com  $\theta_i$  variando de  $70^\circ$  a 0 de  $10^\circ$  em  $10^\circ$ , feixe não colimado, difusor com lado liso voltado para o lado externo da estação de coleta de dados e fonte de luz incidente a 1,15 m.

$\theta_i$	Feixe	LD	$D_{fonte}[m]$	Canais									
				F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
70	n/ colimado	liso	1,15										
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
0	n/ colimado	liso	1,15	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear

Tabela 5 – Tabela da coleta de dados do teste 2 de avaliação do sensor As7341 com  $\theta_i$  variando de  $70^\circ$  a 0 de  $10^\circ$  em  $10^\circ$ , feixe não colimado, difusor com lado liso voltado para o lado externo da estação de coleta de dados e fonte de luz incidente a 0,6 m.

$\theta_i$	Feixe	LD	$D_{fonte}[m]$	Canais									
				F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
70	n/ colimado	liso	0,6										
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
0	n/ colimado	liso	0,6	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear

Tabela 6 – Tabela da coleta de dados do teste 2 de avaliação do sensor As7341 com  $\theta_i$  variando de  $70^\circ$  a 0 de  $10^\circ$  em  $10^\circ$ , feixe colimado, difusor com lado liso voltado para o lado externo da estação de coleta de dados e fonte de luz incidente a 0,6 m.

$\theta_i$	Feixe	LD	$D_{fonte}[m]$	Canais									
				F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
70	colimado	liso	0,6										
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
0	colimado	liso	0,6	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear

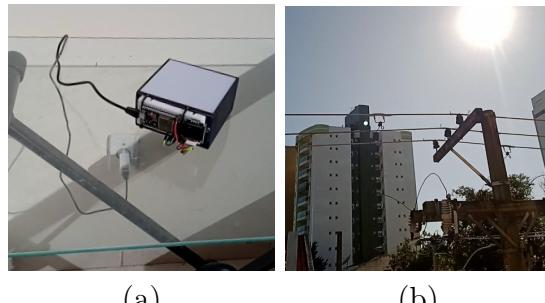
O terceiro teste foi realizado em três dias em Campos dos Goytacazes e teve como foco verificar o comportamento do sensor em ambiente externo em função dos parâmetros  $g$ ,  $ASTEP$  e  $ATIME$ . Os materiais utilizados e a montagem do terceiro teste podem ser vistos no Quadro 7 e na Figura 13 e 14, respectivamente.

Quadro 7 – Materiais utilizados no terceiro teste

Materiais	Função
Estação de Coleta de dados	Mensurar e armazena os dados
Fonte DC 12V/2A	Alimentar a Estação
Cabo usb	Conectar a fonte à Estação
Mesa	Servir de apoio para a Estação

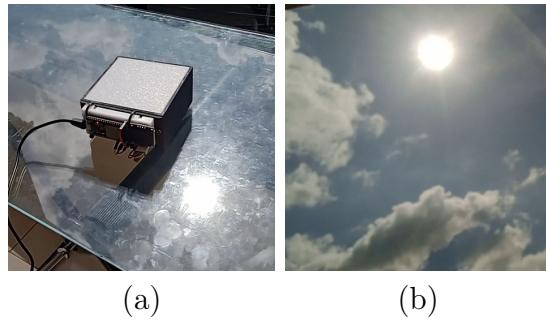
Fonte: produzido pelo autor

Figura 13 – (a) Foto da Estação de coleta de dados no momento da medição em 03 de maio e (b) foto do céu claro e sem nuvens no momento da medição em 03 de maio.



Fonte: produzido pelo autor

Figura 14 – (a) Foto da Estação de coleta de dados no momento da medição em 15 de maio e (b) foto do céu claro e com nuvens no momento da medição em 15 de maio.



Fonte: produzido pelo autor

A coleta de dados do teste 3: no primeiro dia ocorreu conforme a Tabela 7, sendo o processo repetido para  $ATIME$  igual a 20, 30, 40 e 50 totalizando 100 leituras para cada um dos canais do espectro de interesse; no segundo conforme a Tabela 8, sendo o processo repetido para  $ATIME$  igual a 20, 30, 40 e 50 somando 75 leituras para cada um dos canais do espectro de interesse, porém foram realizados 3 ciclos dessas 75 leituras, logo totalizando 225 leituras para cada um dos canais do espectro de interesse; por fim, no terceiro conforme a Tabela 9, sendo 3 ciclos de 30 leituras totalizando 90 leituras para cada um dos canais do espectro de interesse. Os dados coletados referentes às Tabelas 7, 8, 9 podem ser vistos no apêndice A no arquivo denominado tabelas.html.

Tabela 7 – Tabela da coleta de dados do teste 3 de avaliação do sensor As7341 com  $ASTEP$  assumindo os valores 200, 400, 600, 800, 1000 e  $g$  valores de 1 a 4.

$ATIME$	$ASTEP$	$g$	Canais											
			F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	<i>Clear</i>		
10	200	1												
10	400	1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	<i>Clear</i>		
10	600	1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	<i>Clear</i>		
10	800	1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	<i>Clear</i>		
10	1000	1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	<i>Clear</i>		
10	200	2	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	<i>Clear</i>		
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:		
10	1000	2	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	<i>Clear</i>		
10	200	3	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	<i>Clear</i>		
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:		
10	1000	3	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	<i>Clear</i>		
10	200	4	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	<i>Clear</i>		
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:		
10	1000	4	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	<i>Clear</i>		

Tabela 8 – Tabela da coleta de dados do teste 3 de avaliação do sensor As7341 com  $ASTEP$  assumindo os valores 200, 400, 600, 800, 1000 e  $g$  valores de 0 a 2.

$ATIME$	$ASTEP$	$g$	Canais									
			F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
10	200	0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
10	400	0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
10	600	0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
10	800	0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
10	1000	0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
10	200	1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	1000	1	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
10	200	2	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	1000	2	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear

Tabela 9 – Tabela da coleta de dados do teste 3 de avaliação do sensor As7341 com  $ATIME$ ,  $ASTEP$  e  $g$  assumindo os valores fixos 50, 1000 e 0 respectivamente.

$ATIME$	$ASTEP$	$g$	Canais									
			F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
50	1000	0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
50	1000	0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	Clear

#### 4.2 BASE DE DADOS COLETADOS PARA A ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA

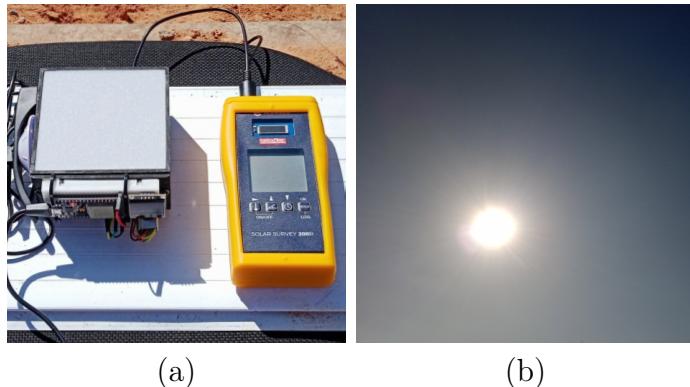
A base de dados referente à estimativa é formado pelas informações coletadas não só pela Estação construída neste trabalho, mas também pelas informações adquiridas a partir do Solarímetro comercial *Solar Survey 200R* que pode ser visto na Figura 15-a ao lado da Estação, o qual foi adotado como parâmetro de comparação devido a disponibilidade. De acordo com SEAWARD (2012), o solarímetro é voltado para instalação de células fotovoltaicas e fornece informações da irradiância, do ângulo solar azimutal, da temperatura (do ar e da célula fotovoltaica) e da inclinação da superfície sobre a qual se encontra apoiado.

Os dados foram coletados conforme a Tabela X, na UFES campus Alegre no estacionamento atrás da Biblioteca e em duas etapas. Sendo a primeira das 10:45 às 12:30 e a segunda das 14:33 às 16:06, com a Estação e o Solarímetro lado a lado orientados horizontalmente como mostra a Figura 15-a, em condições de céu claro sem nuvens como mostra a Figura 15-b e sob a condição de sincronia das marcas de tempo dos dispositivos com intervalo de um minuto entre as medições. A tabela referente à base de dados da estimativa pode ser vista no apêndice A no arquivo denominado tabelas.html.

Tabela 10 – Tabela da coleta de dados para a estimativa da irradiância global no plano horizontal.

<i>g</i>	<i>TINT</i>	Data	Hora	Canais												Irradiância
				F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	<i>Clear</i>			
0	141	28/06/2023	10:45													G
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
0	141	28/06/2023	15:51	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	NIR	<i>Clear</i>			G

Figura 15 – (a) Foto da Estação e do Solarímetro 200R do momento da coleta de dados no dia 28 de junho e (b) foto do céu claro e sem nuvens no momento da coleta de dados também no dia 28 de junho.



Fonte: produzido pelo autor.

### 4.3 ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA

A Estimativa da irradiância consiste na obtenção de uma relação matemática que gere valores aproximados em função dos dados obtidas pela Estação dos dados mensurados pelo Solarímetro. Visto que as dimensões dos dados proporcionadas pelos dois dispositivos são distintas, isto é, a Estação fornece contagens de fótons de nove bandas espectrais diferentes e o Solarímetro irradiância maior ou igual a  $100 \text{ W/m}^2$ , foi feita a aplicação do método estatístico de regressão linear múltipla, que já foi descrito no referencial teórico, com as finalidades de obter uma relação matemática e aumentar a correlação entre as variáveis independentes (contagens de fótons) e dependente (irradiância).

Neste sentido, após a composição do banco de dados, foi dado início ao tratamentos dos dados (que ocorreu no ambiente de programação *Jupyter Notebook* com auxílio dos módulos *Numpy*, *Pandas*, *Seaborn* e *Matplotlib*, assim como todas outras análises e gráficos produzidos pelo autor deste trabalho), com objetivo de refinar a sincronia das informações obtidas e fazer a seleção dos dados válidos. Em seguida, foi feita a construção dos gráficos antes da aplicação dos métodos de regressão linear e linear múltipla e por fim, a construção dos gráficos após aplicação dos métodos de regressão. O cálculo das estimativas e a tabela com os dados estimados podem ser visto no apêndice A.

## 5 RESULTADOS E ANÁLISE

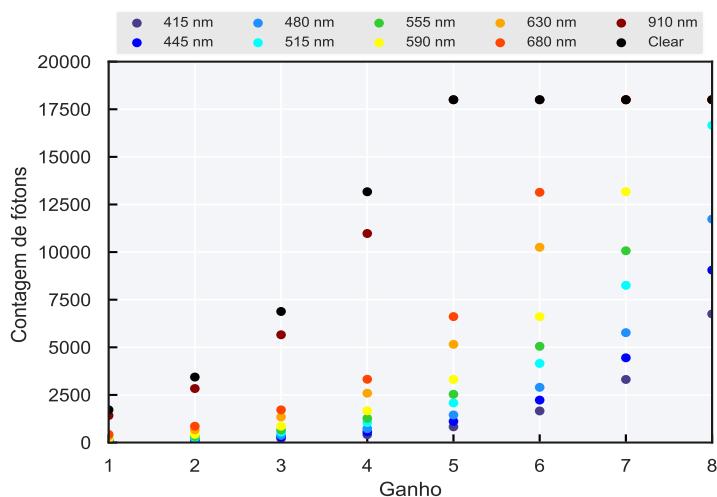
Este capítulo abordará as principais análises e resultados das informações coletadas nos testes 1, 2 e 3, do sistema de aquisição de dados, bem como da medição comparativa da Estação com o Solarímetro.

### 5.1 RESULTADOS DO TESTE 1

O teste 1 seguiu em conformidade com a metodologia citada no capítulo anterior, a análise dos dados centrou-se na produção de gráficos e posteriormente na interpretação desses para descrever o comportamento do As7341 quando se altera o parâmetro ganho, verificar as primeiras informações do ponto de saturação e também verificar as primeiras respostas sobre comportamento do difusor com ângulo de incidência de fótons em  $0^\circ$ .

A Figura 16 a seguir mostra as contagens de fótons de dez dos onze canais disponíveis do sensor em função do parâmetro ganho com a fonte de luz posicionada a 0,1 m e sem a placa difusora. É possível notar que as curvas da contagem de fótons em função do ganho apresentadas exibem uma relação exponencial crescente concordando com o que é apresentado em AMS (2020), as contagens mais altas encontram-se na região dos maiores comprimentos de onda do visível e o ponto de saturação ocorre em 18000 fótons para as condições estabelecidas neste teste.

Figura 16 – Gráfico da contagem de fótons em função do ganho, configurações da medição: sem placa difusora, fonte a 0,1 m,  $ATIME = 39$  e  $ASTEP = 599$

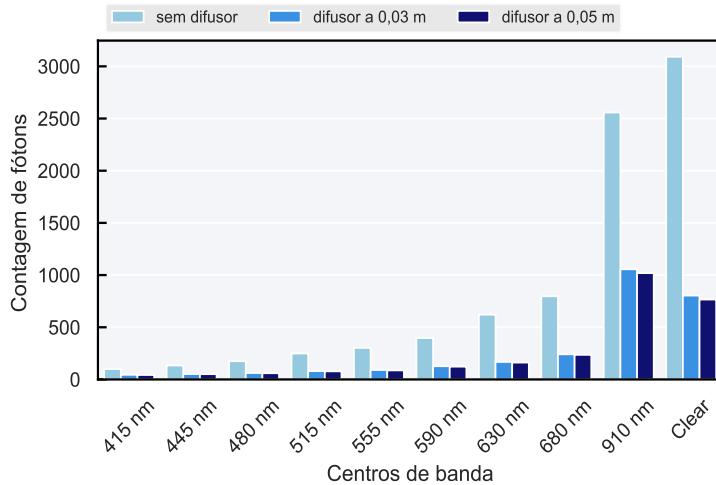


Fonte: produzido pelo autor.

A Figura 17 exibe a frequência dos fótons relacionados às respectivas bandas espectrais nas seguintes condições: fonte a 1 metro, ganho 8, sem a placa difusora, com a placa

difusora a 0,03 m e com a placa difusora a 0,05 m. Logo, a comparação das condições com e sem difusor mostra que a placa promove uma atenuação na contagem próxima de 30%; contudo na comparação entre as duas condições com a placa, a redução é muito baixa em relação as comparações sem a placa atenuando em torno de 1%.

Figura 17 – Contagem de fótons dos centros de bandas nas condições: sem difusor e com difusor a 0,03 e 0,05 metros e a fonte a 1 metro.



Fonte: produzido pelo autor.

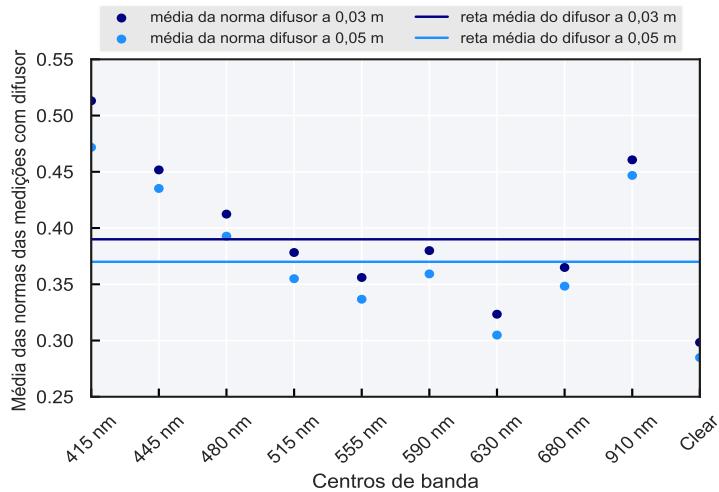
Para obter mais informações sobre a influência da placa difusora na contagem de fótons, foi realizada uma seleção<sup>1</sup> de uma medição não saturada de ganho mais alto (dos canais VIS, NIR e *clear* de mesma leitura) para cada valor assumido por  $D_{fonte}$ <sup>2</sup> nas três possibilidades: sem difusor,  $D_{difusor} = 0,03$  e  $D_{difusor} = 0,05$ . Em seguida, para as medições selecionadas com  $g < 8$ , foi feita uma estimativa<sup>3</sup> dessas medições para  $g = 8$  por meio da equação 3.7, com a intenção nivelar todas as medições selecionadas em CF de  $g = 8$ . Por fim, foi realizada a normalização das medições niveladas com difusor pelas sem difusor e, em seguida, calculada a média das normas. Com base no resultado desse cálculo, foi plotado o gráfico da Figura 18 que mostra a média das normas em função dos centros de banda dos canais, bem como as retas médias das médias das normas.

<sup>1</sup> As medições selecionadas podem ser vistas no anexo A.

<sup>2</sup>  $D_{fonte} = 0,03$  foi desconsiderado pois esta é a distâncias mínima  $D_{difusor}$ .

<sup>3</sup> A tabela referente aos resultados da estimativa da CF de  $g < 8$  para CF de  $g = 8$  pode ser vista no anexo A.

Figura 18 – Gráfico referente a média das leituras selecionadas e niveladas com difusor normalizadas pelas leituras selecionadas e niveladas sem difusor referente aos centros de banda dos canais VIS, NIR e *clear*.



Fonte: produzido pelo autor.

Diante disso, pode-se inferir que o difusor interage de forma distinta em cada um dos centros de bandas, atenuando menos os centros 415 nm do VIS e o 910 nm NIR e atenuando mais o canal *clear* e o centro 630 nm do VIS. Já em relação às retas médias possuem uma variação de 0,02, indicando do que as distâncias avaliadas entre o sensor e o difusor não se mostram efetivas na atenuação quando comparadas entre si.

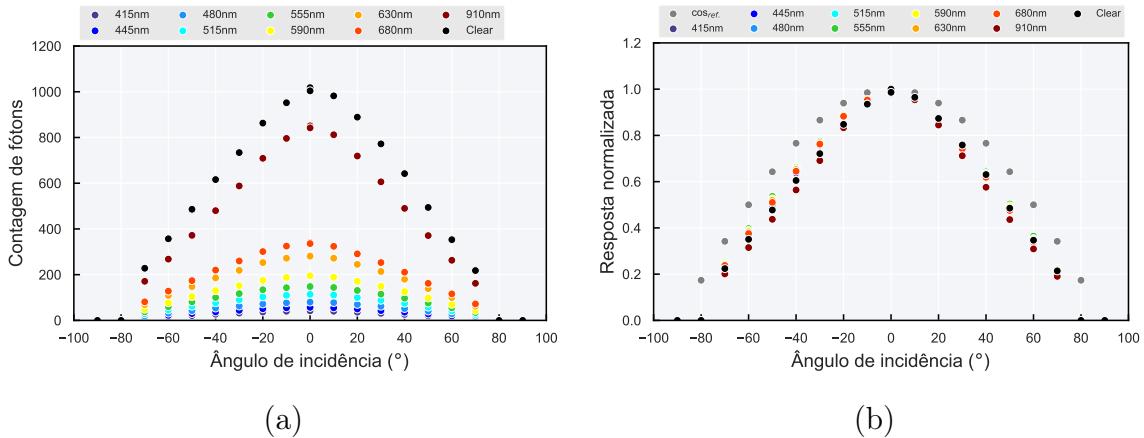
De forma geral, o Teste 1 mostrou que o difusor, mesmo influenciando de forma diferente as bandas, é um meio de atenuação necessário para minimizar e difundir a incidência de luz no sensor. Pois o teste foi realizado com uma lâmpada que, mesmo a uma pequena distância, produz irradiância inferior àquela produzida pelo Sol na superfície da Terra.

## 5.2 RESULTADOS DO TESTE 2

O teste 2 também seguiu a metodologia mencionada no capítulo anterior e centrou a análise dos dados na produção e interpretação de gráficos relativos ao funcionamento difusor porém com foco na incidência de luz em ângulo, variando de  $70^\circ$  a  $-70^\circ$ .

A Figura 19-a mostra a contagem de fôtons não normalizada e a 19-b mostra a contagem de fôtons normalizada pelo maior valor de cada canal em função do ângulo de incidência, com a seguinte configuração: ganho fixado em 8 e fonte de luz a 1,15 m com feixe colimado. Assim, com base no que é apresentado nos gráficos abaixo, é possível afirmar que há uma relação isotrópica nas contagens, isto é, as contagens variam pouco em ângulos opostos de incidência.

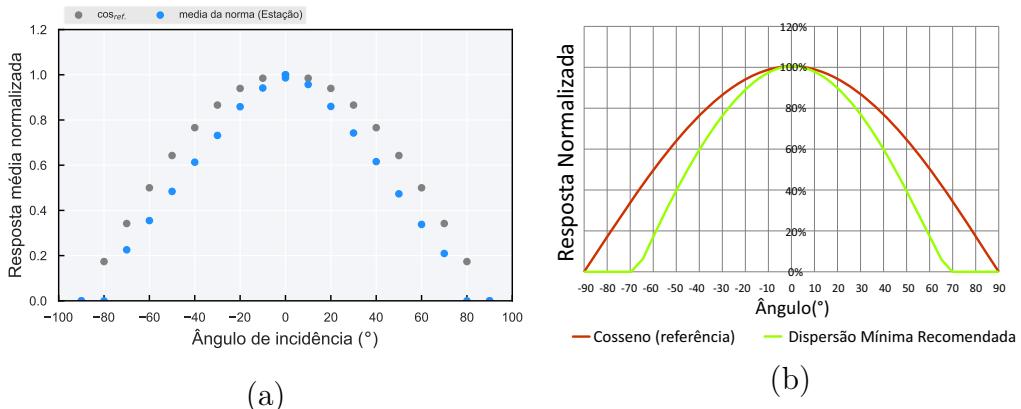
Figura 19 – (a) Gráfico da contagem de fôtons da Estação de coleta de dados em função do ângulo, com as seguintes configurações fixas  $g = 8$ ,  $ATIME = 39$ ,  $ASTEP = 599$ ,  $D_{fonte} = 1,15m$  e feixe colimado; (b) gráfico da contagem de fôtons de (a) normalizada em função do ângulo e o a função cosseno ( $\cos_{ref}$ ).



Fonte: produzido pelo autor.

A Figura 20-a apresenta a média da resposta normalizada em função do ângulo de incidência juntamente com função cosseno, já a Figura 20-b mostra a resposta normalizada mínima recomendada em função do ângulo de incidência. Comparando os dois gráficos abaixo, é possível notar que a resposta da Estação é ligeiramente melhor do que a resposta mínima, visto que a curva descrita pela média da norma dos pontos experimentais da Estação são mais próximos do cosseno do que a resposta mínima recomendada.

Figura 20 – (a) Gráfico da resposta média normalizada da Estação de coleta de dados em função do ângulo de incidência e a função cosseno ( $\cos_{ref}$ ), (b) gráfico da resposta normalizada mínima recomendada pelo manual do As7341 em função do ângulo de incidência.

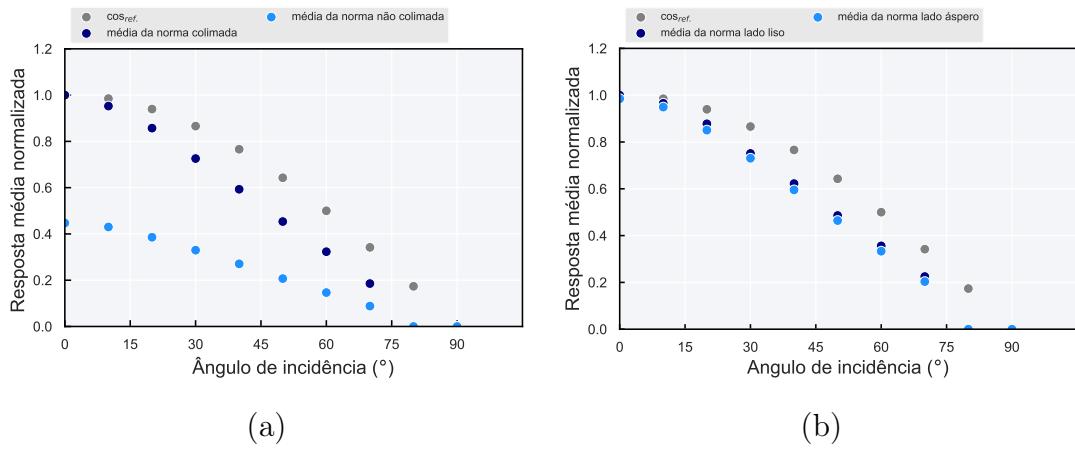


Fonte: (a) produzido pelo autor; (b) AMS (2020)

A Figura 21-a descreve as médias das respostas normalizadas para a fonte com feixe colimado e não colimado em função do ângulo de incidência e a função cosseno. Esse

gráfico mostra resultados em conformidade com o esperado, ou seja, resposta colimada maior que a não colimada. E a Figura 21-b mostra as médias das respostas normalizadas para os lados do difusor em função do ângulo de incidência e o cosseno. Esse segundo gráfico mostra que apesar das duas respostas serem parecidas, resposta do lado liso é ligeiramente mais próxima da curva do cosseno.

Figura 21 – (a) Gráfico da resposta média normalizada da Estação em função do ângulo referente aos feixes colimado e não colimado da fonte de luz e (b) gráfico da resposta média normalizada da Estação em função do ângulo referente aos lados liso e áspido do difusor .



Fonte: produzido pelo autor.

### 5.3 RESULTADOS DO TESTE 3

O teste 3 seguiu conforme a metodologia citada no capítulo anterior e também centrou a análise dos dados na produção e interpretação de gráficos, contudo, adicionalmente, foram utilizados dois métodos matemáticos já mencionados no referencial teórico, a regressão linear e a contagem básica, para auxiliar no entendimento do comportamento do sensor e encontrar uma configuração adequada para uso em ambiente externo.

A Figura 22 mostra três gráficos da contagem básica para cada medição feita nos três dias do teste com as variações dos parâmetros descritas na seção 4 para o teste 3.

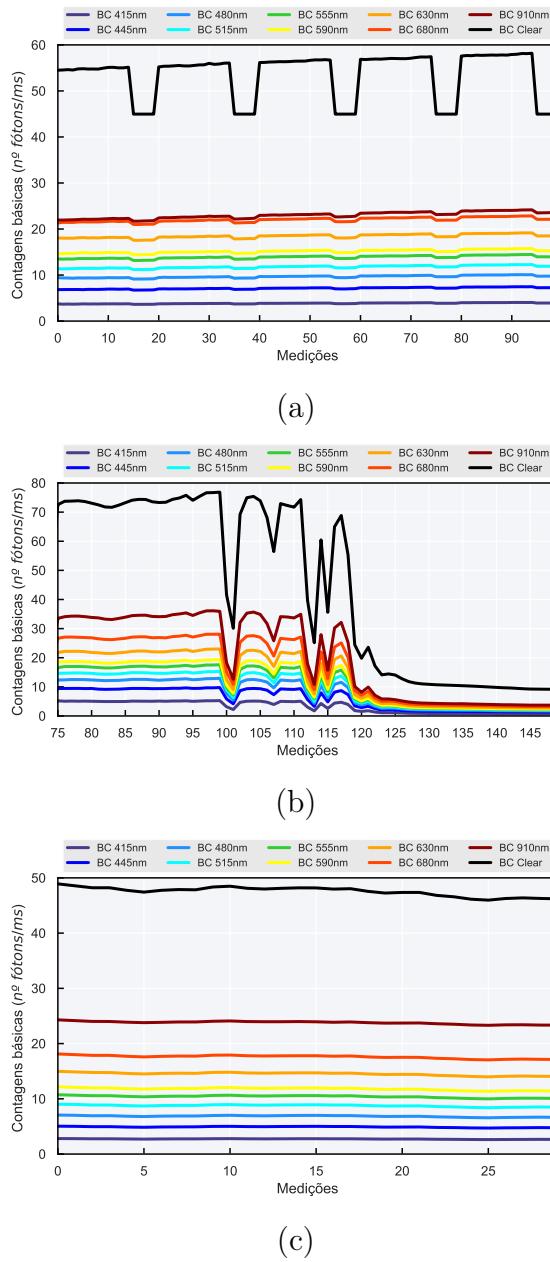
No primeiro dia, sob a condição estável de céu claro sem nuvens e com as combinação dos parâmetros ganho (variando de 1 a 4), ATIME (variando de 10 a 50 ) e ASTEP (variando de 200 a 1000) a Figura 22-a exibe um comportamento distinto do estabelecido pela contagem básica no referencial teórico para uma condição estável, logo pode-se afirmar que há inconsistência nas medições onde o padrão de queda na contagem básica ocorre.

No segundo dia, sob a condição de céu claro com nuvens e com as combinações dos parâmetros ganho (variando de 0 a 2), atime (variando de 10 a 50) e astep (variando de

200 a 1000) a Figura 22-b não exibe um padrão definido, visto que as medições foram executadas em condição não estável.

No terceiro dia, sob a condição estável de céu claro sem nuvens e os parâmetros fixados em ganho 0,  $ASTEP = 50$  e  $ATIME = 1000$ , a Figura 22-c apresenta o padrão desejado mostrando que essa é uma boa configuração de parâmetros para ser utilizada em ambiente externo, convergindo com o estabelecido no referencial teórico para a contagem básica.

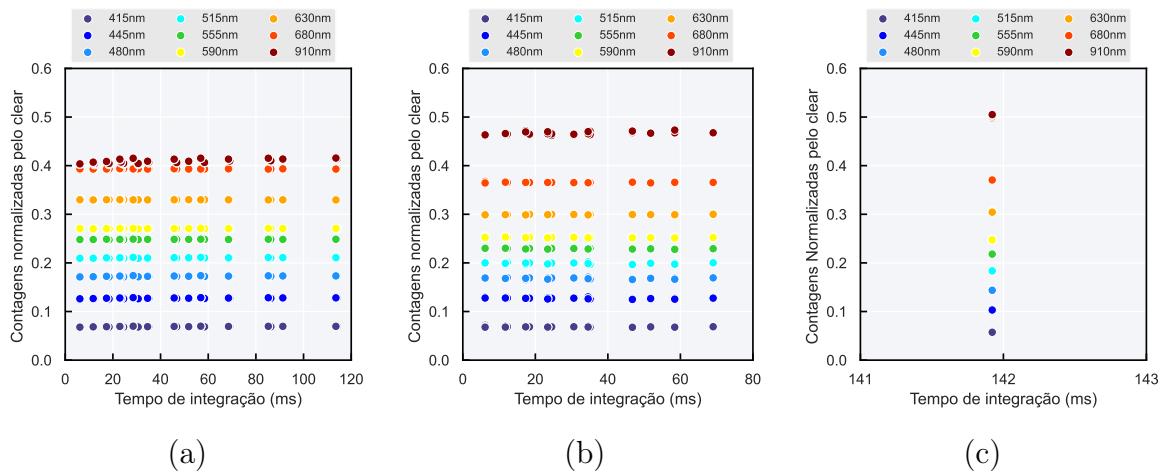
Figura 22 – (a) Gráfico da contagem básica de cada medição do dia 3 de maio, (b) gráfico da contagem básica de cada medição do dia 15 de maio e (c) gráfico da contagem básica de cada medição do dia 22 de junho.



Fonte: produzido pelo autor.

Na tentativa de simular uma possível condição constante nas medições para fins comparativos, foi calculada a norma da contagem de fótons pelos valores do canal *clear* e feita uma seleção descartando-se os dados com valores da CB do *clear* abaixo de 0.065. De acordo com isso, a Figura 23 trás os gráficos referentes às normas das contagens de fótons selecionadas em função do tempo de integração. Além disso, é possível notar que os dados das Figuras 23-a e 23-b encontram-se em concordância com o que é estabelecido na definição da CB na seção 3.6 indicando coerência nas medições selecionadas. Já na Figuras 23-c os valores encontram-se totalmente estáveis visto que todos os parâmetros estão fixos.

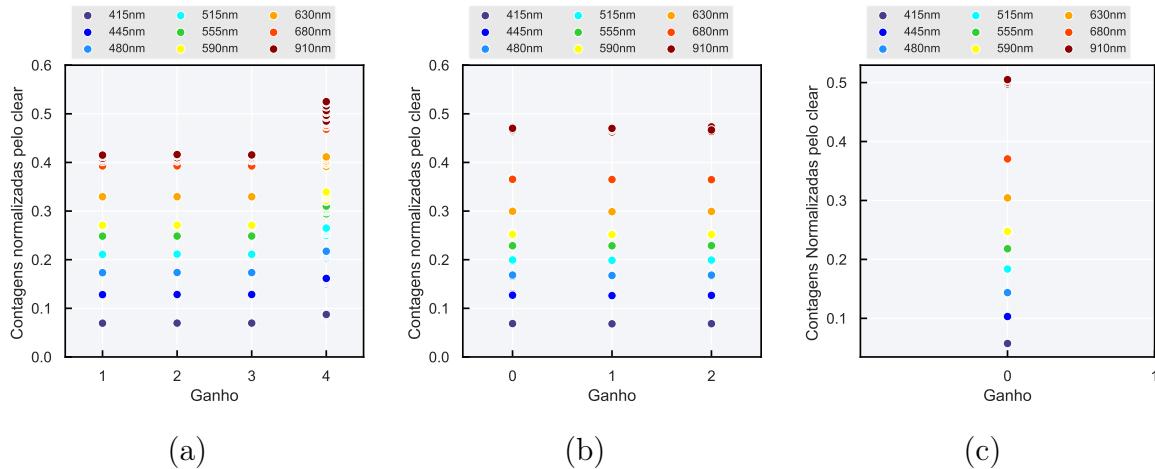
Figura 23 – (a) Gráfico da contagem de fótons normalizada pelo *clear* em função do tempo de integração do dia 3 maio, (b) gráfico da contagem de fótons normalizada pelo *clear* em função do tempo de integração do dia 15 maio e (c) gráfico da contagem de fótons normalizada pelo *clear* em função do tempo de integração do dia 22 junho.



Fonte: produzido pelo autor.

A Figura 24 refere-se às contagens de fótons normalizadas pelo *clear* porém em função do ganho. Na Figura 24-a, que mostra todas as medições (selecionadas e não selecionadas), pode-se perceber que as inconsistências constatadas na Figura 22-a estão relacionadas a escolha do ganho 4, pois são os valores que divergem da resposta dos ganhos 1, 2 e 3. Deste modo, a escolha do ganho maior ou igual a 4 para ambiente externo pode acarretar em saturação na leitura. Nas Figuras 24-b, que mostra apenas as medições selecionadas, e 24-c não se verifica inconsistência nas medições para os valores de ganho estabelecidos.

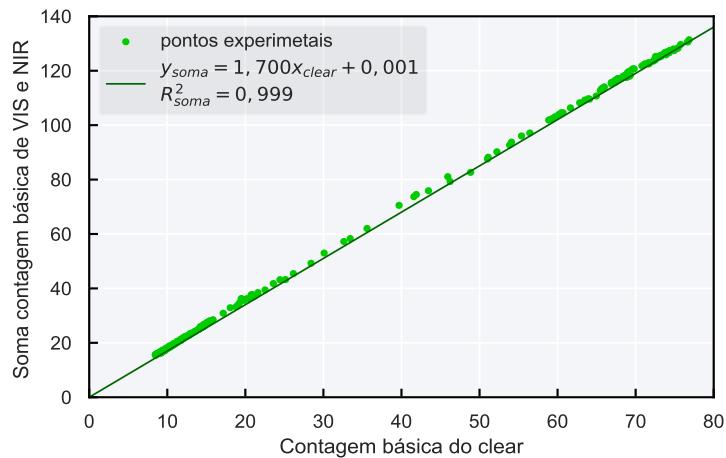
Figura 24 – (a) Gráfico da contagem de fótons normalizada pelo *clear* em função do ganho do dia 3 maio, (b) gráfico da contagem de fótons normalizada pelo *clear* em função do ganho do dia 15 maio e (c) gráfico da contagem de fótons normalizada pelo *clear* em função do ganho do dia 22 junho.



Fonte: produzido pelo autor.

A Figura 25 mostra a relação de proporcionalidade entre a soma da CB do VIS e NIR com a CB do *clear*, que pode ser estimada por meio da regressão linear com uma correlação positiva forte de 0,99. De acordo com a regressão aplicada a soma é 1,7 vezes maior que a medição do *clear*.

Figura 25 – Gráfico da soma da contagem básica do VIS e NIR em função da contagem básica do *clear* dos dados do dia 15 de maio.



Fonte: produzido pelo autor.

## 5.4 RESULTADOS DA MONTAGEM DA ESTAÇÃO DE COLETA DE DADOS

Em função do tempo previsto para execução deste trabalho, a estrutura física da Estação construída, exibida no capítulo anterior, não é uma estrutura ideal pois muitas melhorias podem ser implementadas, a título de exemplo: a compactação da estrutura física, a implementação de bateria ou pilhas convencionais para facilitar medições em locais longe de tomadas elétricas, a incorporação de leitor de cartão de memória para aumentar a quantidade de leituras por ciclo de medição, a proteção dos componentes externos à caixa, entre outros. Contudo, trata-se de um protótipo, ou seja, uma estrutura funcional que cumpre os propósitos estabelecidos por este trabalho, fixando os componentes, protegendo o As7341 e atenuando e difundindo a irradiância incidente.

O sistema de aquisição de dados, na versão mais recente, conta com aproximadamente 270 linhas de código da linguagem *micropython* e teve como base Tollervey (2017), bem como três *drivers* públicos, que podem ser vistos em Hamerling (c2022), Bos *et al.* (c2018) e George *et al.* (2017). Além disso, com o sistema é possível: gravar dados de leitura do sensor na memória *flash* do Esp32 com método de armazenamento FIFO<sup>4</sup>, suportando no máximo três arquivos com 30 medições em cada um; acessar uma rede de *wifi* de internet configurada com *ip* fixo para estabelecer comunicação com os demais usuários da rede; disponibilizar os arquivos com os dados das medições por meio de um servidor arquivos online, bem como; exibir informações no *display oled* sobre as medições, o *ip* de acesso do servidor, a data e a hora. No geral o sistema, na prática, funcionou de acordo com o esperado, contudo para a inclusão das marcas de tempo nas medições torna-se dependente de uma rede de internet a distância de *ip* fixo. Os códigos produzidos referentes ao sistema estão disponíveis no apêndice A.

## 5.5 RESULTADOS DA ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA GLOBAL NO PLANO HORIZONTAL

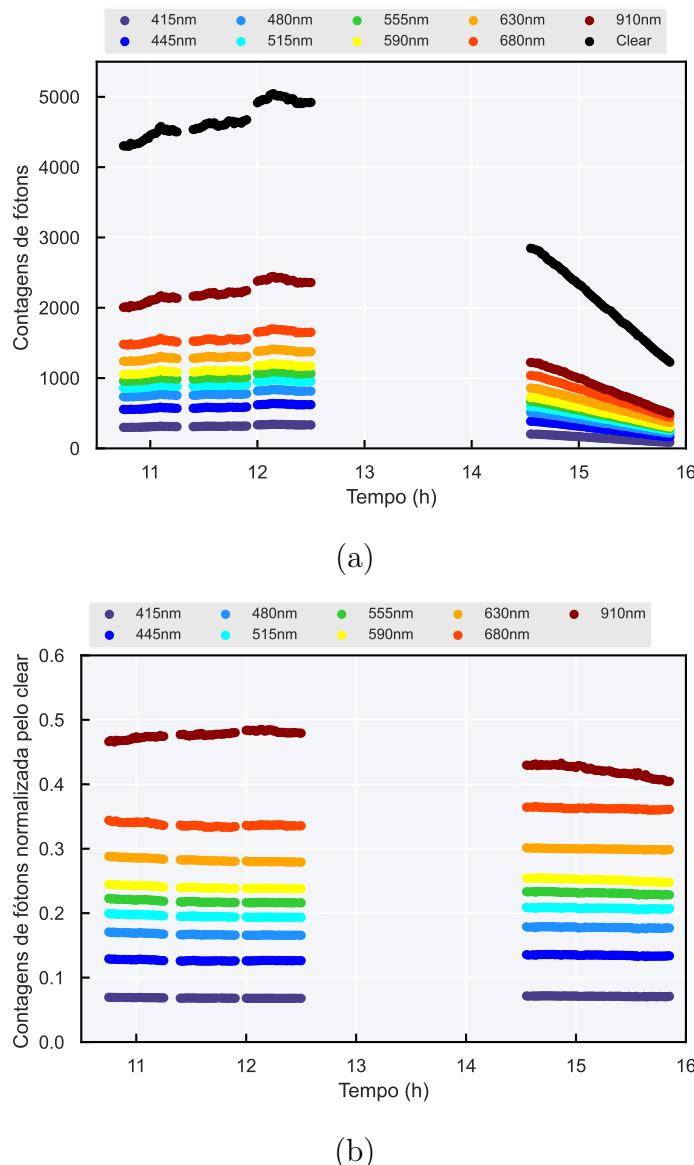
A estimativa seguiu conforme a metodologia do capítulo anterior e teve por objetivo verificar o grau de correlação entre as medições da Estação e do *Survey 200R*. As Figuras 26-a e 26-b mostram as contagens de fôtons e as normas das contagens em função das marcas de tempo de cada medição da Estação do dia 28 de junho, em duas etapas, sendo: a primeira no período em que  $\theta_z$  é mínimo (próximo de 12h), a estimativa da variação de  $\theta_z$ <sup>5</sup> nesta etapa foi  $\theta_z = 47^\circ$  às 10:45 até  $\theta_z = 44^\circ$  às 12:30, intervalo em que a medição mostrou-se mais irregular e com maior incidência de NIR; a segunda no período em que  $\theta_z$  tende ao valor máximo, a estimativa da variação nesta etapa foi  $\theta_z = 56^\circ$  às 14:30 até  $\theta_z = 72^\circ$  às 16:00, intervalo em que a medição foi mais estável e com menos incidência

<sup>4</sup> FIFO: first in first out é um método de armazenamento no qual o arquivo mais antigo é apagado para dar lugar ao novo arquivo.

<sup>5</sup> A estimativa dos ângulo solares  $\theta_z$  pode ser vista no apêndice A no arquivo denominado angulos solares.html.

de NIR. Comparando-se esta medição com as dos testes anteriores é possível dizer que a Estação exibiu comportamento esperado, com valores mais elevados das contagens de fótons nas bandas VIS mais próximas do NIR e menores para bandas próximas do UV.

Figura 26 – (a) Gráficos da contagem de fótons em função do tempo em que ocorreu a medição, referente a medição comparativa do dia 28 de junho, com os parâmetros de ganho e tempo de integração fixos, respectivamente, em 0 e 141 ms e (b) gráfico da resposta normalizada da contagem de fótons dos canais VIS e NIR pelo *clear* em função do tempo em que ocorreu a medição, referente a medição comparativa do dia 28 de junho, com os parâmetros de ganho e tempo de integração fixos, respectivamente, em 0 e 141 ms.

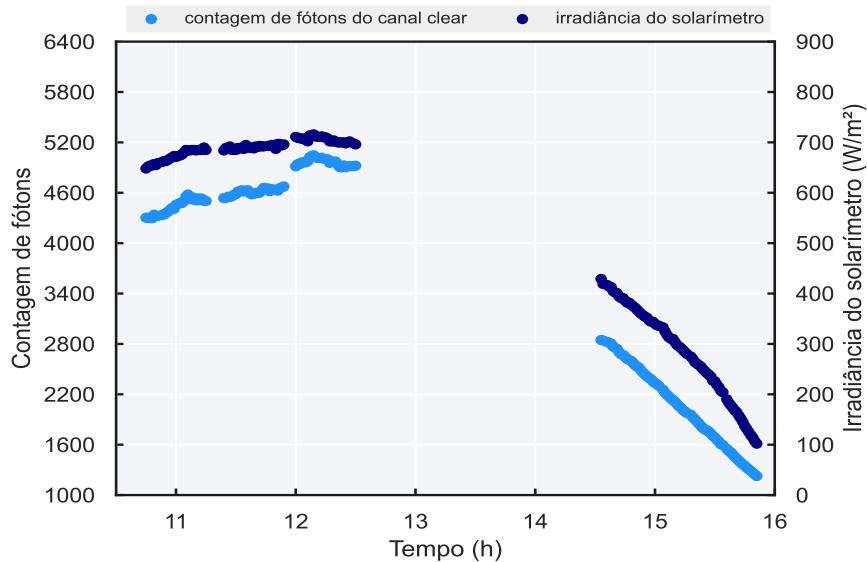


Fonte: produzido pelo autor.

A Figura 27 mostra a contagem de fótons do canal *clear* da Estação e a irradiância do solarímetro em função das marcas de tempo de cada medição do dia 28 de junho, em duas

etapas assim como o gráfico anterior. Em relação à primeira etapa, é possível notar que os dados do solarímetro se mostram menos irregulares, ou seja, com menos variação quando comparado ao *clear*, além disso, a irradiância possui valores mínimo e máximo de 648 e 716 W/m<sup>2</sup> e o *clear*, 4303 e 5046 fótons. Já na segunda etapa, os dados, tanto do *clear* quanto da irradiância, parecem mais uniformes, entretanto a irradiância tem coeficiente angular menor o que implica em um decréscimo mais acelerado quando comparada à curva do *clear*, somado a isso, os valores mínimos e máximos para a irradiância são 102 W/m<sup>2</sup> (valor próximo do limite inferior do Survey 200R de 100 W/m<sup>2</sup>) e 419 W/m<sup>2</sup> e para o *clear* 1226 e 2846 fótons.

Figura 27 – Gráfico da contagem de fótons do canal *clear* do As7341 (com os parâmetros de ganho e tempo de integração fixos em 0 e 141 ms respectivamente) e da irradiância do Survey 200R em função do tempo em que ocorreu a medição, referente a medição comparativa do dia 28 de junho.



Fonte: produzido pelo autor.

A análise comparativa ocorreu primeiramente com a aplicação da regressão linear, por meio das equações 3.16 e 3.17, com intenção de correlacionar a irradiância, variável dependente, com o *clear*, variável independente. O cálculo retornou a matriz de coeficientes com  $\beta_0 = -36,858$  e  $\beta_1 = 0,156$  gerando o modelo de regressão a seguir:

$$\hat{Y}_{clear} = 0,156x_{clear} - 36,858. \quad (5.1)$$

Já o cálculo do coeficiente de determinação retornou  $R^2_{clear} = 0,991$  mostrando ser uma correlação forte visto que  $R^2_{clear}$  tem um valor próximo de 1.

Em seguida, foi calculada a regressão linear múltipla, também utilizando as equações 3.13 e 3.14, para correlacionar a irradiância (variável dependente) com os 9 centros de

banda da Estação (variáveis independentes), isto é, os centro de banda VIS e NIR. A retornou a seguinte matriz a coeficientes:

$$\hat{\beta}^t = \begin{bmatrix} -5,534 & 3,342 & -1,784 & 1,661 & -1,032 & -1,843 & 5,498 & -2,135 & -,128 & -128,920 \end{bmatrix},$$

sendo  $-128,920$  o coeficiente linear e o restante os coeficientes angulares que geraram o modelo de regressão a seguir:

$$\begin{aligned} \hat{Y}_{bandas} = & -5,534x_{415nm} + 3,342x_{445nm} - 1,784x_{480nm} + 1,661x_{515nm} - 1,032x_{555nm} \\ & -1,843x_{590nm} + 5,498x_{630nm} - 2,135x_{680nm} - 0,128x_{910nm} - 128,920 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Já o coeficiente de determinação resultou em  $R^2_{bandas} = 0,999$ , o que também mostrou uma correlação forte superando a correlação do  $R^2_{clear}$  em 0.008 aproximadamente.

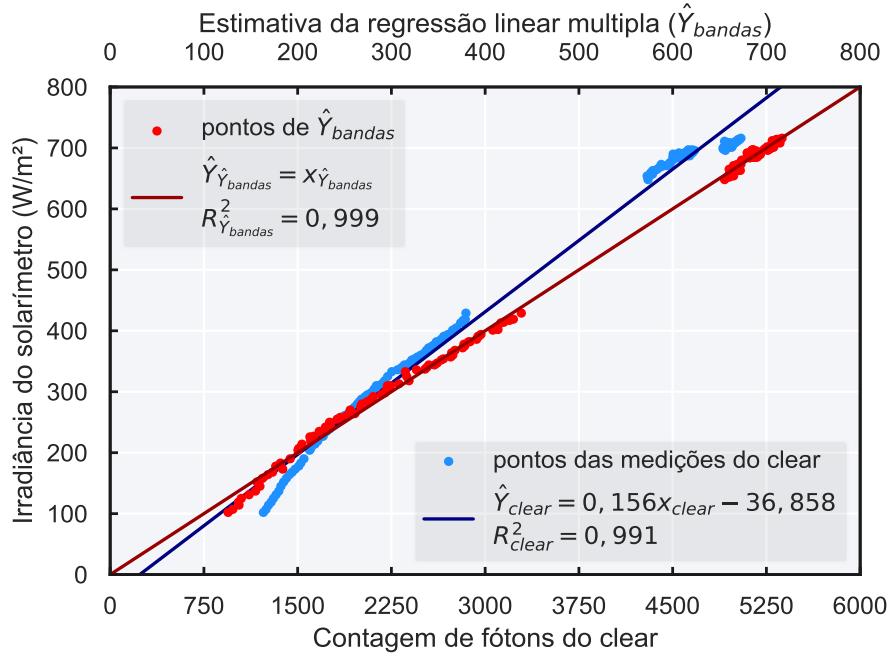
Sabendo que não há uma forma conhecida para representar a reta produzida pelo modelo  $\hat{Y}_{bandas}$  de forma multidimensional, devido à quantidade de variáveis independentes do problema, e também para fins de comparação com o modelo  $\hat{Y}_{clear}$ , foi aplicada uma nova regressão que correlaciona  $\hat{Y}_{bandas}$  com  $Y_{irradiância}$ , de modo a obter uma nova reta que pode ser representada no plano xy. Neste sentido, a nova regressão, que também foi calculada com as equações 3.16 e 3.17, retornou o modelo  $\hat{Y}_{\hat{Y}_{bandas}}$  (estimativa da estimativa da regressão linear múltipla) dado por:

$$\hat{Y}_{\hat{Y}_{bandas}} = x_{\hat{Y}_{bandas}} - 1,474 \cdot 10^{-8}, \quad (5.3)$$

cujo coeficiente linear foi desprezado pois apresentava ordem  $10^{-8}$  e o coeficiente angular é igual a 1. O coeficiente de determinação desta estimativa foi  $R^2_{\hat{Y}_{bandas}} = 0,999$  caracterizando uma forte correlação e mantendo a mesma diferença de 0,008 conferida pelo  $R^2_{bandas}$  e relação ao  $R^2_{clear}$ .

O gráfico da Figura 28 apresenta os pontos dos valores de  $Y_{irradiância}$  em função dos valores de  $\hat{Y}_{bandas}$  e a reta do modelo de regressão  $\hat{Y}_{\hat{Y}_{bandas}}$  no eixo x superior, bem como os pontos dos valores da  $Y_{irradiância}$  em função dos valores da medição do canal *clear* da Estação e a reta do modelo  $\hat{Y}_{clear}$  no eixo x inferior. Comparando as duas regressões, é possível notar que  $\hat{Y}_{\hat{Y}_{bandas}}$  proporciona uma estimativa com erros menores do que a proporcionada pelo  $\hat{Y}_{clear}$ . Apesar dos dois modelos terem se mostrado bons estimadores,  $\hat{Y}_{\hat{Y}_{bandas}}$  é mais próximo dos pontos não só no centro do gráfico mas também nas extremidades em que  $\hat{Y}_{clear}$  se aproxima menos dos pontos.

Figura 28 – Gráfico dos valores das medições da irradiância do Solarímetro Survey 200R do dia 28 de junho em função de dois eixos x distintos: o superior referente aos valores estimados pelo modelo de regressão linear múltipla  $\hat{Y}_{bandas}$  e o inferior referente aos valores das medições do dia 28 de junho do canal *clear* da Estação de coleta de dados.



Fonte: produzido pelo autor.

Um ponto para ser levado em consideração, é o fato de que os erros maiores exibidos nos extremos gráfico da Figura 28 não foram possíveis de serem explicados somente com os dados coletados para este trabalho. Logo, não se pode fazer afirmações sobre esses erros sem que novos teste seja feitos.

## 6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Diante do tempo empenhado e do que foi apresentado neste trabalho, pode-se afirmar, portanto, que tanto o objetivo geral quanto os específicos foram cumpridos.

No que se refere à montagem do aparato experimental, a estrutura da Estação proporcionou uma integração sólida dos componentes, a proteção do As7341, a atenuação e a difusão da irradiância incidente. Embora a Estação tenha atendido ao que foi proposto inicialmente, surgiram dois pontos relevantes durante a utilização dela na coleta de dados da estimativa da irradiância: o primeiro foi a dependência de uma tomada para a alimentação da Estação e o segundo é o limite de 30 medições por ciclo somando um total de 90 medições. Esses pontos deixaram a coleta um pouco mais trabalhosa. Contudo são dificuldades as quais podem ser resolvidas com a implementação de uma fonte de alimentação independente e de algum meio que aumente a memória de armazenamento da Estação.

Ainda em relação à montagem, o sistema de aquisição de dados, que pode ser considerado uma das partes mais árduas e em que se investiu mais tempo, foi sendo ajustado de acordo com as necessidades do projeto até chegar à versão atual. Esta versão, além de promover a comunicação entre usuário e demais dispositivos, entre outras características, conta com: armazenamento FIFO que gerencia a memória da Estação mas limita em 30 medições por ciclo, disponibilização dos arquivos de medição por meio de um servidor local e inclusão de marcas de tempo nas medições, sendo estes dois últimos recursos condicionados à conexão em uma rede internet móvel de *ip* fixo. Logo, é possível afirmar que esta versão apesar de ter uma certa dependência de uma rede de internet, supriu as necessidades do trabalho, possibilitando medições externas para a composição de parte do banco de dados da estimativa da irradiância, sendo a outra parte composta pelo solarímetro de referência.

Sobre os testes 1, 2 e 3, pode-se inferir que as informações produzidas auxiliaram no conhecimento de alguns limites do As7341 para ambientes internos e externos, de que a distância ( $D_{fonte}$ ) não interferiu de forma significativa com o espectro medido durante o teste com as lâmpadas, das influências da placa difusora nas bandas espectrais e no ângulo de incidência do sensor, como também da necessidade de um meio de atenuação da radiação incidente devido aos limites de saturação do sensor apresentado nos testes.

Conforme os resultados, é possível concluir que a estimativa da irradiância global no plano horizontal em função da contagem de fótons proporcionada pelo As7341 resultou em dois modelos, os quais possuem coeficientes de determinação forte indicando alta correlação com a irradiância do solarímetro, porém o modelo  $\hat{Y}_{bandas}$  exibe respostas melhores visto que possui um  $R^2$  ligeiramente maior e a reta  $\hat{Y}_{bandas}$  é mais próxima dos pontos o que implica em menor erro. Apesar dos bons resultados dos modelos nota-se que os

erros maiores não puderam ser explicados somente com esta análise comparativa entre os modelos gerados. Logo, embora algumas hipóteses possam ser levantadas como ruídos e limitação nos limites inferiores das medições do solarímetro, ainda não se pode fazer afirmações sobre esses erros sem que novas medições em ambiente externo e análises sejam feitas.

Neste sentido, foram pensados alguns possíveis direcionamentos para dar continuidade a este trabalho desenvolvido: aperfeiçoamento da estação de coleta de dados, que pode ser considerado o direcionamento que ajuda nos seguintes, relacionado à fonte de alimentação independente, ao aumento do número de medições por ciclo e à proteção dos componentes da caixa da estação; busca por explicação para o erro dos medidores para baixa irradiância apresentada no gráfico da Figura 28; campanha de medição com médias horárias para comparação com os dados da estação meteorológica do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) em Alegre; teste de material e geometria com outros difusores; comparação com piranômetro tipo termopilha; construção de uma albedômetro espectral; efeito da temperatura ambiente sobre o funcionamento do sensor; possível uso de *thermoelectric heating and cooling* que trata-se de um dispositivo de resfriamento termoelétrico ligado ao efeito Peltier.

## REFERÊNCIAS

ALVES, E. de O. **Propriedades Físicas do Semicondutor Bi<sub>2</sub> Te<sub>3</sub>**. 2007. 131 p. Dissertação (Pós-Graduação em Física) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

AMS OSRAM GROUP. **AS7263**: Datasheet — 6-channel nir spectral id device with electronic shutter and smart interface. Áustria, 2016. 46 p. Acesso em: 26 fev 2023. Disponível em: [https://ams.com/documents/20143/36005/AS7263\\_DS000476\\_1-00.pdf/4bd22964-7fe0-2053-397-906f0836182f](https://ams.com/documents/20143/36005/AS7263_DS000476_1-00.pdf/4bd22964-7fe0-2053-397-906f0836182f).

\_\_\_\_\_. **AS7262**: Datasheet — 6-channel visible spectral id device with electronic shutter and smart interface. Áustria, 2017. 48 p. Acesso em: 26 fev 2023. Disponível em: [https://www.mouser.com/catalog/specsheets/AMS\\_03152019\\_AS7341\\_D000504\\_1-00.pdf](https://www.mouser.com/catalog/specsheets/AMS_03152019_AS7341_D000504_1-00.pdf).

\_\_\_\_\_. **AS7265x**: Datasheet — datasheet – smart 18-channel vis to nir spectral id 3-sensor chipset with electronic shutter. Áustria, 2018. 63 p. Acesso em: 26 fev 2023. Disponível em: [https://ams.com/documents/20143/36005/AS7265x\\_DS000612\\_1-00.pdf/08051c8a-a7f6-6231-799-2d3fe0bf38b8](https://ams.com/documents/20143/36005/AS7265x_DS000612_1-00.pdf/08051c8a-a7f6-6231-799-2d3fe0bf38b8).

\_\_\_\_\_. **AS7341**: Datasheet — 11-channel multi-spectral digital sensor. Áustria, 2020. 69 p. Acesso em: 26 fev 2023. Disponível em: <https://ams.com/as7341>.

\_\_\_\_\_. **Spectral Sensor Calibration Methods**: Datasheet — as7341 evk evaluation kit. Áustria, 2021. 32 p. Acesso em: 02 jun 2023. Disponível em: [https://ams.com/documents/20143/36005/AS7341\\_AN000633\\_2-00.pdf](https://ams.com/documents/20143/36005/AS7341_AN000633_2-00.pdf).

ANGARITA, M. J. E.; RUIZ, A. F. G. Construcción de un dispositivo electrónico, para detección de cadmio en aplicaciones agrícolas. Unidades Tecnológicas de Santander, 2022.

BAIRD, S. G.; SPARKS, T. D. Build instructions for closed-loop spectroscopy lab: Light-mixing demo. 2023.

BÄUMKER, E. *et al.* A novel approach to obtain par with a multi-channel spectral microsensor, suitable for sensor node integration. **Sensors**, MDPI, v. 21, n. 10, p. 3390, 2021.

BOS, J.-C. *et al.* **MicroPython library**: Microwedserver. [S.l.], c2018. Acesso em: 18 jun 2023. Disponível em: <https://github.com/jczic/MicroWebSrv>.

BOTERO-VALENCIA, J.; MEJIA-HERRERA, M. Modular system for uv-vis-nir radiation measurement with wireless communication. **HardwareX**, Elsevier, v. 10, p. e00236, 2021.

BOTERO-VALENCIA, J.; MEJIA-HERRERA, M.; PEARCE, J. M. Design of a low-cost mobile multispectral albedometer with geopositioning and absolute orientation. **HardwareX**, Elsevier, v. 12, p. e00324, 2022.

BRITO, C. E. de A. **Estudo do transporte eletrônico de uma junção P-i-N com poço quântico único de GaAs**. 2016. 90 p. Dissertação (Pós-Graduação em Física) — Universidade Federal do Amazonas, Manaus.

COMELLA, L. M. *et al.* Estimation of leaf area index with a multi-channel spectral micro-sensor for wireless sensing networks. **Sensors**, MDPI, v. 22, n. 13, p. 5048, 2022.

EXPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 Series**: Datasheet—. Áustria, 2017. 32 p. Acesso em: 02 jun 2023. Disponível em: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf).

FILHOL, S. *et al.* A new approach to meteorological observations on remote polar glaciers using open-source internet of things technologies. **Frontiers in Environmental Science**, Frontiers, v. 11, p. 466, 2023.

GEORGE, D. *et al.* **Driver MicroPython SSD1306 OLED**. [S.l.], 2017. Acesso em: 18 jun 2023. Disponível em: <https://github.com/micropython/micropython-esp32/blob/esp32/drivers/display/ssd1306.py>.

GÓMEZ, J. *et al.* A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 40, 2018.

GUALDRÓN, Y. G. G.; JIMÉNEZ, J. M. V. *et al.* Diseño prototipo de escaner espectral portatil para la lectura de cadmio en tiras ph mediante sensor as7341 con tarjeta de adquisition raspberry pi zero w. Unidades Tecnológicas de Santander, 2022.

HAAG, R. **Desevolvimento de um radiômetro e metodologia para caracterização do espectro solar**. 2007. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física: Óptica e Física Moderna**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 4.

HAMERLING, R. **micropython-as7341**: Driver micropython. [S.l.], c2022. Acesso em: 26 fev 2023. Disponível em: <https://gitlab.com/robhamerling/micropython-as7341>.

HEGEMANN, T. *et al.* Using spectral sensors to determine photosynthetic photon flux density in daylight—a theoretical approach. **Lighting Research & Technology**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 54, n. 5, p. 429–440, 2022.

JESURAJ, A.; HASSAN, U. Point-of-care portable 3d-printed multispectral sensor for real-time enzyme activity monitoring in healthcare applications. **Biosensors**, MDPI, v. 13, n. 1, p. 120, 2023.

KADJA, T.; SUN, Y.; CHODAVARAPU, V. P. Low-cost, real-time polymerase chain reaction system with integrated rna extraction. **Sensors**, MDPI, v. 23, n. 10, p. 4604, 2023.

KUMARI, K. *et al.* Machine vision system for viral disease detection and severity estimation in tomato (*solanum lycopersicum l.*). Available at SSRN 4421671, p. 19, 2023.

MAIA, A. G. **Econometria: Conceitos e Aplicações**. 1. ed. [S.l.]: Saint Paul, 2017.

MARIN, F. R.; ASSAD, E. D.; PILAU, F. G. **Clima e Ambiente**: Introdução à climatologia para ciências ambientais. Campinas: Embrapa, 2008. Acesso em: 05 ago 2023. Disponível em: file:///C:/Users/User/Downloads/climaambiente.pdf.

MARTINS, F. R. *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar 2.** 2. ed. São José dos Campos: Inpe, 2017. 80 p.

NIÑO, D. L. C.; ARDILA, J. R. H.; BARAJAS, M. Q. Algoritmo para la gestión y manipulación del módulo espectrofotómetro as7341. Unidades Tecnológicas de Santander, 2022.

PASUY, J. D. O.; MARÍN, A. C. Á. *et al.* Modelo para la estimación de las propiedades del suelo a través de sensado multiespectral usando técnicas de aprendizaje de máquina. Pontificia Universidad Javeriana, 2022.

PEDROTTI, F. L.; PEDROTTI, L. M.; PEDROTTI, L. S. **Introduction to Optics.** 3. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2017. 658 p.

ROSA, E. H. d. S.; TOLEDO, L. F. R. B. Uma revisão dos princípios de funcionamento de células solares orgânicas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 43, 2021. Acesso em: 26 fev 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/Rb98DgWy6sdGrJ9Mpq8dd5B/?format=pdf&lang=pt>.

SEAWARD ELECTRICAL SAFETY TESTING E MEASURING. **Solar Survey 100/200R Series:** Datasheet—the ultimate solar site-survey tool. Reino Unido, 2012. 4 p. Acesso em: 25 jun 2023. Disponível em: <https://www.seaward.com/gb/support/download/371/>.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física moderna.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. v. 1. 772 p.

TOLLERVEY, N. H. **Programming with MicroPython:** Embedded programming with microcontrollers and python. 1. ed. Estado Unidos da America: O'Reilly Media, 2017. 210 p.

TRAN, T. N. *et al.* Reflectance at visible wavelengths for biological and biochemical characteristics of ocimum basilicum-practicability of colour sensors for plant phenotyping. Preprints, 2022.

YU, Z. *et al.* An open-source handheld spectrometer for colorimetric and fluorescence analyses. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, Elsevier, v. 287, p. 122072, 2023.

ZHANG, Y. *et al.* Machine learning for light sensor calibration. **Sensors**, MDPI, v. 21, n. 18, p. 6259, Set 2021.

## APÊNDICES

**APÊNDICE A – ARQUIVOS AUXILIARES.**

O *link* a seguir direciona o leitor para o repositório *github* com os arquivos auxiliares referente às tabelas de dados mensurados e estimados e aos códigos produzidos durante a confecção deste trabalho. Os arquivos se encontram na *branche master* do repositório.

[https://github.com/UlissesPhysics/Trabalho\\_de\\_conclusao\\_de\\_curso/tree/master](https://github.com/UlissesPhysics/Trabalho_de_conclusao_de_curso/tree/master).