Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Profesional de Física

Diseño y calibración de un prototipo de fotómetro solar portátil para el estudio de los aerosoles atmosféricos, usando tecnología LED inversa

TESIS

Para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

AUTOR

Thonny Ericson MOTA PEÑA

ASESOR

Jose Carlos ECHE LLENQUE

Lima, Perú

2023



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Mota, T. (2023). *Diseño y calibración de un prototipo de fotómetro solar portátil para el estudio de los aerosoles atmosféricos, usando tecnología LED inversa*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Física]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Thonny Ericson Mota Peña
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	76406994
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-7599-4597
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	José Carlos Eche Llenque
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	10710458
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-3667-4982
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Melchor Nicolás Llosa Demartini
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07266845
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	David Pareja Quispe
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	41273620
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	José Carlos Eche Llenque
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10710458
Miembro del jurado 3	
Nombres y apellidos	Oscar Rolando Baltuano Elías
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10301565

Datos de investigación	
Línea de investigación	A.2.4.2. Oceanografía Física y Física de la Atmósfera
Grupo de investigación	Ciencias de la Tierra, Clima y Medio Ambiente - CTCLIMA
Agencia de financiamiento	Perú. Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Vicerrectorado de Investigación y Posgrado (UNMSM-VRIP). Programa de Proyectos de Investigación para Grupos de Investigación Concurso con Financiamiento Interno (PCONFIGI) 2021. Código B21132191.
Ubicación geográfica de la investigación	Lugar: Cercado de Lima 15081, Cuidad Universitaria de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Coordenadas geográficas: 12°03 30 S 77°05 00 O
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Marzo 2021 – Noviembre 2022
URL de disciplinas OCDE	Meteorología y ciencias atmosféricas https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.00 Ciencias del medio ambiente https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.00 Ingeniería eléctrica, Ingeniería electrónica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.00

UNMSM
Firmado digitalmente por JIMENEZ TINTAYA Cesar Omar FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 20.02.2023 13:35:52 -05:00

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN FÍSICA

Siendo las 14:00 horas del jueves 19 de enero del 2023, en el Salón de Sesión Virtual de la Facultad de Ciencias Físicas, bajo la Presidencia del Mg. Melchor Nicolás Llosa Demartini (Presidente), Dr. David Pareja Quispe (Miembro), el Lic. Jose Carlos Eche Llenque (Asesor) y el Mg. Oscar Rolando Baltuano Elías (Suplente), se dio inicio a la Sesión Pública Virtual de Sustentación de Tesis para la obtención del Título Profesional de Licenciado en Física, mediante la Modalidad M1- Por Sustentación y Aprobación de Tesis Profesional, del Bachiller:

THONNY ERICSON MOTA PEÑA

Dando lectura al Resumen del Expediente, el Presidente del Jurado, invitó al Bachiller Thonny Ericson Mota Peña a realizar una exposición de Trabajo de Tesis titulado: "Diseño y calibración de un prototipo de fotómetro solar portátil para el estudio de los aerosoles atmosféricos, usando tecnología LED inversa"

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente, invitó al Bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión Virtual, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado el Mg. Melchor Nicolás Llosa Demartini, invitó al candidato y al público a pasar a la Sala de Sesión Virtual, para dar lectura al Acta de Calificación, en cuyo contenido se ha registrado la nota obtenida por el bachiller, la misma que ha sido de:

Sobresaliente	18	dieciocho
.....	.....	.....
(MENCIÓN)	(NÚMERO)	(LETRAS)

Habiendo concluido la Sustentación de la Tesis, el Presidente del Jurado, remitirá el Acta al Decano de la Facultad de Ciencias Físicas, quien la suscribirá dando fe de la realización del acto virtual de manera remota.

El Acta de Calificación será remitida al Director de la Escuela Profesional de Física quien a su vez solicitará la aprobación del Consejo de Facultad para el otorgamiento del Título Profesional de Licenciado en Física al Bachiller Thonny Ericson Mota Peña.
Siendo las 15:25 horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose tres (03) Actas originales de la Sustentación de la Tesis.

Ciudad Universitaria, 19 de enero de 2023.

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA



Mg. Melchor Nicolás Llosa Demartini
PRESIDENTE



Dr. David Pareja Quispe
MIEMBRO



Lic. Jose Carlos Eche Llenque
ASESOR



Mg. Oscar Rolando Baltuano Elías
SUPLENTE

UNMSM
Firmado digitalmente por BUSTAMANTE DOMINGUEZ Angel Guillermo FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 01.03.2023 16:21:02 -05:00

Dr. Ángel Guillermo Bustamante Domínguez
DECANO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS

Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:

Enlace:
https://us06web.zoom.us/j/85957295906?pwd=SjlPaTBuTklxeHp1Y21COVZ1V1EwQT09

ID de reunión: 859 5729 5906
Código de acceso: 245403

Grabación archivada en: https://fb.watch/ix0mXKfIsg/

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

INFORME DE EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD

1. Facultad: Ciencias Físicas
2. Escuela Profesional: Física
3. Autoridad Académica que emite el informe de originalidad: Mg. Jiménez Tintaya, César Omar
4. Apellidos y nombres de la autoridad académica: Mg. Jiménez Tintaya, César Omar
5. Operador del programa Informático de similitudes: Mg. Jiménez Tintaya, César
6. Documento evaluado: Tesis para optar el Título profesional de Licenciado en Física: "**Diseño y calibración de un prototipo de fotómetro solar portátil para el estudio de los aerosoles atmosféricos, usando tecnología LED inversa"**
7. Autor del documento: Thonny Ericson Mota Peña
8. Fecha de recepción del documento: 03/11/22
9. Fecha de aplicación del programa informático de similitudes: 14/11/22
10. Software utilizado
    - Turnitin
11. Configuración del programa detector de similitudes
    - Excluye textos entrecomillados
    - Incluye Bibliografía
    - Excluye cadenas menores a 40 palabras
12. Porcentaje de similitudes según programa detector de similitudes: 8% (ocho por ciento)
13. Fuentes originales de las similitudes encontradas
    - cybertesis.unmsm.edu.pe/ < 2%
    - ateneo.unmsm.edu.pe< 1%
    - www.sedoptica.es < 1%
    - www.tdx.cat < 1%
    - goa.uva.es < 1%
    - www.calitoo.fr < 1%
    - anes.org.mx < 1%
14. Observaciones: ninguna
15. Calificación de originalidad
    - Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones
16. Fecha del Informe: 14 de noviembre del 2022

UNMSM
Firmado digitalmente por JIMENEZ TINTAYA Cesar Omar FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 16.11.2022 18:59:39 -05:00

Firma del Evaluador

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a todos los investigadores, docentes y estudiantes que se ven limitados por la falta de instrumentos en el Perú.

ABREVIATURA

Abreviatura	**Significado**
AERONET	Aerosol Robotic Network
AOD	Aerosol Optical Depth
AOT	Atmospheric Optical Thickness
BBL	Beer – Bouguer - Lamber
CCN	Núcleos de condensación
CTCLIMA	Grupo de Investigación en Ciencias de la Tierra, Clima y Medio Ambiente
I2C	Inter Integrated Circuit
INFISA	Grupo de Investigación Instrumentación Física y Aplicaciones
IINDEP	Instituto de Investigación para el desarrollo del Perú
IGP	Instituto Geofísico del Perú
GPRS	Global Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSFC	Goddard Space Flight Center
GTP	Guanosín trifosfato
LAMAR	Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación
LDR	Light Dependant Resistor
LED	Light Emitting Diode
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCN	Amidinatos
NIST	National Institute of Standards and Technology
PCONFIGI	Programa de Proyectos de Investigación para Grupos de Investigación Concurso con Financiamiento Interno
PHOTONS	Photométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire
PM	Particulate Matter
RGB	Red-Green-Blue
RS232	Recommended Standard 232
SCL	System Clock
SDA	System Data
TOMS	Total Ozone Mapping Spectrometer
UNAM	Universidad Nacional de Moquegua
UNMSM	Universidad Nacional Mayor de San Marcos
VRIP	Vicerrectorado de Investigación y Posgrado

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento al Lic. José Carlos Eche Llenque y Mg. Octavio Fashé Raymundo, por brindarme su apoyo y asesoría para lograr culminar este proyecto de instrumentación y a toda mi familia por darme su apoyo día a día. Además, quisiera agradecer a las siguientes instituciones e investigadores por todo su apoyo y recomendaciones:

A. Instituto Geofísico del Perú
   - Ing. Luis Fernando Suárez Salas
   - Dr. Rene Estevan Arredondo
   - Dra. Yamina Silva Vidal

B. Laboratorio Óptica no Lineal - UNMSM
   - Dr. Whualkuer Lozano Bartra

C. Grupo de Investigación Instrumentación Física y Aplicaciones – UNMSM
   - Dr. Galo Patiño Camargo

D. Grupo de Investigación en Ciencias de la Tierra, Clima y Medio Ambiente – UNMSM
   - Bach. Jean Carlos Pérez Vega
   - Bach. Eduardo Fernando Alvino Vílchez
   - Bach. Daniel Francisco Mamani Velarde

Este trabajo de tesis ha sido desarrollado en el marco del proyecto PCONFIGI 2021, titulado "Influencia de las propiedades ópticas de la atmosfera en los modelos de corrección atmosférica y calidad de productos satelitales", con código B21132191, aprobado y financiado por el VRIP-UNMSM con RR 05753-R-21.

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se propuso desarrollar y calibrar un fotómetro solar portátil de bajo costo para el estudio de aerosoles atmosféricos, con fines académicos y de investigación en la Facultad de Ciencias Físicas - UNMSM. Para tal propósito, se tomó como referencia instrumental los fotómetros Calitoo y CIMEL 318-T.

Se adopto un diseño de investigación mixto, enfocado en el estudio de los aerosoles del rango espectral visible, debido a la practicidad de los LEDs normales (un solo canal) y LEDs RGB (Blue: 450nm, Green: 455 nm, Red: 545 nm) como fotosensores. En la fase de construcción del instrumento se evalúo el funcionamiento y capacidad de los LEDs para recepcionar la radiación solar en rangos espectrales pequeños, permitiendo ser utilizados como un fotodiodo con un filtro óptico de bajo costo y se utilizó una placa ESP32 para procesar las señales recibidas por los LEDs.

El instrumento desarrollado fue calibrado mediante el Método Langley obteniendo coeficientes de correlación mayores a 0.94, dicha calibración se realizó en el Observatorio de Huancayo (12°02’18” S, 75°19’22” W y 3350 msnm) - Instituto Geofísico del Perú, en condiciones de un cielo despejado. Se logro obtener un instrumento que puede tomar cuatro medidas instantáneas en diferentes rangos de longitud de onda, con una sensibilidad de 0.0625mV en el rango de +/-2.048V, un ángulo de visión 0.76°, resolución de 16 bits, con un costo de construcción de $ 50 dólares y se logró verificar que es mejor utilizar LEDs de un solo canal como fotosensores que un LED RGB.

Palabras claves: LED inverso, aerosoles atmosféricos, fotómetro, ESP32.

ABSTRACT

In this thesis work, we proposed to develop and calibrate a low-cost portable sun photometer for the study of atmospheric aerosols, for academic and research purposes at the Facultad de Ciencias Físicas - UNMSM. For this purpose, the Calitoo and CIMEL 318-T photometers were used as instrumental reference.

A mixed research design was adopted, focused on the study of aerosols in the visible spectral range, due to the practicality of normal LEDs (single channel) and RGB LEDs (Blue: 450nm, Green: 455 nm, Red: 545 nm) as photosensors. In the construction phase of the instrument, the performance and capacity of the LEDs to receive solar radiation in small spectral ranges was evaluated, allowing them to be used as a photodiode with a low-cost optical filter, and an ESP32 board was used to process the signals received by the LEDs.

The developed instrument was calibrated using the Langley Method obtaining correlation coefficients greater than 0.94, such calibration was performed at the Huancayo Observatory (12°02'18" S, 75°19'22" W and 3350 msnm) - Geophysical Institute of Peru, under clear sky conditions. It was possible to obtain an instrument that can take four instantaneous measurements in different wavelength ranges, with a sensitivity of 0.0625mV in the range of +/-2.048V, a viewing angle of 0.76°, resolution of 16 bits, with a construction cost of $ 50 dollars and it was possible to verify that it is better to use single channel LEDs as photosensors than an RGB LED.

Key words: Inverse LED, atmospheric aerosols, photometer, ESP32.

Índice

DEDICATORIA ..... **I**

ABREVIATURA ..... **II**

AGRADECIMIENTOS ..... **III**

RESUMEN ..... **IV**

ABSTRACT ..... **V**

INDICE DE FIGURAS ..... **IX**

INDICE DE TABLAS ..... **XV**

INTRODUCCIÓN **1**

Antecedentes 1

Límites de la investigación 3

OBJETIVOS **4**

1. Objetivo general: 4
2. Objetivo específico: 4

Capítulo 1. Aerosoles **5**

Introducción 5

1.1 Fuentes de aerosoles atmosféricos 6

1.1.a. Fuente Extraterrestre 7

1.1.b. Fuente Marina 8

1.1.c. Fuente Mineral 8

1.1.d. Conversión de gas a partícula (GTP) 8

1.1.e. Fuente biológica 9

1.1.f. Fuente antrópica 9

1.2. Propiedades físicas de los aerosoles 9

1.3. Función de distribución del tamaño de los aerosoles 12

1.4. Propiedades ópticas de los aerosoles 13

1.4.1. Espesor óptico de aerosoles (AOT) 13

1.4.2. Determinación del Espesor óptico de aerosoles 14

1.4.3. Coeficiente de Angström 16

Capítulo 2. Instrumentación para el estudio de aerosoles atmosféricos 17

2.1. Red AERONET 17

2.2. Fotometría solar: Instrumentación y funcionamiento 18

2.2.1 Fotómetro solar automático: CIMEL-318 21

2.2.2 Fotómetro solar manual: CALITOO 25

2.2.3. Instrumentación del Calitoo Sun Photometer 30

2.3. Métodos de calibración 33

2.3.1. Método de Langley 34

2.3.2. Método de calibración de irradiancia en laboratorio 37

2.3.3. Calibración o Inter-calibración por comparación con un instrumento de referencia 38

Capítulo 3. Metodología 40

3.1. Método y alcances de la Investigación 40

3.1.1. Método de la Investigación 40

3.1.2. Método especifico de investigación 40

3.1.3. Alcance de la investigación 41

Capítulo 4. Desarrollo del Fotómetro solar manual de bajo costo 42

4.1. Componentes Electrónicos 46

4.2. Integración de componentes electrónicos 51

4.3. Diseño del Solar.P en 3D 53

4.3.1. Diseño para Placa electrónica N°1 53

4.3.2. Diseño para Placa electronica N° 2 55

4.4. Ensamblaje de la placa electrónica con la estructura 59

4.5. Desarrollo del algoritmo del Photometer 62

Capítulo 5. Desarrollo del Solar Tracker para el Calitoo 66

5.1 Diseño del instrumento en 3D 66

5.2. Componentes electrónicos y materiales 68

5.3. Esquema electrónico y armado del Solar Tracker 68

Capítulo 6. Prueba de laboratorio y campo 73

6.1. Calibración de los instrumentos en el laboratorio 73

6.1.1. Fotómetro Solar 73

6.1.2. Solar Tracker 80

6.2. Prueba de campo 81

Capítulo 7. Resultados 86

Conclusiones 93

Recomendaciones 95

Referencias bibliográficas 96

ANEXO 1..... CIII

ANEXO 2..... CIV

ANEXO 3..... CVII

ANEXO 4..... CVIII

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Modos de formación de nucleación, acumulación y condensación de los aerosoles. Fuente: Shettle, 2014. 11

Figura 1.2. Gráfico de la distribución de tamaño y procesos atmosféricos que afectan a los aerosoles atmosféricos. Fuente: Whitby et al., 1976. 11

Figura 2.1. Ubicación de los fotómetros solares en el mundo de la Red AERONET. Tomado de la página web de AERONET. Fuente: AERONET, s.f. 17

Figura 2.2. Clasificación de instrumentos o sistemas sensores según la procedencia de la señal o radiación. Fuente: Suarez, s.f. 19

Figura 2.3. Fotómetro solar CIMEL 318. Fuente: AERONET, s.f. 20

Figura 2.4. a) Fotómetro Calitoo. Fuente: Sun Photometer – Calitoo, s.f. b) Fotómetro MICROTOPS ll. Fuente: MICROTIPS II Sunphotometer, s.f. 20

Figura 2.5. Fotómetro solar-lunar-cielo multibanda CE318-T. Fuente: Complete system equipment details – AERONET, s.f. 22

Figura 2.6. Rueda de filtros ópticos modelo estándar, polarizada y SEAPRISM. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, 2017. 22

Figura 2.7. Ubicación del fotómetro CE318-T: Ciudad de Huancayo, Perú. Fuente: Estevan et al., 2019. 23

Figura 2.8. Fotómetro CIMEL CE-318T del IGP-Perú, en funcionamiento y realizando las medidas respectivas del 1 de diciembre del 2021. Fuente: Propia. 24

Figura 2.9. Fotómetro CIMEL 318-T realizando medidas de radiación solar directas, ubicado en la Universidad de Nacional de Moquegua. Fuente: Valdivia, 2022. 25

Figura 2.10. Personas realizando medidas con el fotómetro CALITOO. Fuente: Sun Photometer – Calitoo, s.f. 26

Figura 2.11. Después de tres días de medición, se obtuvo estabilidad en las constantes de calibración (Círculo rojo). Fuente: Bosch, s.f.. 26

Figura 2.12. Electrónica y sistema óptico para apuntar al sol del fotómetro solar desarrollado por Forrest Mims en 1989. Fuente: Brooks, 2010. 30

Figura 2.13. LED usado como un fotodiodo o fotosensor. Fuente: Dietz et al., 2003. 31

Figura 2.14. Emisión y detección de radiación con un Light Emitting Diode. Fuente: Dietz et al., 2003. 32

Figura 2.15. a. Esquema electrónico para un LED. b. Esquema para dos LEDs. Fuente: Brooks, 2010. 32

Figura 2.16. Placa electrónica para un fotómetro solar de dos canales. Fuente: Brooks, 2010. 33

Figura 2.17. Ejemplo del método Langley con datos recopilados en El Arenosillo - Red AERONET. Se muestra la recta resultante de ajuste para las longitudes de onda de 440 y 870 nm. Fuente: Toledano, 2005. 35

Figura 2.18. Calibrador Li-Cor 1800-02, se observa el interior del instrumento y la lampara halógena de cuarzo para la calibración correspondiente. Fuente: Vergaz, 2001. 38

Figura 4.1. LED RGB con cátodo común y ánodo común. Fuente: Zaragoza, 2018. 44

Figura 4.2. LED RGB con cátodo común y sus patas correspondientes a cada color (longitud de onda). Fuente: Zaragoza, 2018. 44

Figura 4.3. Esquema de funcionamiento de un colimador. Fuente: Propia. 45

Figura 4.4. Tubo colimador de 5 discos diseñado en Fusion360. Fuente: Propia. 45

.....46

Figura 4.5. Esquema para calcular el angulo (ϑ) del ingreso de la radiación solar directa. Fuente: Propia. 46

Figura 4.6. Tipos de entradas y salidas del ESP32 de 32 pines. Fuente: ESP32, módulo ESP32-WROOM GPIO Pinout, 2022. 47

Figura 4.7. Medidas de la estructura de un LED RGB con cátodo común. Fuente: Shenzhen2u, 2022. 48

Figura 4.8. Ubicación de los tres LEDs encapsulados en el LED RGB. Fuente: Fernandez, 2022. 49

Figura 4.9. Sensor BMP280. Fuente: Sensores, s.f. 49

Figura 4.10. Modulo ADC ADS1115. Fuente: Sensores, s.f. 50

Figura 4.11. Amplificador instrumental – Modulo AD620. Fuente: Sensores, s.f. 50

Figura 4.12. Esquema electrónico de la placa N° 1, con un sensor BMP 280 y ADS1115, utilizando como fotosensor un LED RGB. Fuente: Propia. 51

Figura 4.13. Esquema electrónico de la placa N°2, con un ADS1115, un BMP280, cuatro AD620 y cuatros LEDs de diferentes rangos de longitud de onda. Fuente: Propia. 52

Figura 4.14. Piezas diseñadas en Fusion360 para la placa N°1. A) Tronco-colimador 5mm de diámetro del hueco de los discos internos. B) Tapa trasera del tronco principal. C) Tapa delantera del colimador. D) Tronco principal para contener la placa electrónica. Fuente: Propia. 53

Figura 4.15. Estructura del fotómetro solar desarrollado para la placa N°1, con un LED RGB y un colimador de 5mm. Fuente: Propia. 54

Figura 4.16. Piezas exportadas a Ultimaker Cura para obtener el archivo “PLN1. STL”. Fuente: Propia. 54

Figura 4.17. Estructura del fotómetro desarrollado para la placa N°2. Fuente: Propia. 55

Figura 4.18. Fotometro desarrollado en piezas. A) Colimador de 15 cm. B) Portador de cuatro LEDs. C) Tapa para sellar completamente el instrumento. D) Sistema óptico para indicar al sol y obtener información sobre donde apuntar. Fuente: Propia. 55

Figura 4.19. Caja para contener la placa N°2 del fotómetro desarrollado. Fuente: Sensores, s.f. 56

Figura 4.20. Impresora FDM 3D - Modelo CREALITY CR-5 PRO H. Fuente: Propia. 57

Figura 4.21. Estructuras impresas en material ASA para la placa N°1 y placa N°2. Fuente: Propia. 58

Figura 4.22. Piezas del fotómetro solar para la placa N°1. Fuente: Propia. 59

Figura 4.23. Fotómetro solar desarrollado con la placa N° 1, con un LED RGB como fotosensor. Fuente: Propia. 60

Figura 4.24. Fotometro desarrollado con la placa electronica N°2, con diametro interno del disco de 5 mm. En la caja de aluminio se tiene toda la electronica a excepcion de los fotosensores (cuatro LEDs). Fuente: Propia. 61

Figura 4.23. Fotómetro desarrollado con la placa electrónica N°2, con diámetro interno del disco de 1 mm y 4 LEDs. Fuente Propia. 61

Figura 4.25. Escaneando las direcciónes I2C de los módulos conectados al ESP32. Se visualiza mediante el monitor serial. Fuente: Propia. 63

Figura 4.26. Monitor serie cuando se recién se inicia el algoritmo o se ingresó el numero “0”. Fuente: Propia. 64

Figura 4.27. Se ingreso al monitor serie el numero “1”, evidenciándose los máximos voltajes detectados de cada longitud de onda. Fuente: Propia. 65

Figura 5.1. Primer esquema del Solar Tracker para el Calitoo. Fuente: Propia. 66

Figura 5.2. Piezas del Solar Traker. Fuente: Propia. 67

Figura 5.3. Pieza con mira de 10 cm para que se acople a la estructura del Calitoo. Fuente: Propia. 67

Figura 5.4. Pieza impresa en 3D, acoplándose a la parte delantera del Calitoo. Fuente: Propia. 68

Figura 5.5. Esquema electronico del Solar Tracker. Fuente: Propia. 69

Figura 5.6. Posición correcta de las fotorresistencias y pines del instrumento. Fuente: Propio. 70

Figura 5.7. Líneas del algoritmo de prueba a copiar y reemplazar en el algoritmo principal. Fuente: Propia. 71

Figura 5.8. El fotómetro solar Calitoo acoplado en el Solar Tracker desarrollado, realizando medidas. Fuente: Propia. 71

Figura 5.9. Instrumento Solar Tracker completo para el acople con el fotometro solar Calitoo. Fuente: Propia. 72

Figura 6.1. Fotómetro solar recibiendo radiación solar directa. Se traza pequeños circulos indicando el centro donde incidio la radiación directa del valor maximo registrado. Fuente: Propia. 73

Figura 6.2. Esquema para realizar la toma del espectro de recepción de cada LED. Fuente: Propia. 74

Figura 6.3. Instalación de la tapa (1) con el LED en la salida (2) del haz de luz monocromada. Fuente: Propia.....75

Figura 6.4. Registro de la radiación incidente en unidades de milivoltios y su longitud de onda para cada LED (Blue, Green y Red). Fuente: Propia.....75

Figura 6.6. Verificación de las lecturas en milivoltios y ruido de una a otra lectura de la placa electrónica N°2, utilizando como sensor un LED RGB. Fuente: Propia. 78

Figura 6.7. Prueba de lectura de voltaje de la placa electrónica N°2 utilizando como sensor 3 LEDs e incidiendo una radiación en su espectro visible correspondiente. Fuente: Propia. 79

Figura 6.8. Solar Tracker más el Calitoo, apuntando a la fuente de luz con mayor intensidad del laboratorio ubicada en la parte superior (techo). Fuente: Propia.....80

Figura 6.9. Toma de datos con los fotómetros desarrollados (1.), Calitoo (2.) y recopilación de datos del CIMEL -CE318T (3.). Fuente: Propia. 81

Figura 6.10. Toma de datos de los 2 fotometros desarrollados y los Calitoo al mismo tiempo. Fuente: Propia.....82

Figura 6.11. Promaga utilizado para obtener el angulo zenit de un dia, hora y coordenadas. Fuente: SunEarthTools, 2022.....82

Figura 7.1. Espectro de Recepción del LED RGB. Fuente: Propia. 86

Figura 7.2. Filtro pasa bajo en funcionamiento y otros métodos de filtrados (promedios, etc.). Fuente: Propia.....87

Figura 7.3. Influencia de la señal recibida por el LED azul en los otros rangos de longitud de onda del LED RGB. Fuente: Propia.....88

Figura 7.4. Influencia de la señal recibida por el LED azul (un canal) en los otros LEDs de un canal. Fuente: Propia. 88

Figura 7.5. Grafica de Ln(Voltaje medido) vs Masa de aire del fotometro desarrollado N°1. Fuente Propia.....89

Figura 7.6. Grafica de Ln(Voltaje medido) vs Masa de aire del Photometer desarrollado N°2. Fuente Propia.....90

Figura 7.7. Hora de la medida realizada vs AOD de las longitudes de onda de 465 nm, 540 nm y 619nm del Calitoo #395. Fuente: Propia. 90

Figura 7.8. Hora de la medida realizada vs AOD de las longitudes de onda de 465 nm, 540 nm y 619nm del Calitoo #394. Fuente: Propia. 91

Figura 7.9. Hora de la medida realizada vs AOD de las longitudes de onda de 465 nm, 540 nm y 619nm del Calitoo #394 y se observa la grafica del exponente de Angstrom (465 – 615 nm) Fuente: Propia.....91

Figura 7.10. Grafica del AOD vs la hora que la medida fue tomada del día 19 de agosto por el Fotómetro CIMEL de Huancayo. Fuente: National Aeronautics and Space Administration...92

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tipos de fuentes de aerosoles atmosféricos. Fuente: Vargas, 2009. 7

Tabla 1.2. Tiempo de vida media para material particulado desértico respecto al rango de radios y deposición húmeda. Fuente: Seinfeld, 2006. 12

Tabla 1.3. División del rango de tamaño de aerosol en 12 categorías. Fuente: Seinfeld, 2006. ... 12

Tabla 1.4. Coeficientes de dispersión o absorción beneficiosos para seis longitudes de onda para el estudio de aerosoles atmosféricos, $O3$ y $NO2$. Fuente: Russell et al., 1993. 15

Tabla 4.1. Descomposición del diseño y construcción del instrumento fotométrico SOLAR.P. Fuente: Propia. 42

Tabla 4.2. Características de las placas electrónicas ESP32 y Arduino Uno. Fuente: Propia. 43

Tabla 4.1. Relación del diámetro con el ángulo de ingreso de la radiación solar directa, con un colimador de 10 cm. Fuente: Propia. 56

Tabla 4.2. Relación del diámetro con el ángulo de ingreso de la radiación solar directa, con un colimador de 15 cm. Fuente: Propia. 56

Tabla 6.1. Datos registrados en milivoltios de la radiación incidente en diferentes longitudes de onda para medir el espectro de recepción de un LED RGB. Fuente: Propia. 76

Tabla 6.2. Datos obtenidos por el fotómetro solar desarrollado N#1 en unidades de milivoltios. Fuente: Propia. 83

Tabla 6.3. Datos obtenidos por el fotómetro solar desarrollado N#2 en unidades de milivoltios. Fuente: Propia. 83

Tabla 6.4. Mediciones obtenidas por el Calitoo #395, con un nivel de datos 1.5. Fuente: Propia. 84

Tabla 6.5. Mediciones obtenidas por el Calitoo #394, con un nivel de datos 1.5. Fuente: Propia. 84

Tabla 6.6. Datos del AOD (longitud de onda: 675 nm, 500 nm, 440nm) obtenidos de AERONET del fotómetro CIMEL del ubicado en Huancayo. Fuente: National Aeronautics and Space Administration, 2022. 85

Tabla 7.1. Datos obtenidos de las figuras 7.5. y 7.6. Fuente: Propia. 89

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las investigaciones sobre los aerosoles atmosféricos en el Perú se ven limitadas por la falta de instrumentos científicos para su estudio. Esto se debe principalmente a que los instrumentos para medir la radiación directa del sol tienen precios muy elevados, haciendo difícil su adquisición. En el Perú hoy por hoy solo existen dos fotómetros CIMEL pertenecientes a la red de AERONET -NASA, el primero y más antiguo, fue instalado en el Observatorio de Huancayo a cargo del Instituto Geofísico del Perú (IGP) en marzo del 2015 (Estevan et al., 2019). El segundo fotómetro solar fue instalado en enero del 2022 y ubicado en la Universidad Nacional de Moquegua (UNAM), quedando a cargo del Instituto de Investigación para el desarrollo del Perú (IINDEP) – UNAM (Valdivia, 2022). Ambos fotómetros antes mencionados se encuentran funcionando y pertenecen a la Red de AERONET (Aerosol Robotic Network) a cargo de la NASA. Sin embargo, estos fotómetros se encuentran ubicados en el centro y sur del país, dejando totalmente sin estudiar la zona norte (Amazonia) del Perú.

El estudio de los aerosoles atmosféricos es importante porque las partículas atmosféricas suspendidas en la atmósfera pueden llegar a afectar gravemente la salud de los humanos, la agricultura y el clima (aumentando el efecto invernadero).

Antecedentes

En el primer estudio realizado en la región de América del Sur sobre los aerosoles, se realizó en el noroeste de la provincia de Buenos Aires – Argentina, en el cual se consideró un año de mediciones manuales, hechas con un fotómetro CALITOO, se llegó a detectar y categorizar aerosoles en grupos de continental limpio y promedio, gracias a la longitud de onda del color azul (465 nm). Los datos obtenidos por el CALITOO, son equivalentes a un nivel 1.0 y con unidades de error inferior a 0.02 unidades de Aerosol Optical Depth (AOD) (Scagliotti & Jorge, 2020).

Seetasang & Kaneta (2019), desarrollaron un fotómetro sencillo, barato y pequeño para el estudio de niveles de tiocianato en la saliva de las personas utilizando un par de diodos emisores de luz (LED). Este fotómetro se basó principalmente en detectores emparejados (PEDDS), diodos emisores y un amplificador operacional. Se encontró que el fotómetro

presento un excelente rendimiento de linealidad, un coeficiente de correlación $r^2 > 0.999$, una desviación estándar del 1% y un precio de construcción menor a cien dólares.

En el Departamento de Química Fundamental de la Universidad Federal de Pernambuco, se construyó un fotómetro para el estudio de contenidos de biodiésel y aceite vegetal, se usaron 7 pares de LEDs/IF, lentes para concentrar la radiación emitida por los LEDs y un fotodiodo detector. Se concluyo que el rendimiento alcanzado por el instrumento desarrollado alcanzo los estándares recomendados por la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (Paiva et al., 2019).

Estevan et al. (2019), dan a conocer los resultados de los primeros dos años y medio de mediciones del fotómetro solar ubicado en el Observatorio de Huancayo, Perú. Se logro obtener la clasificación de 6 subtipos de aerosoles, hubo un predominio ligero de los aerosoles de modo fino y se llegó a detectar en mayor cantidad los aerosoles de tipo continental y de biomasa.

Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, desarrollaron una nota técnica de instalación del fotómetro CIMEL, donde se detalla en la nota a precisión como está construido y funciona un fotómetro CIMEL (Servicio Meteorológico Nacional, 2017).

En la calibración de equipos fotométricos existen diferentes métodos. La calibración de irradiancia en laboratorio, se basa en la utilización de lámparas estándar de la cual se conoce su irradiancia. La calibración por el método de Langley, se enfoca en la Ley de Beer – Bouguer – Lambert, basándose en medidas de radiación directa del sol en un intervalo de tiempo. Además, existen otros métodos como el método de Langley pesado y KCICLO. Para mejorar la calibración se recomienda que el lugar donde se desarrolle se encuentre en una gran altura y se realice la calibración por un conjunto de días (Toledano, 2006).

Límites de la investigación

Este trabajo de investigación se limita a los siguientes puntos:

1. Desarrollar un fotómetro solar manual de bajo costo, que posea una resolución de 16 bits, 4 longitudes de onda y calibrarlo mediante el método Langley.
2. Validar las medidas tomadas por el instrumento desarrollado y compararlas con las del Calitoo y CIMEL -CE 318T.
3. Recolectar información sobre la instrumentación científica utilizada en los fotómetros solares CIMEL -CE 318T y Calitoo.
4. Complementar la base teórica de los aerosoles atmosféricos del trabajo de investigación de Thonny Mota desarrollado en el 2021.

OBJETIVOS

1. Objetivo general:

- Diseñar y desarrollar un fotómetro solar manual de manera sencilla, fácil y viable, el cual pueda ser construido y aplicado por otras universidades del Perú y ser utilizado en la enseñanza e investigación de los aerosoles atmosféricos.

2. Objetivo específico:

- Desarrollar un fotómetro solar manual de bajo costo que permita visualizar la información en un dispositivo smartphone, tablet o laptop.
- Desarrollar un sistema tracking para facilitar la toma de datos continua con el fotómetro solar Calitoo y el desarrollado en la presente investigación.
- Contrastar los datos obtenidos con otras fuentes calibradas (Calitoo y CIMEL-IGP).
- Formular el método de Langley para la calibración del instrumento.

Capítulo 1. Aerosoles

Introducción

Los aerosoles pueden ser definidos como una agrupación de partículas líquidas y sólidas suspendidas en la atmosfera terrestre, manteniéndose suficiente tiempo como para permitir observar y medir sus efectos sobre la atmosfera (Willeke & Baron, 1993).

Los aerosoles también son conocidos como material particulado (PM) o partículas suspendidas en el aire, siendo componentes de la niebla de humo y la contaminación del aire (USEPA, 2003). Además, los aerosoles pueden ser clasificados respecto a diferentes variedades debido a su complejidad, como:

1. Fuentes
2. Tamaños
3. Propiedades Ópticas
4. Composición química
5. Regiones de la atmosfera
6. Efectos (directos e indirectos)
7. Tiempo de vida
8. Distribución Espacio – Temporal, etc.

Respecto a su rango de tamaños se divide en tres zonas, siendo r el radio aproximado de las partículas esféricas, se tiene que las partículas con $r < 0.1$ um tienen como nombre Núcleos de Aitken, las partículas grandes son las que se encuentran entre $0.1 < r < 1.0$ um y las partículas gigantes tienen un $r > 1.0$ um (Díaz–Ramírez, 1999).

Las partículas suspendidas en la atmosfera tienen dos tipos de origen, pueden ser de origen natural como las cenizas emitidas por las erupciones volcánicas, polvo de los desiertos, partículas marinas por el movimiento de las olas y aire. Las partículas de origen antropogénico son las cenizas emitidas por los incendios forestales ocasionados por el hombre, emisiones de gases de los vehículos o fabrica, etc. Estas partículas comúnmente son eliminadas de la atmosfera mediante distintos procesos como la condensación, sedimentación, coagulación, precipitación, etc. Además, el material particulado tiene diferente tiempo de vida en la atmósfera oscilando desde minutos, semanas en la troposfera, o incluso llegar a años si estas

partículas se ubican o alcanzan la estratósfera (las erupciones volcánicas es un fenómeno común que acaba emitiendo partículas que alcanzan la estratósfera), esto se debe a que los procesos de eliminación como la precipitación o condensación no se pueden producir en la alta atmósfera (Esteve, 2011).

Los aerosoles son importantes en la atmósfera debido a que interaccionan de forma indirecta y directa con la radiación del sol y terrestre, influyendo en el balance radiativo de la Tierra - Atmósfera. De forma indirecta, el material particulado actúa como núcleos de condensación (CCN) en la formación de nubes, produciendo un aumento en la reflectividad de las nubes. De forma directa, el material particulado dispersa y absorbe la radiación que llega del Sol hacia la tierra en el momento de atravesar la atmósfera. La influencia que ejerce los aerosoles sobre el balance radiativo de la Tierra-Atmósfera tiene como nombre forzamiento radiativo de los aerosoles, y su efecto puede ser similar pero negativo al forzamiento radiativo a causa de los gases de efecto invernadero (Climate Change 2022 - Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2022).

1.1 Fuentes de aerosoles atmosféricos

Los aerosoles comúnmente se originan mediante dos procesos, siendo estas la dispersión de material sólido y la desintegración. El primer proceso consiste en la modificación de las sustancias o partículas en suspensión en la atmosfera, de manera que se produzcan nuevas partículas a partir de las anteriores. El segundo proceso se debe principalmente a la erosión del material de la corteza, desintegración y dispersión de sal marina o de biomasa. Los procesos antes mencionados, son conversiones de gas a partículas de las cuales se originan en especies gaseosas condensables y en la evaporación de gotitas de las nubes y otros elementos, dejando nuevas partículas de aerosoles (Vargas, 2009). En la tabla 2.1 se observa las principales fuentes que producen PM o aerosoles atmosféricos.

Tabla 1.1. Tipos de fuentes de aerosoles atmosféricos. Fuente: Vargas, 2009.

Fuente de aerosoles	Tipo de partícula generada
Extraterrestres	Polvo meteórico
Marina	Sal de mar Biológico (Sulfuro de di-metil) Compuestos orgánicos secundarios
Mineral	Polvo mineral del desierto Polvo mineral no desértico
Conversión gas a partícula (gtp)	Sulfatos Nitratos Orgánicos secundarios
Volcánica	Ceniza volcánica Sulfuros
Biológica	Partículas orgánicas de la quema de vegetación Orgánicos primarios
Antrópica	Sulfuros Nitratos Orgánicos primarios Orgánicos secundarios Ceniza Polvo mineral

1.1.a. Fuente Extraterrestre

Estas partículas provienen de pequeños meteoritos o también del polvo interplanetario que está presente en el sistema solar limitado hasta la órbita de Júpiter, las partículas originadas por esta fuente pueden llegar a penetrar la atmosfera con mayor probabilidad a través de los polos (guiadas por el campo magnético terrestre), además se encuentran en mayor cantidad en regiones próximas a los polos.

Su composición se encuentra fundamentalmente entre los elementos de magnesio, silicio, hierro, azufre, calcio, argón, níquel, cloro, cromo, manganeso, potasio, titanio o cobalto (Cameron, 1981). Su efecto es prácticamente despreciable a nivel climático y su aportación total a los aerosoles existentes es muy pequeña, casi el 1%.

1.1.b. Fuente Marina

Esta fuente contribuye con la mayor cantidad de aerosoles descubiertos en la atmósfera, produciéndose en las superficies de los océanos y mares que desprenden burbujas por la lluvia y vientos (olas), burbujas que en condiciones superiores a un 98% de humedad pueden llegar a suspenderse en la atmosfera (Blanchard, 1980). En condiciones entre 10% y un 74% de humedad se puede obtener sal saturada, y si se produce un cambio de fase, posiblemente pueda terminar en aerosoles compuestos por NaCl o $2(NH_4)_2SO_4$.

Las partículas originadas por una fuente marina, tienen un rango de tamaño entre 0.001 y 100 um, siendo la principal las partículas de sal, la segunda los sulfuros de dimetilo (CH_3, SCH_3) y la tercera los compuestos orgánicos secundarios, siendo de carácter trimodal su distribución de tamaños. Estos aerosoles se sitúan principalmente en la troposfera (los 2 primeros kilómetros de altitud).

1.1.c. Fuente Mineral

Una tercia parte de toda la superficie continental del planeta es prácticamente un desierto o está árida. Las fuentes minerales están formadas por zonas continentales como los desiertos, donde existe agentes meteorológicos (el viento siendo la causa principal) que son capaces de dispersar y degradar los materiales que los compone. Estos aerosoles son capaces de llegar a la capa de la alta troposfera e incluso la estratosfera, e iniciar un viaje a otros continentes o latitudes, todo se da mediante el mecanismo de convección y circulación atmosférica. El desierto del Sahara es una de las más grandes fuentes de aerosoles minerales, estos aerosoles pueden llegar a cruzar todo el Atlántico Norte Subtropical y alcanzar las costas americanas. Estas partículas aportan nutrientes (K^+, NO^-_3, NH_4^+, PO^{3-}_4) a la Amazonia y al océano pacifico.

El rango de tamaño que se encuentra en estas partículas es de 0.02 a 100um (Jaenicke, 1983), las partículas entre 0.1 y 5um son las que duran un mayor tiempo en la atmosfera, siendo capaces de viajar hasta 5000 kilómetros antes de precipitar.

1.1.d. Conversión de gas a partícula (GTP)

Esta fuente es la segunda que más emite aerosoles a la atmosfera y tiene su comienzo en las reacciones químicas entre diferentes sustancias. La mayor parte de estos aerosoles provienen

de las erupciones volcánicas y la flora marina. Solo los procesos volcánicos y erupciones generan alrededor del 10% al 20% de las partículas atmosféricas de esta fuente. Los volcanes expulsan grandes cantidades de partículas de polvo y cenizas compuestos de diferentes elementos como: Fe_2O_3, SiO_2 , Al_2O_3 y también como gases reactivos como H_2S, HCl, SO_2, etc., dicho compuestos mediante procesos de conversión de gas a partículas terminaran generando nuevo material particulado. Este material particulado se encuentran suspendidos en la atmosfera entre cuatro a quince días comúnmente (Vargas, 2009). Además, existen otros orígenes naturales como los procesos originados por seres vivos marinos como el plancton y las algas, pero también por emisiones biológicas terrestres comúnmente en estaciones húmedas).

1.1.e. Fuente biológica

En su mayoría esta fuente se origina de las quemas de bosques de origen natural, donde se produce compuestos orgánicos como las parafinas de cadena directa (n-alcanos) y ácidos grasos de cadena directa (ácidos carboxílicos), pero también otros productos producidos por la quema de la masa forestal como las cenizas (Vargas,2009).

1.1.f. Fuente antrópica

La fuente antrópica se origina de forma directa e indirecta por la acción o intervención del hombre, como por sus industrias, la combustión de los derivados del petróleo (orgánicos primarios y secundarios), sulfuros y nitratos. Estas emisiones se transforman en NCN bajo la conversión GTP, lo cual aumentara el número de partículas sobre las que se pueden depositar el agua precipitable, ocasionando una ausencia o disminución de precipitaciones.

1.2. Propiedades físicas de los aerosoles

Las propiedades microfísicas de los aerosoles se puede modelar con algo de facilidad cuando se considera que tienen forma esférica. Además, las partículas sólidas con un radio mayor a 0.5 um no posee una forma esférica, en la mayoría estas presentan diversas formas que dificulta la estimación de sus dimensiones, por tal motivo, para estas partículas se usan factores como “diámetro aerodinámico equivalente”, en el cual se considera que la densidad de la partícula es igual a uno y posee la misma velocidad de sedimentación. En la teoría de

scattering de luz para partículas atmosféricas se considera a las partículas esféricas y químicamente homogéneas (Mie, 1908). Las partículas sólidas llegan a la atmosfera mediante procesos antropogénicos y/o naturales, siendo de carácter importante la composición química de las partículas, pues de ella depende el índice de refracción, la densidad y otras propiedades físicas y microfísicas (Alegría, 2015).

Características físicas de los aerosoles atmosféricos que los definen:

1. Las dimensiones de los aerosoles que pueden encontrarse de centésimas hasta algunas decenas de micras, ocasionando que se fraccionen en grupos con propiedades químicas y ópticas variadas, se pueden agrupar en aerosoles de tipo fino, siendo que su diámetro se encuentra entre $0.1\ a\ 1.0\ \mu m$ el cual es inferior de tamaño a la frontera de la partícula, y de tipo grueso mayor al $1.0\ \mu m$.
2. Los aerosoles de tipo grueso poseen un diámetro mayor a $1.0\ \mu m$ y tienen menor actividad ópticamente y provienen de sales marinas, cenizas, polvos, etc. Estas partículas son eliminadas por la atmosfera mediante la deposición (tanto seca como humedad) y por la colisión de obstáculos, pero también por el lavado atmosférico (gotas de lluvias) o las nubes.
3. Los aerosoles con diámetros mayores a $10\ \mu m$ poseen un tiempo de vida muy reducido en el aire.

Además, clásicamente se ha dividido los aerosoles en modo fino y grueso, pero el modo fino se divide en dos categorías, el modo ultra fino y el modo de acumulación. Entonces tenemos:

Modo ultra fino (Nucleación y núcleos Aitken): Son partículas que poseen un radio entre $0.001\ \mu m\ y\ 0.1 \mu m$, comúnmente en un $0.05\ \mu m$. Están formados por partículas producidas por mecanismos de nucleación, condensación y conversión gas-partícula. La masa de estos aerosoles se desprecia debido a su pequeño tamaño, pero estos aerosoles funcionan como núcleos de condensación, ayudando a la formación de nubes.

Modo de acumulación: También conocidas como modo fino, son los aerosoles con un radio entre $0.1\ \mu m$ y $1.0\ \mu m$ y su permanencia en la atmosfera es mayor, además su área superficial es mayor y acaba produciendo un daño mayor en la salud del hombre.

Modo grueso (o coarse): Tiene un radio mayor a $1.0\ \mu m$ y menor a $100\ \mu m$, existen muy pocas partículas de este tamaño, cuyo origen es tanto antropogénico como natural. La atmosfera elimina estas partículas mediante el efecto de la gravedad o sedimentación.

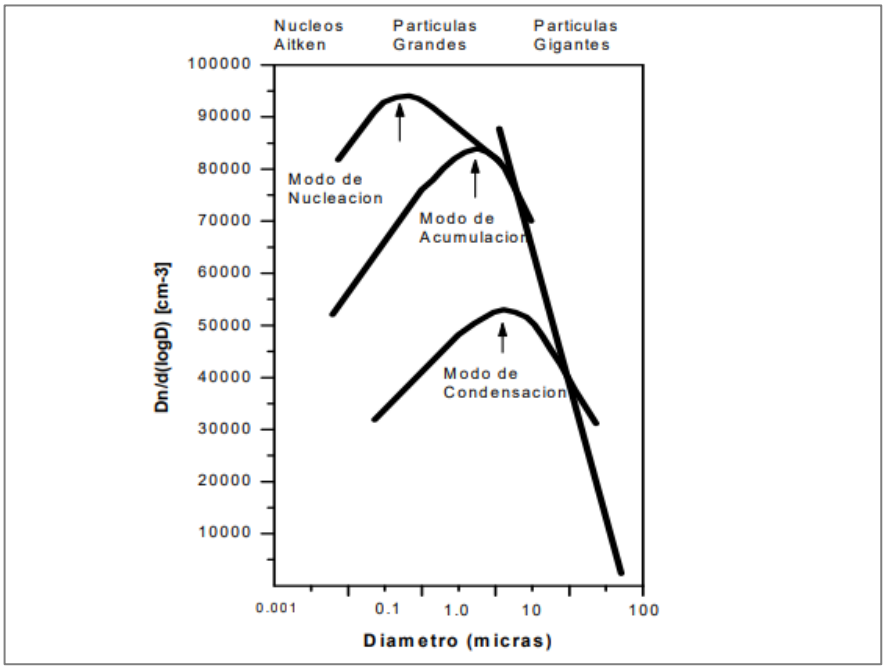


Figura 1.1. Modos de formación de nucleación, acumulación y condensación de los aerosoles. Fuente: Shettle, 2014.

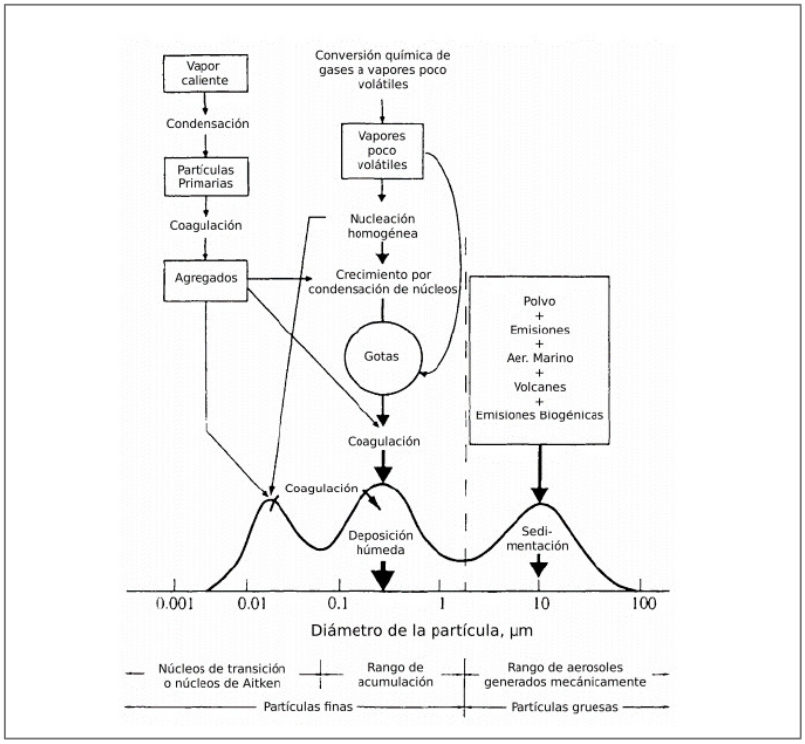


Figura 1.2. Gráfico de la distribución de tamaño y procesos atmosféricos que afectan a los aerosoles atmosféricos. Fuente: Whitby et al., 1976.

1.3. Función de distribución del tamaño de los aerosoles

Las partículas atmosféricas poseen diámetros que abarcan desde pequeñas cantidades como nanómetros hasta alrededor de 100 um. Las partículas producidas por la combustión de los motores en automóviles y fábricas, alcanzan a ser muy pequeñas del tamaño de unos nanómetros y tan grandes como 1 um. El polvo arrastrado del desierto del Sahara, fragmentos de plantas y sal marina, consiguen ser más grande que 1 um (Seinfeld, 2006). El tamaño de las partículas atmosféricas afecta notablemente en su tiempo de vida y en sus propiedades químicas y físicas. Por consiguiente, es preciso desarrollar un método de distribución de tamaño de aerosoles. Una forma consta de contar el numero entero de moléculas o monómeros que contiene la partícula. Una descripción completa de la distribución de tamaño de los aerosoles, puede contener una contabilidad del tamaño de cada partícula dividiendo el rango de tamaño de partículas en intervalos discretos y la cuantificación del número de partículas respectivamente a cada intervalo de tamaño. En la Tabla 1.2 se observa una distribución del tamaño de aerosol utilizando doce intervalos de tamaño (Seinfeld, 2006).

Rango de radios (μm)	deposición húmeda (días)	deposición seca
$0{,}01 < r < 1$	14	275 días
$1 < r < 10$	14	62 horas
$10 < r < 25$	14	4 horas
$r > 25$	14	1 hora

Tabla 1.2. Tiempo de vida media para material particulado desértico respecto al rango de radios y deposición húmeda. Fuente: Seinfeld, 2006.

Rango de tamaño μm	Concentración cm^{-3}	Cumulativo cm^{-3}	Concentración $\mu m^{-1}\ cm^{-3}$
0.001-0.01	100	100	11,111
0.01-0.02	200	300	20,000
0.02-0.03	30	330	3,000
0.03-0.04	20	350	2,000
0.04-0.08	40	390	1,000
0.08-0.16	60	450	750
0.16-0.32	200	650	1,250
0.32-0.64	180	830	563
0.64-1.25	60	890	98
1.25-2.5	20	910	16
2.5-5.0	5	915	2
5.0-10.0	1	916	0,2

Tabla 1.3. División del rango de tamaño de aerosol en 12 categorías. Fuente: Seinfeld, 2006.

1.4. Propiedades ópticas de los aerosoles

1.4.1. Espesor óptico de aerosoles (AOT)

Es una de las principales propiedades ópticas para estudiar los aerosoles atmosféricos. Esta propiedad puede ser media mediante los fotómetros solares ubicados en la superficie terrestre (medidas in situ) y en los satélites que orbitan el planeta (medidas ex situ). Estos instrumentos miden la radiación proveniente del sol, que pasa por nuestra atmosfera siendo atenuada por diferentes partículas suspendidas y en diferentes longitudes de onda.

Para definir el AOT, se debe de iniciar por la ecuación del Ley de Lambert – Beer – Bouguer (Mota Peña, 2021), siendo la siguiente:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left(-\sum_i^n \tau_\lambda^i m_i\right) \tag{1.1}$$

Donde:

$I(\lambda)$ *intensidad solar incidente.*

$I_0(\lambda)$ *intensidad solar incidente base o inicial.*

τ_λ^i *espesor óptico mediante la absorción y dispersión de diferentes partículas.*

m_i *masa optica de aire de diferentes partículas.*

La ecuación 1.1 se reescribirá en función de los espesores ópticos de dispersión (scattering de Mie y Rayleigh) y absorción en medida del lugar, obteniendo:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left(-\sum_{i=1}^n \tau_\lambda^{abs,i} m_{abs}^i + \tau_\lambda^{sca,R} m_R + \tau_\lambda^{sca,M} m_M\right) \tag{1.2}$$

Donde:

$\tau_\lambda^{sca,R}$ *espesor óptico de la dispersión de Rayleigh en diferentes particulas.*

$\tau_\lambda^{abs,i}$ *espesor óptico por la absorción de diferentes gases.*

m_R *masa óptica de aire por la dispersión de Rayleigh.*

m_M *masa óptica de aire por la dispersión de Mie.*

m_{abs}^i *masa óptica de aire por la absorción de diferentes gases.*

Para lograr obtener el espesor óptico de aerosoles necesitamos antes los valores de los parámetros $I_0(\lambda), I(\lambda), \tau_\lambda^{sca,R}, \tau_\lambda^{abs,i}, m_R, m_M \; y \; m_{abs}^i$, una vez obtenidos todos estos parámetros, se podrá calcular el espesor óptico de aerosoles ($\tau_\lambda^{sca,M}$). El espesor óptico de aerosoles se puede calcular mediante, el espesor óptico total (τ) menos la suma del espesor óptico por la absorción de diferentes gases y el espesor óptico ocasionado por la dispersión de Rayleigh, como la siguiente ecuación.

$$\tau_\lambda^{sca,M} = \tau - \tau_\lambda^{abs,i} - \tau_\lambda^{sca,R} \tag{1.3}$$

El AOT es un parámetro de alta importancia para el estudio de las partículas suspendidas en la atmosfera, este sirve para señalar el índice de turbidez atmosférico verticalmente y mediante un algoritmo de inversión se puede adquirir la distribución de tamaños de las partículas.

1.4.2. Determinación del Espesor óptico de aerosoles

Linke y Angstrom en 1920, desarrollaron diferentes métodos de observación para determinar la cantidad polvo de la atmósfera o también conocida como turbidez, derivándose de la intensidad solar directa en una longitud de onda medida desde el suelo. Comúnmente se utilizan longitudes de onda del espectro visible para despreciar la absorción del vapor de agua y el ozono (es pequeño a comparación del vapor de agua).

De la ecuación (1.2) y (1.3), se obtiene la siguiente ecuación para calcular el espesor óptico de aerosoles, tomando en cuenta las correcciones de la distancia sol-tierra.

$$\tau_a(\lambda) = \frac{[\ln\left(I_0(\lambda) * \frac{r_0^2}{r^2}\right) - \ln\, I(\lambda)]}{m(\theta)} - [\tau_R(\lambda) + \tau_3(\lambda) + \tau_2(\lambda)] \tag{1.4}$$

En la determinación del AOT, las propiedades ópticas asociadas a las moléculas de O3 y NO2 se calculan mediante los siguientes parámetros:

$$\tau_R(\lambda) = (a \; + \; bH) * \lambda^{-\left(c + d\lambda + \frac{e}{\lambda}\right)} * \frac{p}{p_s},$$

$$\tau_2(\lambda) = k_2(\lambda) C(NO_2) \tag{1.5}$$

$$\tau_3(\lambda) = k_3(\lambda) C(O_3)$$

Donde los coeficientes empíricos de la dispersión Rayleigh son:

$$a = 0.00864,\ \ b = 6.5 * 10^{-6},\ \ c = 3.916,\ \ d = 0.074,\ \ e = 0.050$$

H es la altura del fotómetro o radiómetro en kilómetros; p_s es 1013.25 mb, p es la presión atmosférica del fotómetro.

La masa óptica de aire ($m(\theta)$) es 1 cuando el sol se encuentra en lo más alto (Zenit) en el medio día y se puede calcular las siguientes ecuaciones:

$$m(\theta) = \frac{1}{sen(\theta)} = \frac{1}{sen(\beta)} \tag{1.6}$$

$$m(\theta) = \frac{1.002432 * cos^2(\theta) + 0.148386 * \cos(\theta) + 0.0096467}{cos^3(\theta) + 0.149864 * cos^2(\theta) + 0.0102963 * \cos(\theta) + 0.000303978} \tag{1.7}$$

siendo θ es el ángulo cenital (ángulo entre el cenit y el sol) y β ángulo de elevación (ángulo que se crea con el sol y el horizonte).

Los coeficientes de absorción $k_2\ y\ k_3$ son para $NO_2\ y\ O_3$, respectivamente; y $C(NO_2) \cong 4 * 10^{15} cm^{-2}$ denota la concentración de NO_2. La tabla 1.4 muestra valores de 6 longitudes de onda empleadas para las mediciones de los aerosoles atmosféricos (Russell et al., 1993).

$\lambda(\mu m)$	0.382	0.451	0.526	0.778	0.861	1.060
k_R	0.4407	0.2198	0.1175	0.0240	0.0159	0.00069
k_3 (atm − cm^{-1})	—	0.004	0.061	0.009	—	—
k_2 (cm^2)	5.39×10^{-19}	4.66×10^{-19}	1.74×10^{-19}	—	—	—

Tabla 1.4. Coeficientes de dispersión o absorción beneficiosos para seis longitudes de onda para el estudio de aerosoles atmosféricos, $O_3\ y\ NO_2$. Fuente: Russell et al., 1993.

Si se busca tener una ecuación para calcular el AOT mediante medidas de voltaje, la más indicada será la ecuación (2.7).

1.4.3. Coeficiente de Angström

El coeficiente de Angström explica la dependencia espectral del espesor óptico de aerosoles (AOT) con el coeficiente de extinción espectral y es un parámetro adimensional. La siguiente ecuación muestra la relación entre la sección eficaz de extinción (σ) y el coeficiente de extinción.

$$\sigma = \beta\lambda^{-\alpha} \tag{1.8}$$

Donde:

β *es el parámetro de turbidez.*

λ *es la longitud de onda.*

α *es el exponente o coeficiente de Angström.*

El exponente de Angström proporciona información del tamaño de las partículas suspendidas en un rango del espectro electromagnético (medidas obtenidas en dos diferentes longitudes de onda) y puede ser expresado mediante la sección eficaz de extinción y el espesor óptico de aerosoles.

$$\alpha_{\lambda_1,\lambda_2} = -\frac{\log\left(\frac{\sigma_{sca,p,\lambda_1}}{\sigma_{sca,p,\lambda_2}}\right)}{\log\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)} \tag{1.9}$$

$$\alpha_{\lambda_1,\lambda_2} = -\frac{\log\left(\frac{\tau_{\lambda_1}}{\tau_{\lambda_2}}\right)}{\log\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)} \tag{1.10}$$

Capítulo 2. Instrumentación para el estudio de aerosoles atmosféricos

2.1. Red AERONET

La red de Aerosol Robotic Network (AERONET) es una federación de redes terrestres de fotómetros solares para el monitoreo constante de los aerosoles, establecida por la NASA y PHOTONS (Photométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire), además con colaboradores de agencias nacionales, universidades, institutos, socios y científicos. AERONET lleva más de 25 años proporcionando una base de datos con un dominio público en todo momento y muy fácil de acceder a diversa información como propiedades microfísicas, ópticas y radiativas de los aerosoles para la caracterización, validación e investigación de los aerosoles (AERONET, s.f.).

La red fue fundada en 1998, siendo conformada en la actualidad por una red de más de 1000 (exactamente 1114) fotómetros solares en todo el mundo.

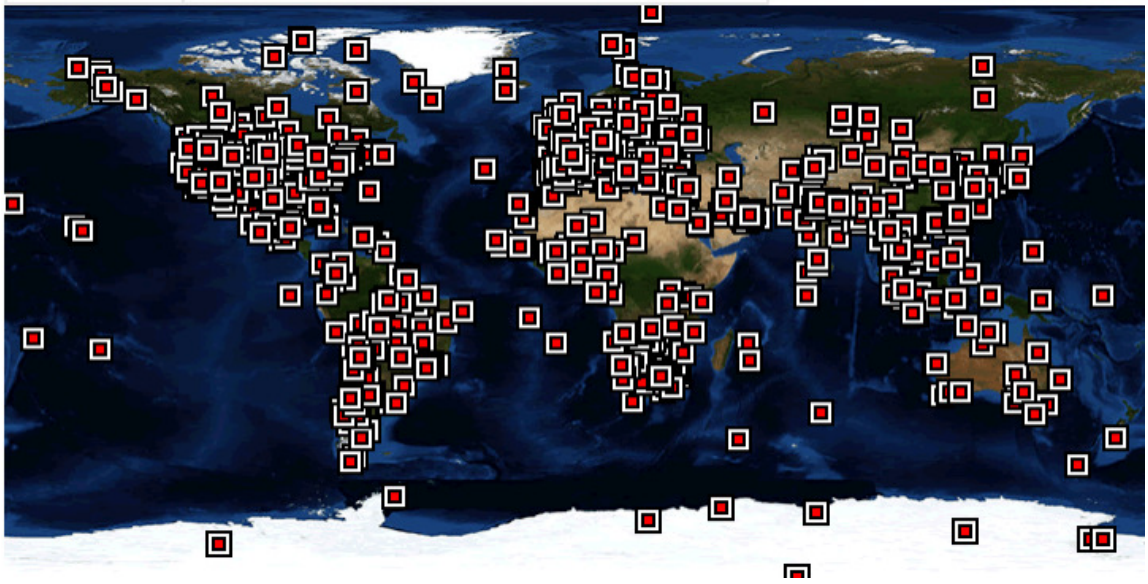


Figura 2.1. Ubicación de los fotómetros solares en el mundo de la Red AERONET. Tomado de la página web de AERONET. Fuente: AERONET, s.f.

La base de datos que proporciona la colaboración de AERONET otorga observaciones de profundidad óptica espectral de los aerosoles (AOD), dichos datos de AOD se encuentran en una versión 3.0 (existen datos con versiones 1.0 y 2.0) y estos se dividen en tres niveles:

- Nivel 1.0: Son datos 100% sin procesar ni filtrar.
- Nivel 1.5: Son datos que fueron procesados con un filtro de nubes y un control de calidad).
- Nivel 2.0: Son datos con una calidad garantizada (estos se calibran un año después que los instrumento vuelve a la sede central para observar o verificar si el fotómetro presento algún error de media por la instrumentación.)

2.2. Fotometría solar: Instrumentación y funcionamiento

El estudio de los aerosoles atmosféricos se realiza mediante las mediciones de radiación del cielo y radiación espectral solar. Estas medidas pueden ser elaboradas mediante una instrumentación con percepción remota con sensores activos o pasivos. En la instrumentación con sensores activos encontramos a los satélites (Terra, Aqua, etc.) que orbitan la tierra, los cuales poseen un instrumento (como el RADAR o LIDAR en algunos casos) que emitirán una señal radar o de radiación a un área de la tierra, dicha señal será atenuada por las partículas que se encuentre en su camino, rebotando o reflejándose en la superficie y que luego regresan al instrumento. De esta manera los sensores obtienen una lectura del AOD u otra variable a estudiar. Los instrumentos con sensores pasivos también se encuentran en los satélites, los cuales utilizan la radiación del sol que llega al planeta y se refleja en la superficie. La radiación reflejada luego de interactuar con las partículas (atenuada) es colectado por los sensores correspondientes, pero también se tiene los instrumentos ubicados en la superficie de la tierra los cuales pueden utilizar la radiación indirecta(como los radiómetros, piranómetros, etc.) o la radiación directa (como los fotómetros solares), estos fotómetros solares captan la radiación solar directa proveniente del sol, la cual cruza por la atmosfera terrestre y termina siendo atenuada por las partículas o aerosoles atmosféricos (Chuvieco, 1995).

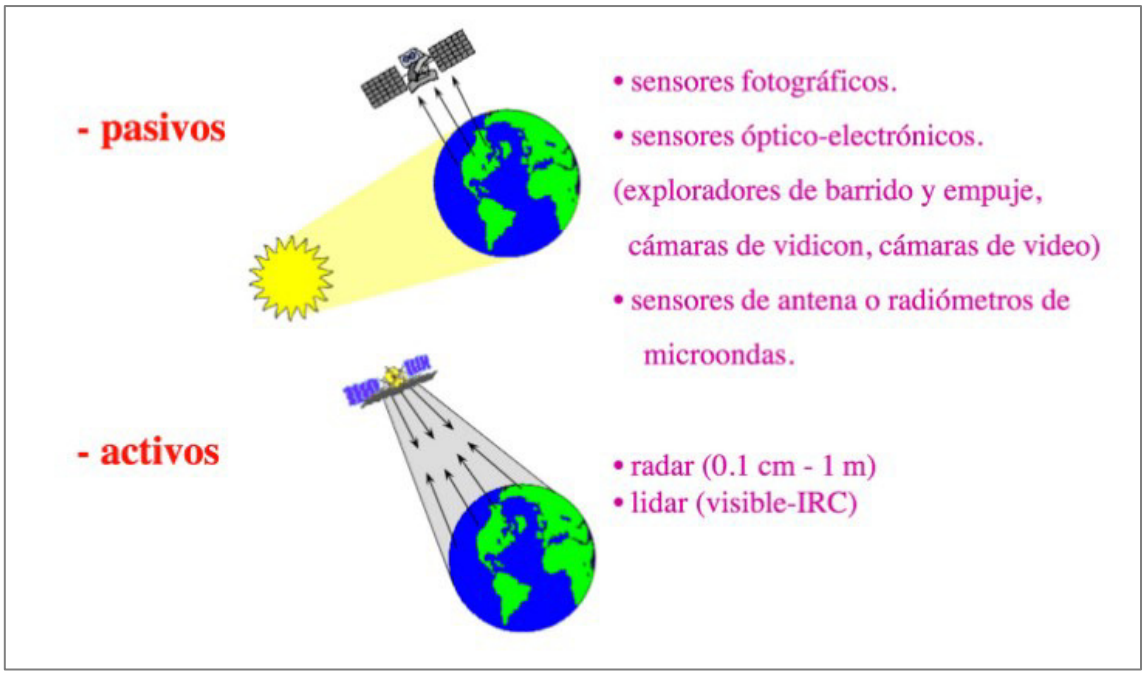


Figura 2.2. Clasificación de instrumentos o sistemas sensores según la procedencia de la señal o radiación. Fuente: Suarez, s.f.

Entre los fotómetros solares encontramos dos tipos:

1. Los fotómetros solares automáticos: Los cuales siguen de manera automática al sol para tomar las medidas de radiación directa del sol en varios rangos de longitudes de onda. Los costos de adquisición de los fotómetros solares automáticos son muy elevados, siendo los fotómetros CIMEL – NASA siendo uno de ellos.
2. Los fotómetros solares manuales: Siendo estos de un costo más accesibles para muchos investigadores de las universidades e institutos, pero el número de longitud de ondas que puede estudiar el AOD es muy reducido (3 a 5 longitudes de onda), además la manera de tomar las medidas es muy laboriosa y cansada. Entre los más conocidos tenemos al Calitoo y el Microtops ll Model 540.

En las figuras 2.4 y 2.5, se observan los tipos de fotómetros solares antes mencionados, de los cuales se entrará a describir con mayor detalle el fotómetro CIMEL – 318 y el fotómetro Calitoo.



Figura 2.3. Fotómetro solar CIMEL 318. Fuente: AERONET, s.f.

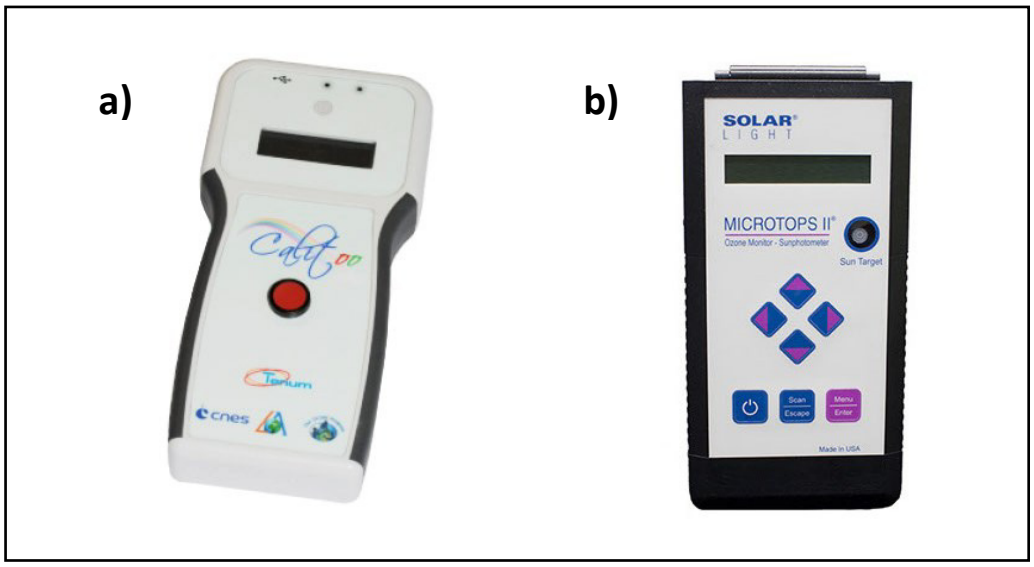


Figura 2.4. a) Fotómetro Calitoo. Fuente: Sun Photometer – Calitoo, s.f. b) Fotómetro MICROTOPS ll. Fuente: MICROTIPS II Sunphotometer, s.f.

2.2.1 Fotómetro solar automático: CIMEL-318

El fotómetro solar CIMEL Electronique CE318 de multibanda, es un instrumento estándar de la NASA que se utiliza en la Red AERONET. Este fotómetro mide la radiación directa solar espectral y radiaciones del cielo en diferentes rangos de longitud de onda. Además, el último modelo CE318-T logra realizar mediciones nocturnas con la radiación lunar espectral (AERONET, s.f.).

CE318 está conformado por un cabezal sensor con un colimador de 25cm que se encuentra conectado con una base robótica de 40 cm que logra apuntar sistemáticamente el cabezal al sol, el cielo y luna dependiendo de su programación. El fotómetro CE318 tiene una masa aproximada de 15 kg y con todos los equipos adicionales (caja de control, batería, transmisor satelital Sutron, etc.) unos 22 kg, también posee una rueda de filtros ópticos los cuales tienen diferentes rangos de longitudes ondas.

Hasta el 2004 se fabricaron dos modelos de fotómetros CIMEL, los cuales se diferenciaban en su rueda de filtros (8 filtros), siendo los siguientes:

1. Modelo estándar TS9: Posee 9 filtros (CWL/BW: 340/2, 380/4, 440/10, 500/10, 675/10, 870/10, 937/10, 1020/10, 1640/25 nm.
2. Modelo polarizado TP9: Tiene 9 filtros (CWL/BW: 340/2, 380/4, 440/10, 500/10, 675/10, 870/10, 937/10, 1020/10, 1640/25 nm)

La letra P del modelo polarizado, indica que posee un filtro polarizado. Además, estos instrumentos tenían detectores de Hamamatsu, un detector de silicio ultravioleta (UV) para un colimador solar (modelo S1336) y un detector de silicio para el colimador del cielo (modelo S2386).

Desde el 2014, se empezó a fabricar un nuevo modelo del fotómetro CIMEL, el cual nombrarían como CIMEL SUN (CE318-T), este fotómetro tiene muchas funciones mejoradas y adicionales (por ejemplo, robot más rápido y fluido, cabezal señalador mejorado, almacenamiento de datos a bordo, mediciones lunares, GPS, comunicación a través de USB, RS232, GPRS y satélite), siendo lo mejor es que sigue siendo compatible con versiones anteriores del robot (AERONET, s.f.). Con este modelo se incluyó una nueva rueda de filtros a las dos existentes, compuesta por las siguientes longitudes de onda:

3. Modelo SEAPRISM TV9: Tiene 9 filtros (CWL/BW: 412/10, 440/10, 500/10, 531/10,550/10, 675/10, 870/10, 937/10, 1020/10 nm).

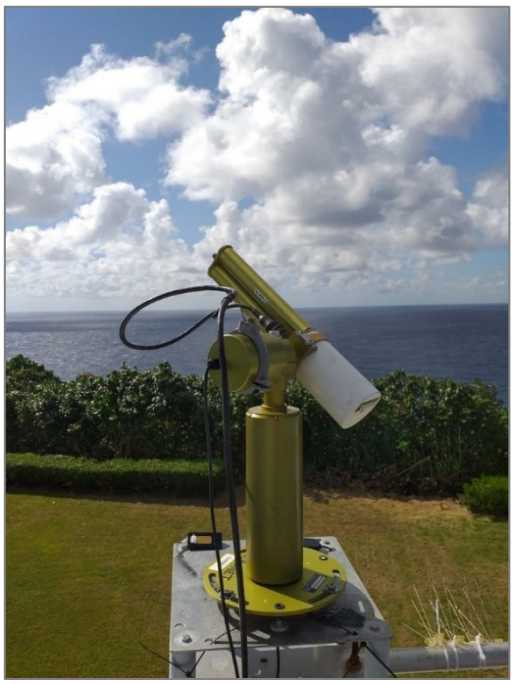


Figura 2.5. Fotómetro solar-lunar-cielo multibanda CE318-T. Fuente: Complete system equipment details – AERONET, s.f.

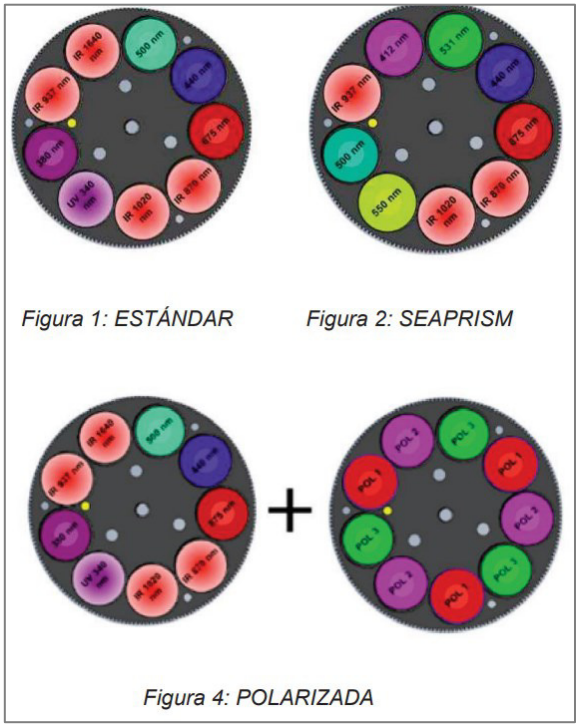


Figura 2.6. Rueda de filtros ópticos modelo estándar, polarizada y SEAPRISM. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, 2017.

El Perú, actualmente solo posee dos fotómetros solares CIMEL CE318-T perteneciente a Red de AERONET-NASA. El primero se encuentra ubicado en las coordenadas de 12.04°S y 75.32°W, con una altitud de 3313.0 msnm, que fue instalada en el Departamento de Junín - valle del Mantaro en el Observatorio de Huancayo (HYO) a cargo de Instituto Geofísico del Perú (IGP) y las mediciones están siendo realizadas y enviadas a la Red de AERONET por el Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR) (Estevan et al., 2019).

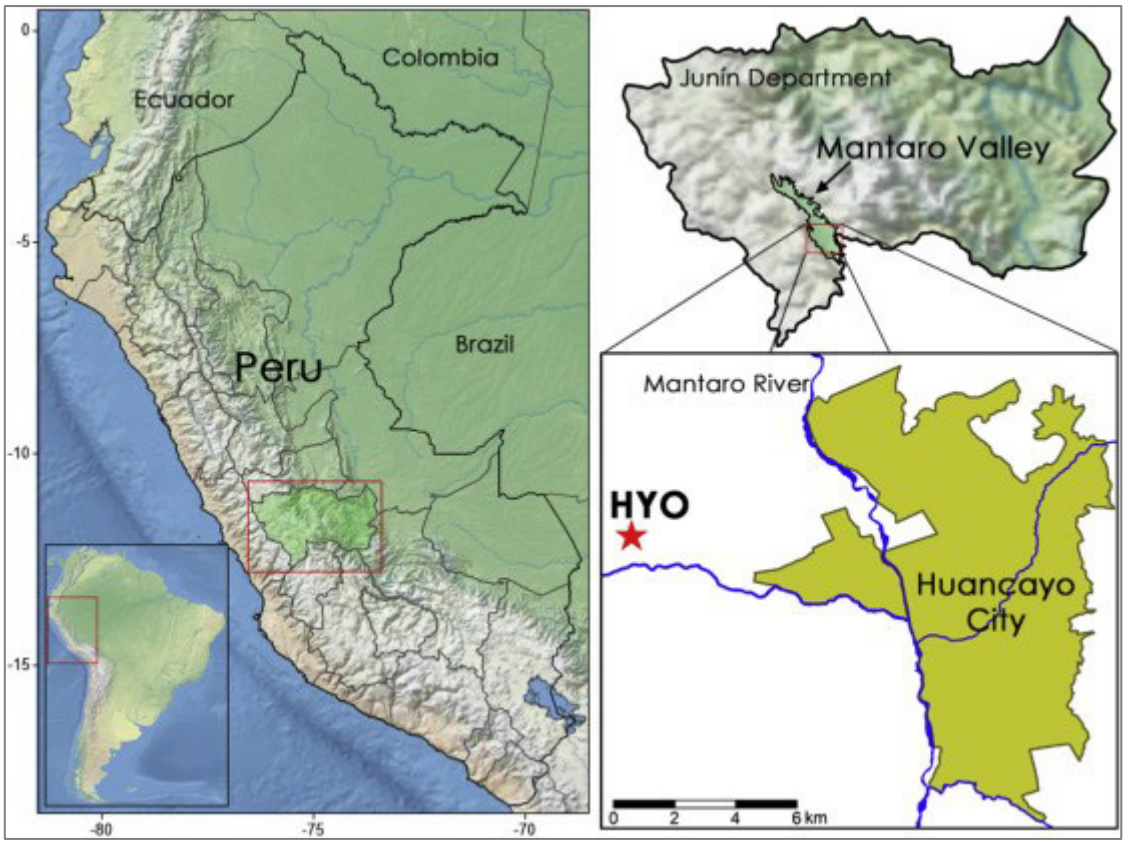


Figura 2.7. Ubicación del fotómetro CE318-T: Ciudad de Huancayo, Perú. Fuente: Estevan et al., 2019.

El fotómetro solar CIMEL CE-318T de Huancayo - Perú, se instaló el 19 de marzo del 2015, a partir de esa fecha se empezó a registrar datos continuamente hasta la actualidad. Con una frecuencia de 15 minutos se registra y mide la irradiancia solar en el cielo en ocho bandas espectrales (340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020 y 1640 nm) todos los días del año. Además, anualmente, aproximadamente, el cabezal del fotómetro solar se cambia o renueva por un cabezal nuevo que llega calibrado de las instalaciones de AERONET GSFC – NASA. Una vez instalado se realiza un pos-calibrado al instrumento para garantizar la precisión y fiabilidad de los datos. Los datos obtenidos se utilizan para recuperar la profundidad óptica de aerosoles

(AOD) y el exponente de Angstrom, siendo utilizadas para las investigaciones el AOD a 440 nm y un rango de 440-870 nm para el exponente de Angstrom (α) (Estevan et al., 2019).



Figura 2.8. Fotómetro CIMEL CE-318T del IGP-Perú, en funcionamiento y realizando las medidas respectivas del 1 de diciembre del 2021. Fuente: Propia.

A la fecha 16/05/2022, el fotómetro CE-318T ubicado en Huancayo-Perú, lleva procesando un promedio de 6 años, los cuales son detallados para cada nivel a continuación:

- Nivel 1.0 AOD: 2529 días [6.929 años]
- Nivel 1.5 AOD: 2140 días [5.863 años]
- Nivel 2.0 AOD: 1982 días [5.430 años]

El segundo fotómetro solar CIMEL 318 – T, fue instalado en enero del 2022 en la Universidad Nacional de Moquegua (UNAM) en las coordenadas 17°36'06.2"S 71°20'27.5"W, estando a cargo del Instituto de Investigación para el Desarrollo del Perú (IINDEP) – UNAM (Valdivia, 2022).



Figura 2.9. Fotómetro CIMEL 318-T realizando medidas de radiación solar directas, ubicado en la Universidad de Nacional de Moquegua. Fuente: Valdivia, 2022.

2.2.2 Fotómetro solar manual: CALITOO

El Calitoo es un fotómetro solar manual, que permite determinar el AOD en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético del rango visible (Rojo (615nm), Verde (540nm) y Azul (465nm)) y caracterizar su distribución de tamaño (gases contaminantes, polvo, cristales de hielo, humo, CO2).

La organización Calisph'Air, creo un proyecto educativo, con el fin de poder estudiar la atmosfera, logrando obtener el fotómetro de bolsillo CALITOO, el cual acompaño a las misiones de los satélites Calipso, Parasol, IASI, etc. Este proyecto se desarrolló en el marco científico internacional y como un programa educativo, el cual estuvo a cargo de GLOBE, reuniendo a más de 26 000 profesores y 15 000 escuelas de todo el mundo, solo mediante el Internet (Sun Photometer - Calitto,s.f.).



Figura 2.10. Personas realizando medidas con el fotómetro CALITOO. Fuente: Sun Photometer – Calitoo, s.f.

Las pruebas del último prototipo Calitoo, fueron hechas en la montaña de Izaña – Canarias en setiembre del 2013, estando a cargo de la calibración el Dr. Benjamín Torres del Laboratorio de Óptica Atmosférica o también conocido como LOA (Laboratoire d'Optique Atmosphérique) ubicado en Francia. Torres utilizo para calibración el Método Langley, obteniendo después de tres días de mediciones, la constante de calibración del prototipo Calitoo.

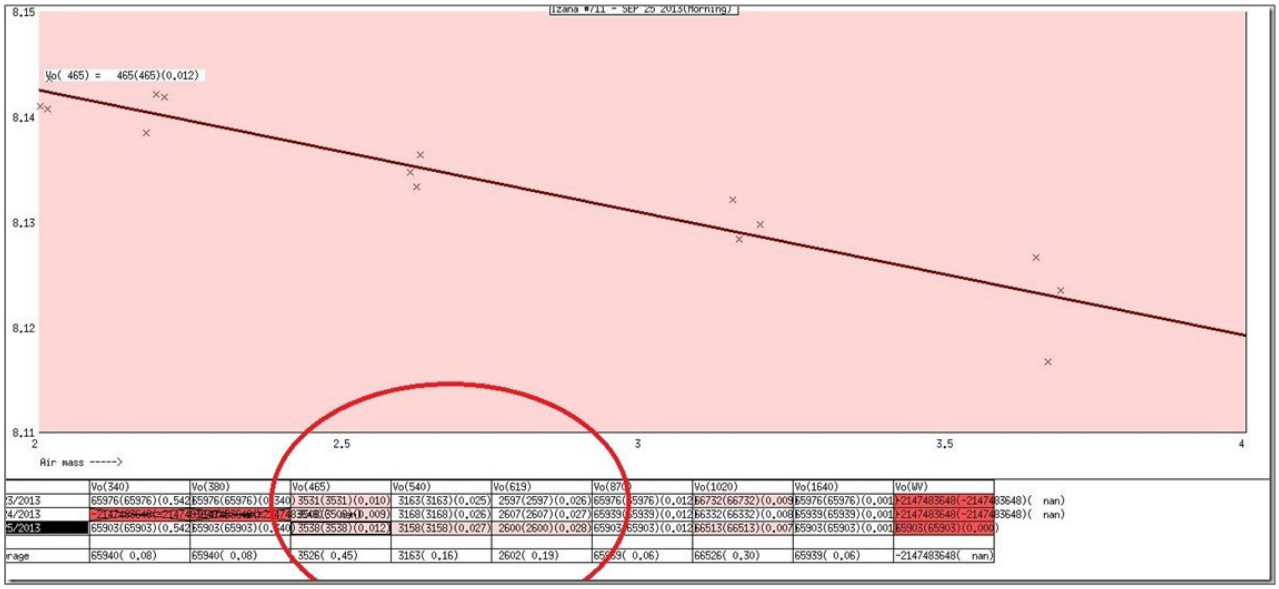


Figura 2.11. Después de tres días de medición, se obtuvo estabilidad en las constantes de calibración (Círculo rojo). Fuente: Bosch, s.f..

Especificaciones/Características del Calitoo Photometer:

- Canales de longitud de onda de recesión: 465, 540 y 619 nm
- Almacena 999 medidas
- Calcula el espesor óptico de aerosoles y exponente de Angström
- Software de PC gratis
- Dimensiones: 210x100x 35 mm
- Transferencia de datos mediante el puerto USB
- Fuente de energía: 4 pilas AA 1,5V
- Peso 400g (con pilas)
- Temperatura de funcionamiento correcto: -20°C a +55°C
- Adquisición de datos manuales

Espesor Óptico de Aerosoles calculado por el CALITOO

Para la medición de la profundidad óptica atmosférica utilizan la Ley de Beer – Lambert, antes mencionada.

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{\left(-m\cdot(\tau_a+\tau_g+\tau_{NO2}+\tau_W+\tau_{O3}+\tau_r)\right)} \qquad (2.1)$$

$I(\lambda)$: $Intensidad\ de\ luz\ solar\ fuera\ de\ la\ atmósfera.$

$I_0(\lambda)$: $Intensidad\ de\ la\ luz\ directa\ recibida.$

λ: $Longitud\ de\ onda$

τ_a: $coeficiente\ de\ transparencia\ de\ los\ aerosoles$

τ_g: $coeficiente\ de\ transparencia\ del\ gas\ (CO\ 2\ et\ O\ 2\ )$

τ_{NO2}: $coeficiente\ de\ transparencia\ de\ dióxido\ de\ nitrógeno\ (contaminación)$

τ_W: $coeficiente\ de\ transparencia\ del\ vapor\ de\ agua$

τ_{O3}: $coeficiente\ de\ transparencia\ del\ ozono$

τ_R: $Coeficiente\ de\ dispersión\ de\ Rayleig$h

m: $Coeficiente\ de\ masa\ de\ aire$

$m = \frac{1}{\sin(\theta)}$ $con\ \theta\ angulo\ entre\ la\ posición\ del\ sol\ y\ la\ linea\ del\ horizonte.$

La ecuación anterior se simplificará, porque se considerará que para el AOD solo depende de la dispersión por Rayleigh (Moléculas) y por los aerosoles. Se distingue los aportes naturales(moléculas) y contaminantes (aerosoles y otros).

Además, se toma en cuenta las contribuciones del ozono y posiblemente otros gases absorbentes. Los datos del ozono dependiendo de la latitud se pueden obtener desde el espectrómetro cartográfico de ozono total (TOMS).

Debido a todas las observaciones antes mencionadas, se obtiene la siguiente ecuación:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{(-m\cdot(\tau_a+\tau_{O3}+\tau_R))} \tag{2.2}$$

Donde, el coeficiente por la dispersión de Rayleigh (τ_R) es proporcional a la presión atmosférica medida en el punto de estudio y la presión en el nivel del mar, siendo igual a lo siguiente:

$$\tau_R = a_R.\frac{p}{p_0} \tag{2.3}$$

Para obtener el coeficiente de t_{O3}, este será proporcionado por el Mauna Loa Observatory (MLO) pero solo para las longitudes de onda verde y roja, siendo despreciable para el azul. El fotómetro devuelve un valor en voltaje proporcional a la intensidad de la luz directa que llega al fotodetector o Led RGB. Este valor será representado como V, el voltaje registrado menos el voltaje oscuro (cuando el fotómetro tiene tapada la entrada) (Calculating Aerosol Optical Thickness, s. f.).

V_0 es el valor del voltaje proporcional a la intensidad de luz, pero fuera de la atmosfera a una distancia del sol de una 1UA (unidad astronómica). Una UA es igual a 150 millones de kilómetros.

$$\mathrm{V} = \mathrm{V_0}.\,\mathrm{e}^{(-\mathrm{m}\left(\tau_a+a_R.\frac{p}{p_0}+t_{o3}\right))} \tag{2.4}$$

Introduciremos a la ecuación (2.4), un término de corrección debido a la distancia Tierra- Sol que ira variando en función del día del año.

$$\mathrm{V} = \mathrm{V_0}.\,[\frac{r_0}{r}]^2\mathrm{e}^{(-\mathrm{m}\left(\tau_a+a_R.\frac{p}{p_0}+t_{o3}\right))} \tag{2.5}$$

r_0: Distancia media del Sol − Tierra (1 UA)

r : Distancia Sol − Tierra del dia de medición

Ahora despejaremos el t_a(AOD) en función de los otros términos.

$$\ln(V) - \ln\left(V_0.\left[\frac{r_0}{r}\right]^2\right) = -m\left(t_a + a_R.\frac{p}{p_0} + t_{O_3}\right) \quad (2.6)$$

$$\tau_a = \frac{\left[\ln\left(V_0.\left[\frac{r_0}{r}\right]^2\right) - \ln(V)\right]}{m} - a_R.\frac{p}{p_0} - \tau_{O_3} \quad (2.7)$$

Siendo la ecuación 2.7 final para lograr obtener el espesor óptico de aerosoles o Aerosol Optical Depth (AOD).

Recuerda: El espesor Óptico de la Atmosfera, es también conocido como Atmospheric Optical Thickness y se abrevia AOT.

Parámetros de calibración:

Los siguientes datos se obtuvieron el día 04 /09/2020 aproximadamente en Izaña-España, para el CALITOO #395.

Latitud: 28°18.52210N - Longitud: 016°29.96980W

Altitud: 2378 metros

- a_R: $Constante\ de\ rayleigh$

$Longitud\ de\ onda(nm)$	$a_R\ calculado$
465	0.19490
540	0.10637
619	0.06281

- τ_{O_3}: Dados otorgados por LOA − AERONET

$Longitud\ de\ onda(nm)$	T_Ozono
465	0.0000
540	0.0128
619	0.0154

- **CN0:**

$Longitud\ de\ onda(um)$	CNO	Var_CNO	$Datos\ usados$
465	3274	0.086	8
540	3156	0.219	7
619	2447	0.205	7

2.2.3. Instrumentación del Calitoo Sun Photometer

Forrest Mims y David Brooks, en 1989 revolucionaron el campo de la fotometría solar, al desarrollar un método económico que permita estudiar los aerosoles atmosféricos, donde debes de utilizar filtros de interferencias que limitan el rango de luz a 1 o 2 nanómetros, se utiliza diodos emisores de luz (LED) como fotodetectores, aunque poseen un rango más amplio de longitud de onda.

En fotómetro desarrollado por Mims, se necesitaba ser apuntando al sol para captar la radiación directa que pasa por la atmosfera, una vez que llegaba la radiación al LED, se produce una muy pequeña corriente (flujo de electrones). La señal se amplifica mediante amplificadores de transimpedancia y operacionales (Brooks, 2010).



Figura 2.12. Electrónica y sistema óptico para apuntar al sol del fotómetro solar desarrollado por Forrest Mims en 1989. Fuente: Brooks, 2010.

Fotodiodos: Diodos Emisores de Luz (LED)

Los LEDs son diodos que emiten luz en diferentes rangos de longitud de onda, posee sus componentes encapsulados lo que les permite que su desgaste en el tiempo sea mínimo. Mims (s.f.), construyo el primer fotómetro solar utilizando LEDs en 1992, este fotómetro estuvo realizando medidas continuas desde 1992 a 1998, después de este tiempo se obtuvo que el instrumento tenía una deriva instrumental entre +/- 1.9%. Se logro concluir que los LEDs puede mantener por mayor tiempo su calibración, evitando afectar notablemente a las medidas realizadas y también, se puede utilizar como detectores para espectroscopia de absorción, transmisión y reflectancia.

Los LEDs que se utilizan en los fotómetros solares como en el Calitoo, deben estar conectados inversamente, esto quiere decir que el pin positivo del LED se conecte en tierra y el pin negativo se conecte en una entrada de señal (IN), como se muestra en la figura 2.12.

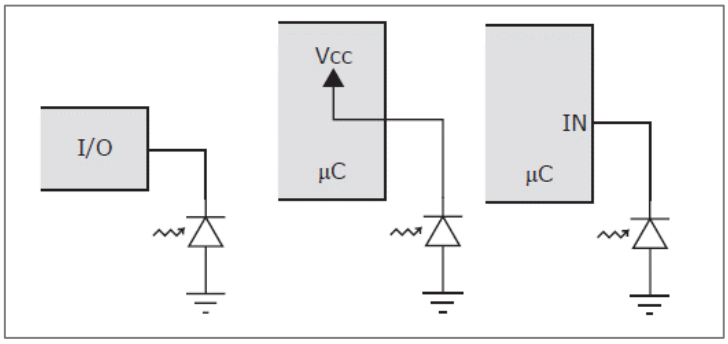


Figura 2.13. LED usado como un fotodiodo o fotosensor. Fuente: Dietz et al., 2003.

En la figura 2.13. se observa en el esquema electrónico a) como se conecta comúnmente para que el emita luz. En el esquema b), se observa una polarización inversa, donde tenemos el lado positivo del LED conectado a tierra y el lado negativo con una resistencia a una señal saliente (VCC). En el esquema C), se tiene un esquema similar al anterior, pero en este caso la señal saliente se cambia por un punto donde entrara la señal (INPUT - IN) recibida por el LED.

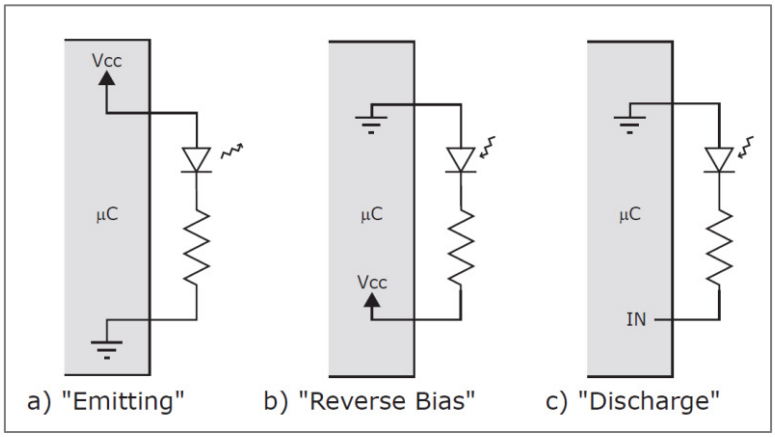


Figura 2.14. Emisión y detección de radiación con un Light Emitting Diode. Fuente: Dietz et al., 2003.

En muchos casos la señal (radiación directa) que entra por los LEDs es en muy pequeña, encontrándose en el rango de microvoltios, siendo necesario amplificarla para tener buenas lecturas, esto se lograra utilizando amplificadores de transimpedancia como el amplificador operacional LTC1050 o LTC1051.

En los inicios de la construcción del fotómetro Calitoo, se utilizó el siguiente esquema electrónico básico para convertir la corriente en voltaje, utilizando amplificadores de transimpedancia de uno y dos canales como se muestran en la figura 2.14.

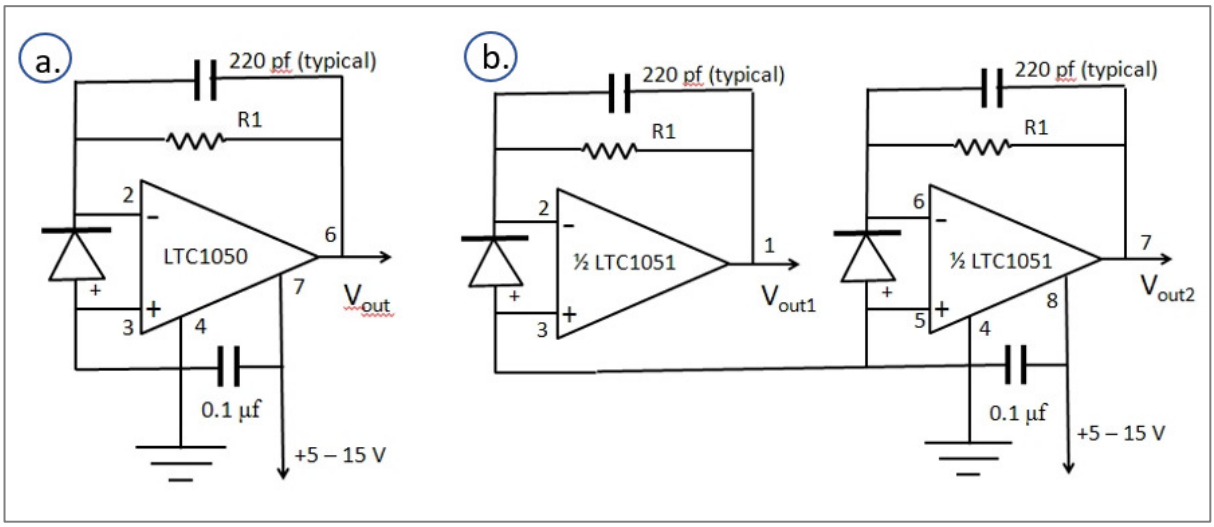


Figura 2.15. a. Esquema electrónico para un LED. b. Esquema para dos LEDs. Fuente: Brooks, 2010.

Los componentes electrónicos que se utilizaron para realizar la placa principal, fueron:

- 1 amplificador operacional LTC1050
- resistencia de 2 Mohm, 5.6 Mohm
- capacitores de 0.1 uf, 220pf, 220pf
- Interruptor de encendido y apagado
- Batería de 9V
- Cable rojo y negre de calibre 22

Obteniendo la siguiente placa electrónica de la figura 2.15.

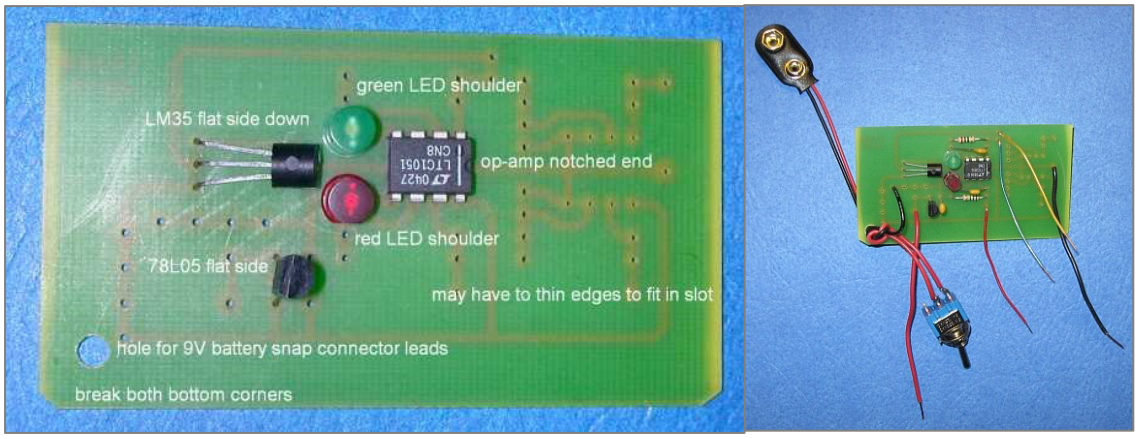


Figura 2.16. Placa electrónica para un fotómetro solar de dos canales. Fuente: Brooks, 2010.

Para mayor detalle de la construcción de un fotómetro solar de dos canales, se recomienda revisar el siguiente enlace: https://instesre.org/construction/construction.htm

2.3. Métodos de calibración

En la instrumentación realmente existe diversos instrumentos con diferentes rangos de medida, resolución, funcionamiento, etc., muchos de ellos pueden ser empleados para las medidas radiométricas. Entre las características importantes para describir un instrumento, tenemos: Anchura de los filtros, campo de iluminación, paso, resolución, rango espectral, etc.

Dentro de las medidas radiométricas, se utiliza las mediciones de extinción (medidas directas al sol) de la radiación pasando por un tubo colimador o limitador de campo. El campo de

iluminación media o fiel of view (FOV), es un parámetro importante para explicar el sistema de medida (Toledano, 2005).

Los métodos para calibrar un instrumento difieren en muchos aspectos y tipos, pero generalmente hay tres métodos para calibrar los instrumentos radiométricos, dejando en claro que dejaremos fuera, todo método que implique un vuelo de avión, globos o satélites (Toledano, 2005). Y siendo los siguientes:

1. Método de Langley
2. Método de calibración de irradiancia en laboratorio
3. Calibración o Inter-calibración por comparación con un instrumento de referencia.

Nos centraremos en los métodos que puedan ayudar a los instrumentos radiométricos como los fotómetros CIMEL CE-318T y el CALITOO en su calibración. Es preciso mencionar que el cálculo de AOD mediante la ley de Beer no requiere una calibración con unidades físicas, puesto que puede ser determinada con una señal de voltaje, cuentas, etc. (Toledano, 2005).

2.3.1. Método de Langley

La calibración por el método de Langley se centra en la Ley de Beer-Bouguer-Lambert antes mencionada, en la cual se indica que el subíndice λ ubicado en la siguiente ecuación, que puede ser cualquier longitud de onda.

$$I_\lambda = I_{0\lambda} * e^{-\tau_\lambda m} \tag{2.8}$$

Donde,

I : $Irradiancia\ media\ en\ el\ nivel\ del\ suelo$

$I_{0\lambda}$: $Irradiancia\ extraterrestre(corregida\ con\ la\ distancia\ Tierra - Sol)$

τ : $Espesor\ óptico\ total\ de\ la\ atmósfera$

m : $Masa\ óptica$

Entonces de la ecuación anterior, se toma el logaritmo, obteniendo:

$$\ln(I_\lambda) = \ln(I_{0\lambda}) - \tau_\lambda * m \tag{2.9}$$

En método Langley funcionaria de la siguiente manera, si se obtiene una serie de datos de la irradiancia medida para una longitud de onda frente a la masa óptica, donde a la irradiancia media se le aplicaría el logaritmo y si esta serie de medidas no presenta variación alguna en el espesor óptico total, se obtendría una recta cuya pendiente es el espesor óptico total y la ordenada en el origen seria la irradiancia extraterrestre para un canal o longitud de onda (Toledano, 2005). Ejemplo en la siguiente imagen.

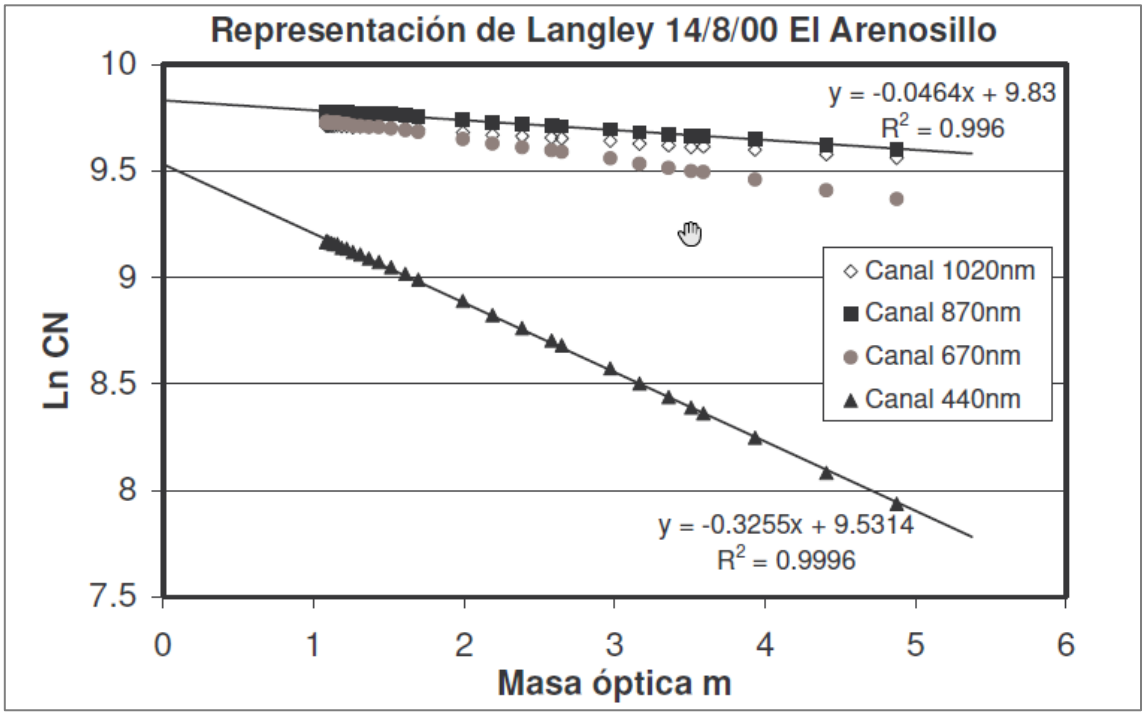


Figura 2.17. Ejemplo del método Langley con datos recopilados en El Arenosillo - Red AERONET. Se muestra la recta resultante de ajuste para las longitudes de onda de 440 y 870 nm. Fuente: Toledano, 2005.

Si se compara la señal en voltaje extraterrestre con el espectro de irradiancia extraterrestre, se puede obtener coeficientes de calibración para trabajar directamente con la señal bruta en unidades físicas(W/m^2).

Para obtener estos coeficientes lo más preciso posible, se tiene que hacer una corrección a la irradiancia respecto a la distancia tierra-sol. Además, cuando se requiera calcular es espesor óptico en un día concreto, se deberá aplicar esta corrección (Spencer, 1971):

$$d = 1.00110 + 0.034221 * \cos(\Gamma) + 0.001280 * sen(\Gamma)$$

$$+0.000719 * \cos(2\Gamma) + 0.000077 * sen(2\Gamma) \qquad (2.10)$$

Donde:

$$\Gamma = 2\pi * \frac{N_d - 1}{365} \tag{2.11}$$

Y dependiendo únicamente de N_d, siendo el día del año.

La condición más importante y fuerte que necesita este método, es que el espesor óptico total atmosférico se mantenga constantemente en todo momento cuando se están realizando las series de medidas. Siendo esta una condición estricta en la atmosfera.

Sobre las masas ópticas o de aire, esta al momento de la calibración y toma de muestra solo se deberá considerar las que se encuentre entre 1 y 6, debido a que las masas cercanas al medio día estropean el ajuste y 6 o 7 por que se dificulta evaluar correctamente cuando el sol está muy bajo.

La limitación de las masas ópticas grandes en los instrumentos (rango dinámico) estarán limitadas por la relación de Ley de BBL:

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\tau * m \tag{2.12}$$

Donde se pondrá el valor más pequeño aceptable en I y de ser posible una relación señal-ruido, de la misma manera la irradiancia extraterrestre del día y el espesor óptico, obteniendo la mayor masa de aire que el instrumento pueda o permita registrar (Toledano, 2005).

Además, no hay que pasar por alto otras limitaciones y fuentes de error, cuando el sol se ubica en lo más bajo, como: scattering múltiple (luz no llega), refracción en el aire, curvatura de la tierra, presencia de brumas o capas de diferentes aerosoles (mayor tamaño). Debido a lo antes mencionado, logra aumentar la incertidumbre del instrumento.

Para asegurar que el instrumento tenga una precisión del 1% en la calibración, se necesita lo siguiente:

- Lugar idóneo, como las altas montañas (altitud alta), estos lugares deben poseer bajas concentraciones de aerosoles y las variaciones que ocurran deben ser pequeñas en términos absolutos. Como el Observatorio Atmosférico de Izaña, ubicado a 2360 m sobre el nivel del mar.

- Mínimo 20 ajustes Langley son necesarios para que el voltaje extraterrestre, tenga una precisión del 1% y un error absoluto entre 0.01-0.02.
- Días soleados y estables de la estación.
- Tener la menor variación del espesor óptico atmosférico total.

El método de Langley tiene diversas fuentes de error (Slusser et al., 2000), siendo las siguientes:

i. Las medidas del espesor óptico total no tienen la estabilidad necesaria.
ii. El rango de longitud de onda del filtro óptico o detector es muy ancho, esto se debe que la ley de Beer solo es aplicable monocromáticamente, lo cual conllevaría a un error.
iii. El instrumento es inestable.
iv. La baja resolución y sensibilidad del detector frente al flujo incidente de radiación.
v. Considerar una idéntica masa óptica para los aerosoles, gases absorbentes y moléculas. Por la ley de BBL, se debería considera masa óptica diferente para cada uno de ellos, debido a que posee diferentes perfiles verticales de concentración.
vi. Si queremos convertir la señal a unidades físicas, se le atribuirá un error por el espectro de irradiancia terrestres y pudiendo obtener un error menor a 2%, pero este error suele ser mejorado con ayuda de las medidas satelitales (Toledano,2005).

2.3.2. Método de calibración de irradiancia en laboratorio

El método de calibración de irradiancia se centra en el uso de lámparas estándar que emitan una irradiancia conocida. Para realizar la calibración la lampara estándar se pone a una distancia específica del detector. Se utilizan lámparas que se les transfirió la calibración de lámparas referenciales por el NIST (National Institute of Standards and Technology) y otros organismos análogos. Con estas lámparas se pueden obtener una calibración absoluta en irradiancia(W/m^2) (Tolano,2005).

La calibración en laboratorio requiere condiciones perfectas para que la lampara funcione correctamente (posee una vida útil de 50 horas), como una alimentación controlada y perfectamente estabilizada para lograr emitir la potencia deseada, rampas de encendido y apagado para evitar el deterioro de la lampara y que estos afecten negativamente en la calibración.

Si fuera a existir elementos entre la fuente y el detector como fibras ópticas, lentes, difusores, etc., al momento de la calibración, se deberá realizar bajo las mismas condiciones en el futuro, para que las mediciones realizadas con el instrumento no sean afectadas.

En la figura siguiente se observa una lampara halógena de cuarzo, este instrumento posee una precisión en la calibración del $\pm 4\%$ entre el intervalo de 350-1000nm y $\pm 6\%$ entre sus rangos próximos ($300 - 350\ nm\ y\ 1000 - 1100\ nm$). Tiene un voltaje de 115.4 V y una intensidad de corriente de 1.659 A, dando una potencia de 191.33 W (Vergaz, 2001).

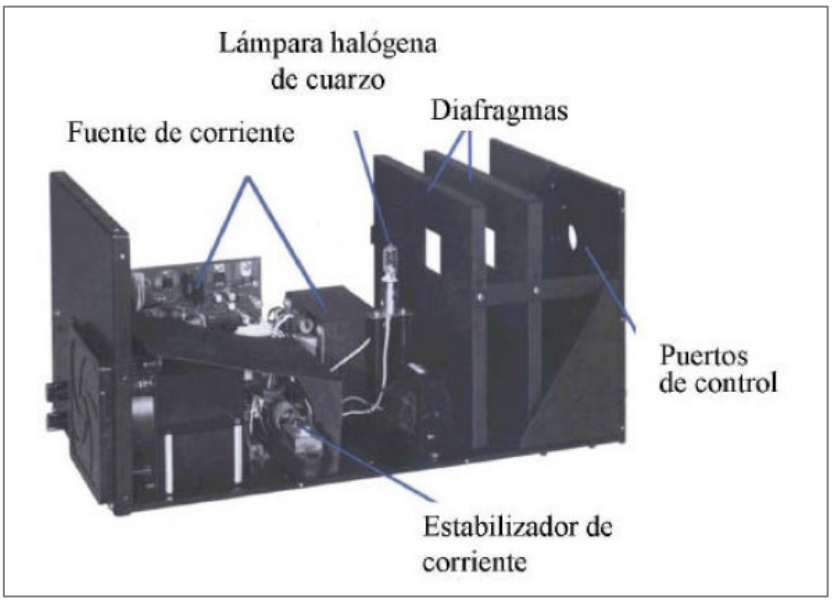


Figura 2.18. Calibrador Li-Cor 1800-02, se observa el interior del instrumento y la lampara halógena de cuarzo para la calibración correspondiente. Fuente: Vergaz, 2001.

2.3.3. Calibración o Inter-calibración por comparación con un instrumento de referencia

La calibración por comparación trata de trasladar a nuestro instrumento la calibración de otro que ya fue previamente calibrado, este instrumento calibrado se llama instrumento master o de referencia.

Se recomienda utilizar este método con instrumentos idénticos, con la finalidad de obtener mayor éxito. Si fuera el caso que se tenga dos instrumentos distintos, esto complicaría la calibración debido a que al momento de realizar las medidas posean diferente rango espectral, campo de iluminación, intervalo de medida, etc.

El método consiste en realizar medidas simultaneas de ambos instrumentos, asegurándose que posean las mismas condiciones. Luego los coeficientes $I_{o\lambda}$ se transfieren mediante un ajuste lineal: Aplicamos la ley de Beer al instrumento de referencia (ref) y al que se calibrara:

$$I_\lambda(ref) = I_{0\lambda}(ref).e^{(-\tau m)} \tag{2.13}$$

$$I_\lambda = I_{0\lambda}.e^{(-\tau m)} \tag{2.14}$$

Se hace un cociente el $e^{(-\tau m)}$ y despejamos el coeficiente de calibración $I_{o\lambda}$ del instrumento que se calibrará, lo cual llevará a construir una recta sin ordena en el origen, obteniendo:

$$I_{0\lambda} = \frac{I}{I(ref)} * I_{0\lambda}(ref) \tag{2.15}$$

Las medidas realizadas se recomiendan hacerlas en todo el rango dinámico del instrumento y no solo durante las horas centrales del día. Este método posee errores en su evaluación analítica en la recta de ajuste (esta puede ser reducido realizando un número elevado de medidas simultaneas). Como ejemplo tenemos las calibraciones realizadas por AERONET con los fotómetros CIMEL, con un fotómetro de precisión de 0.2% (instrumento de referencia) y logrando obtener en el instrumento calibrado una precisión en torno al 2%. Es cierto también que en este porcentaje incluye otros errores, pero también no es recomendable trasladar calibraciones usando patrones de segundo, tercer… orden, se llegaría a perder presión rápidamente (Toledano, 2005).

Capítulo 3. Metodología

3.1. Método y alcances de la Investigación

3.1.1. Método de la Investigación

Para el desarrollo de esta investigación se empleó un método de investigación mixto (cualitativo y cuantitativo); ya que, se comenzó con una observación del área de estudio, dentro de ello los aerosoles atmosféricos y centrándonos cómo funciona la instrumentación que hace posible el estudio de este material particulado atmosférico. Seguidamente se procedió a analizar qué tan viable es la adquisición de los instrumentos (fotómetros solares) en los diferentes centros de investigación del Perú, con el objetivo de aplicarlo para la enseñanza e investigación. Además, se examinó los diferentes instrumentos actuales en el Perú para el estudio de los aerosoles, dando énfasis en la precisión de datos, frecuencia de toma datos, etc.

3.1.2. Método especifico de investigación

Fueron los siguientes:

1. Determinar el territorio e instrumentos a utilizar en la investigación.
2. Analizar el funcionamiento, construcción y sensores de los diferentes instrumentos fotométricos solares utilizados en el Perú.
3. Diseñar y desarrollar un fotómetro solar manual de similar calidad que el Calitoo, pero a menor costo, más compacto y de manera sencilla.
4. Diseñar y desarrollar un Solar Tracker para el fotómetro solar Calitoo.
5. Realizar la calibración del fotómetro solar desarrollado mediante el método de Langley.
6. Realizar toma de datos con el Fotómetro solar Calitoo y el desarrollado para verificar su eficiencia y eficacia.
7. Recolectar datos de la base de AERONET.

3.1.3. Alcance de la investigación

Esta investigación tuvo como alcance principal el desarrollo de un instrumento fotométrico para el estudio de los aerosoles atmosféricos, el cual cumple con las siguientes características:

1. Medición en 4 rangos de longitud de onda.
2. Instrumento de bajo costo, menor a los 100 dólares.
3. Fácil construcción, utilizando impresión FDM 3D.
4. Resistentes a medios extremos.
5. Menor tamaño que el fotómetro Calitoo.
6. Fácil uso y procedimiento para procesar los datos.

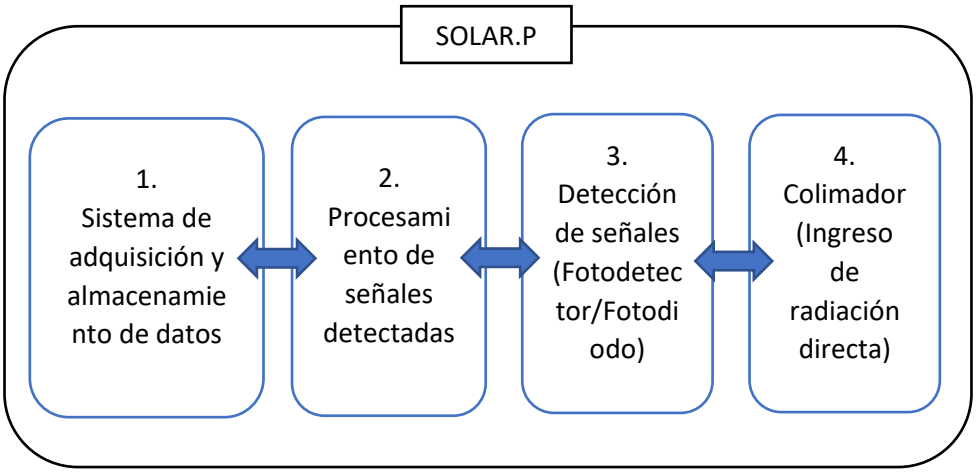
Asimismo, se enfocó también solo en la búsqueda de información bibliográfica sobre la instrumentación de dispositivos fotométricos solares y base teórica útil para este. A su vez se desarrolló un Tracker solar para automatizar la toma de datos del Calitoo, tomando en cuenta que este debe ser de bajo costo y fácil construcción.

Capítulo 4. Desarrollo del Fotómetro solar manual de bajo costo

Iniciamos con el diseño del instrumento a desarrollar, que llamaremos SOLAR.P, se analizó a profundidad como fue construido, calibrado y como se realiza la medida de la radiación con el fotómetro Calitoo, además se evaluó las dificultades que posee en lo económico, social y ambiental su adquisición para estudiantes e investigadores de las diferentes instituciones del Perú, pero también la dificultad de su construcción y adquisición de materiales.

Se comenzó descomponiendo el instrumento en cuatro partes, con la finalidad de poder desarrollar de manera óptima y eficiente su desarrollo, siendo las siguientes:

Tabla 4.1. Descomposición del diseño y construcción del instrumento fotométrico SOLAR.P. Fuente: Propia.



Primera parte. Para el sistema de adquisición de datos se analizó un equipo electrónico que tenga la suficiente capacidad, sea accesible y que posean la mayoría de estudiantes, docentes e investigadores, por tal motivo se optó que el Solar.P funcionara con smartphones, laptops y tablets, utilizando diferentes softwares y aplicativos.

Segunda parte. Para el procesamiento de señales se consideró dos placas electrónicas principales (Marcas: Espressif Systems y Arduino Uno) con diferentes características, siendo las más comerciales y accesibles.

Tabla 4.2. Características de las placas electrónicas ESP32 y Arduino Uno. Fuente: Propia.

Placas electrónicas de prototipado rápido	**ESP32 NodeMCU**	**Arduino Uno R3**
		
Microcontrolador	ESP32	Atmega328p
Tensión de funcionamiento	3.3V	5.0V
Consumo de corriente	20 mA- 240mA	45 mA – 80mA
Memoria Flash	4MB	32MB
SRAM	520KB	2KB
Memoria EEPROM	-	1KB
Velocidad de reloj	80/160 MHz	16MHz
Longitud	52mm	69mm
Ancho	31mm	53mm
WIFI/Bluetooth	Si	No
Entradas analógicas	18 (3.3V, 12bit: 4096, tipo SAR, ganancia programable)	6 (5.0V, 10bit: 1024)
Precio aproximado	$ 10	$ 20
Conector USB	Tipo A	Tipo B

Se procedió a trabajar con la placa ESP32-Node MCU, por los siguientes motivos:

1. Se obtienen mayor resolución, el ESP32 por cada 1 byte detecta un voltaje de 0.80 mV y la placa de Arduino 4.88 mV.
2. La placa ESP32 es mucho más económica.
3. El tamaño es menor de la ESP32 que el Arduino.
4. EP32 consume menos corriente.

Tercera parte. Para la detección de señales se evalúo la posibilidad de adquirir un fotodetector más filtros ópticos de diferentes longitudes de onda, pero sus precios son demasiados caros. Entonces se propuso trabajar con LED de forma inversa como lo hace el Calitoo, eligiendo un LED RGB de cátodo común o varios LEDs (diámetro de

5mm) que emiten solo un color (blue, green o red). Además, se pueden utilizar cualquier LED de la misma forma y tamaño de similar a los antes mencionados en diferentes rangos de longitud de onda.

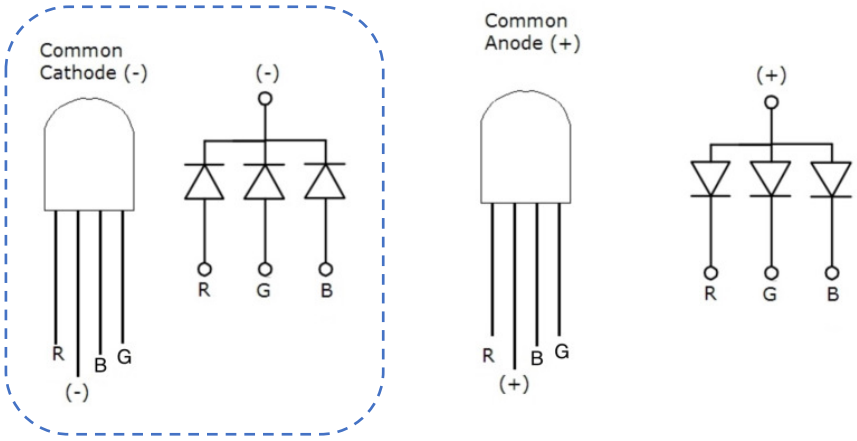


Figura 4.1. LED RGB con cátodo común y ánodo común. Fuente: Zaragoza, 2018.

Se utilizo el LED RGB con cátodo en común de forma inversa, haciendo que no emita radiación y es su reemplazo empiece a detectar radiación mediante los 3 diodos de diferente longitud de onda que contiene.

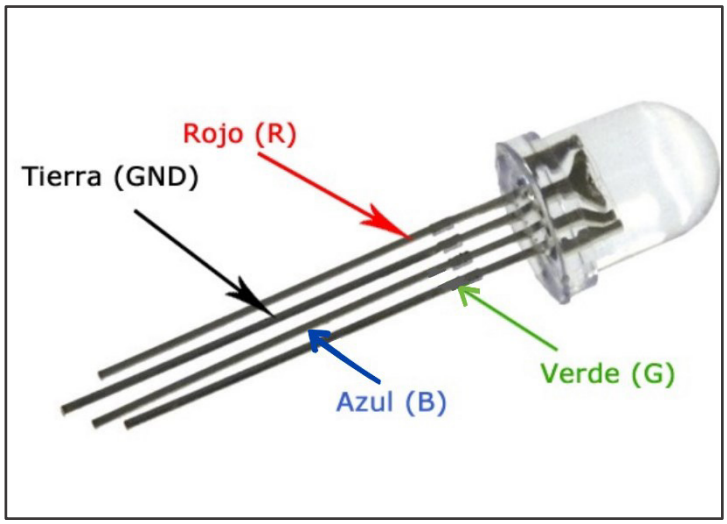


Figura 4.2. LED RGB con cátodo común y sus patas correspondientes a cada color (longitud de onda). Fuente: Zaragoza, 2018.

Cuarta parte. Para solo detectar la luz directa del sol que llega al fotodiodo del SOLAR.P, se investigó y diseño un colimador similar al que se usa en el Fotómetro CIMEL-318 de la NASA. Este colimador limita el acceso de la radiación solar solo a la radiación directa, la cual llega atravesando discos u orificios muy pequeños.

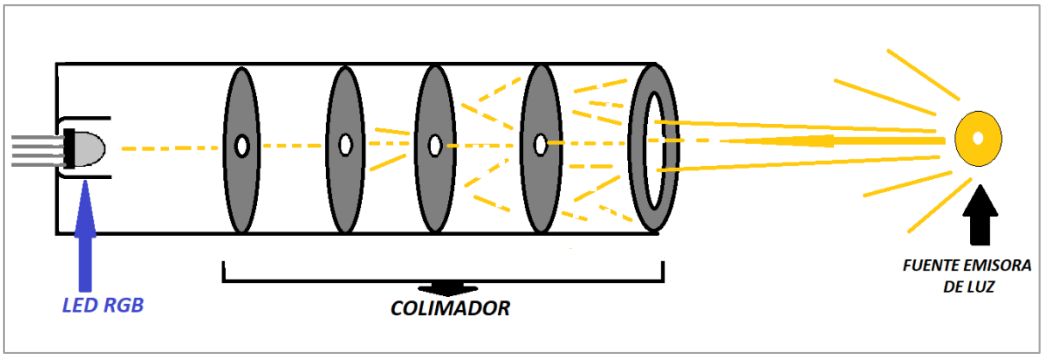


Figura 4.3. Esquema de funcionamiento de un colimador. Fuente: Propia.

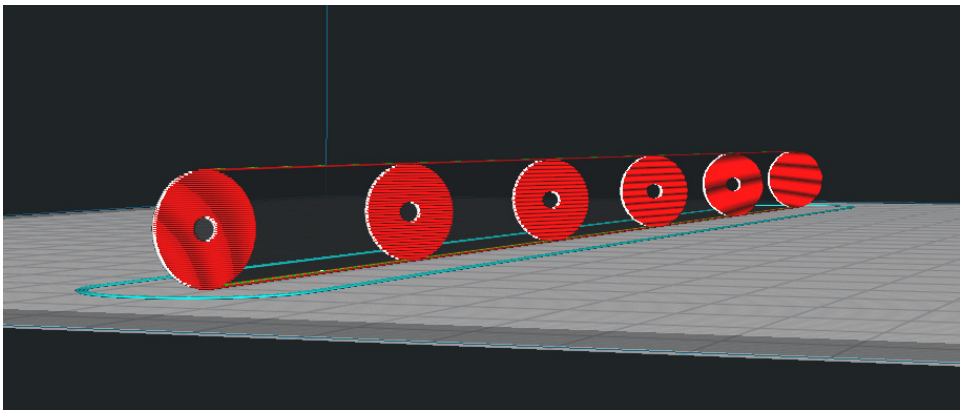


Figura 4.4. Tubo colimador de 5 discos diseñado en Fusion360. Fuente: Propia.

Los LEDs medirán la radiación directa que entra por el colimador con un ángulo (ϑ), debido ser el ángulo el menor posible para obtener una mejor lectura en el AOT.

Se toma como un punto inicial la ubicación del LED y como punto final el centro del disco último del colimador, esa distancia es D. El diámetro del disco interno será d.

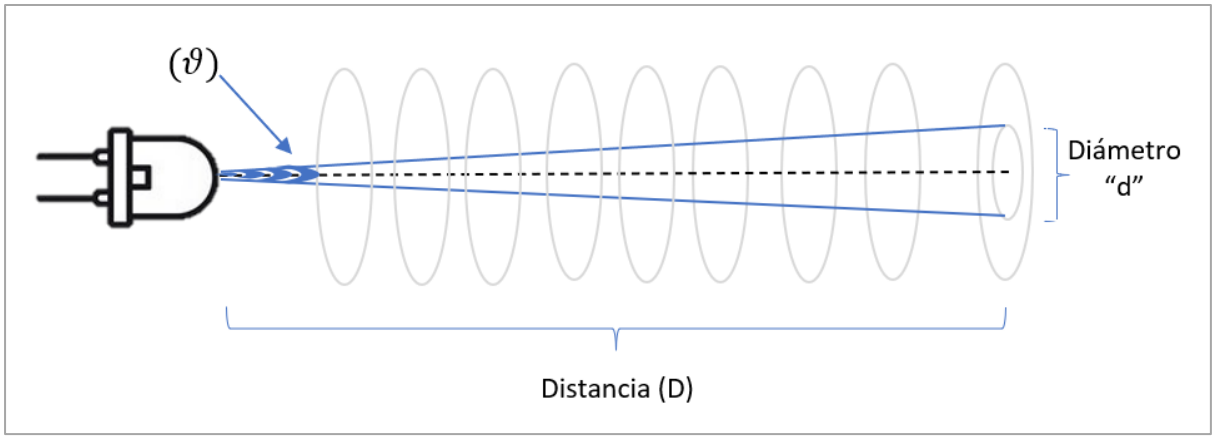


Figura 4.5. Esquema para calcular el angulo (ϑ) del ingreso de la radiación solar directa. Fuente: Propia.

El ángulo ϑ, se calcula del siguiente modo:

$$d = 2 * R * sen\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \quad (4.1)$$

Donde R, es:

$$R = \sqrt{D^2 + (d/2)^2} \quad (4.2)$$

$$\vartheta = 2 * ArcSen\left(\frac{d}{2R}\right) \quad (4.3)$$

4.1. Componentes Electrónicos

1. Una placa electrónica ESP32

DEVKIT V1 NODEMCU-32 es una placa electrónica de prototipado rápido muy potente con tecnología IoT. Utiliza diferentes protocolos inalámbricos como: BLE, WiFi y Bluetooh. Posee un procesador CPU de 32-bit con dos núcleos – hasta 240Mhz. El ESP32 permite desarrollar aplicaciones en diferentes lenguajes de programación, frameworks, etc. Existen placa con 32 y 38 pines. En esta oportunidad trabajaremos en Arduino Uno y PlatformIO.

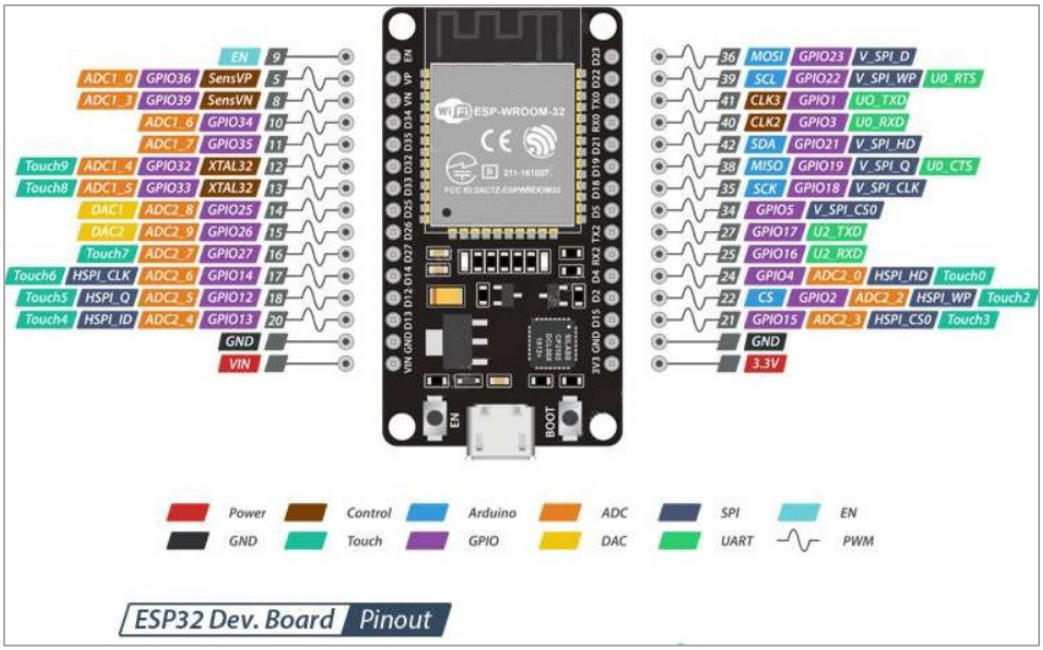


Figura 4.6. Tipos de entradas y salidas del ESP32 de 32 pines. Fuente: ESP32, módulo ESP32-WROOM GPIO Pinout, 2022.

2. LED RGB o LED normal

Los diodos emisores de luz funcionan para emitir radiación en diferentes rangos de longitud de onda en el espectro electromagnético, pero también funcionan como un fotosensor. Los LEDs normal de un solo color (Blue, Green, Red, etc.) pueden detectar solo una longitud de onda, en cambio los LED RGB pueden detectar tres longitudes de onda a la vez.

Características de un LED RGB:

- Common Anode
- Dimensions:5mm
- Emitting Color: red green blue
- Pin spacing: 1mm

	Forward Voltage(V)	Forward Current(mA)	Luminous Intensity(mcd)	Dominant Wavelength(nm)
RED	1.8-2.0	<30	1000-1200	630-640
GREEN	3.2-3.4	<30	3000-5000	515-524
BLUE	3.2-3.4	<30	2000-3000	465-475

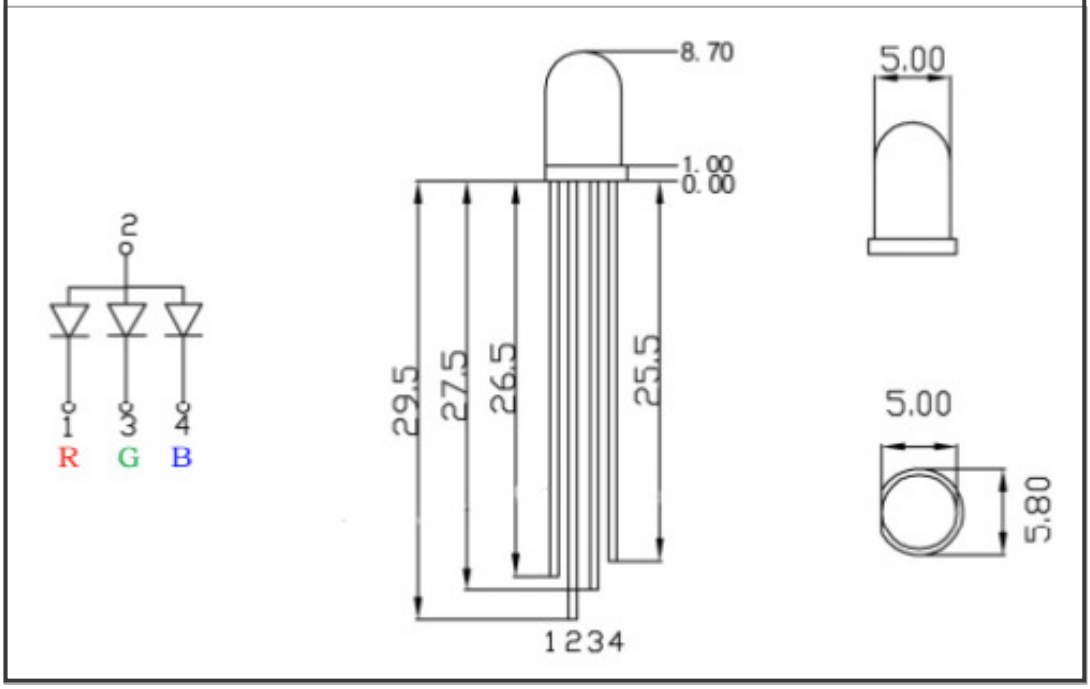


Figura 4.7. Medidas de la estructura de un LED RGB con cátodo común. Fuente: Shenzhen2u, 2022.

Los tres LEDs ubicados al interior de un LED RGB, comúnmente no se encuentran en el centro como se observa en la figura 4.8, lo cual puede afectar en las medidas de la radiación directa si se quiere ser preciso, aunque en algunos casos se puede despreciar.



Figura 4.8. Ubicación de los tres LEDs encapsulados en el LED RGB. Fuente: Fernandez, 2022.

3. Un sensor de presión BME280 o BMP280

BMP280 es un sensor de presión barométrica, mide la atura respecto al nivel del mar, presión atmosférica y temperatura, posee un bajo consumo y alta precisión en sus medidas.

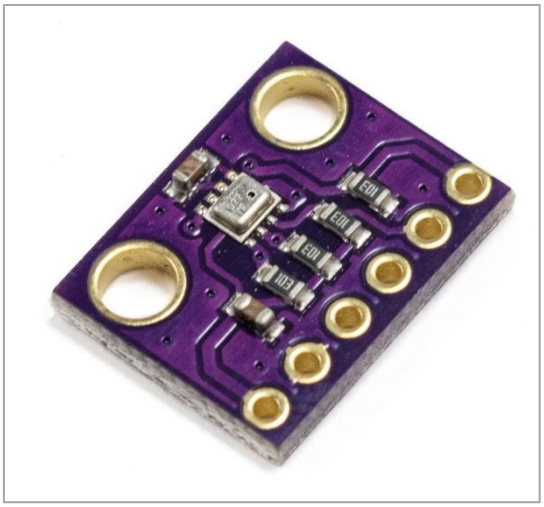


Figura 4.9. Sensor BMP280. Fuente: Sensores, s.f.

4. Un Módulo ADC ADS1115

ADS1115 te permite convertir señales analógicas a digitales (ADC), basado en un conversor de 16 bits de resolución y permite leer 4 señales individuales. Tiene una ganancia programable que puede leer señales hasta 256mV. Transmite los datos digitales mediante el bus I2C. Dirección por defecto I2C: 0x48.

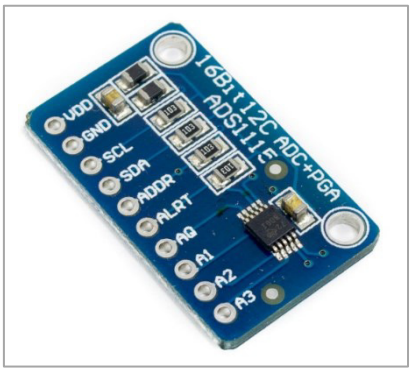


Figura 4.10. Modulo ADC ADS1115. Fuente: Sensores, s.f.

5. AD620 – Módulo Amplificador de instrumentación

El módulo AD620 amplifica una señal pequeña de voltaje ajustando la ganancia mediante un potenciómetro en el módulo. Es ideal cuando la señal recibida es menor a 1V. Además, te permite ajustar el Zero y posee un bajo offset. Tiene una amplificación de señal de 1.5x – 1000x.

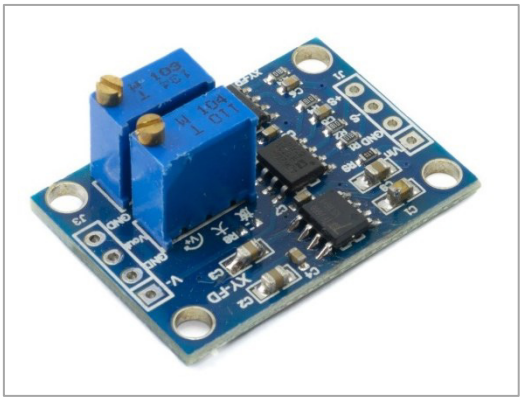


Figura 4.11. Amplificador instrumental – Modulo AD620. Fuente: Sensores, s.f.

6. Otros materiales:
    - Cable USB Tipo A
    - Piezas de la carcasa de Solar.P
    - Tubo termo-contraíble
    - Cables delegados
    - Pilas recargables 3.8V
    - Diodos, resistencias y capacitores.
    - Switch de encendido/ apagado

4.2. Integración de componentes electrónicos

Para construir la placa principal se utilizó los componentes electrónicos antes mencionados, llegando a tener dos placas electrónicas, una más económica que otra. La **Placa N° 1** tiene las dimensiones de 5.5 cm x 2.8 cm x 1.4 cm y su esquema electrónico es el que se muestra en la figura 4.12. La **Placa N°2** posee unas dimensiones de 9 cm x 9.5 cm x 4.5 cm y esta es mucho mejor en diferentes aspectos que se expresaran en los siguientes capítulos, pero a su vez su costo es elevado, su esquema electrónico se observa en la figura 4.13. Ambas placas pueden funcionar con conjunto de un LED RGB y un LED (cualquier color) o 4 LEDs solamente.

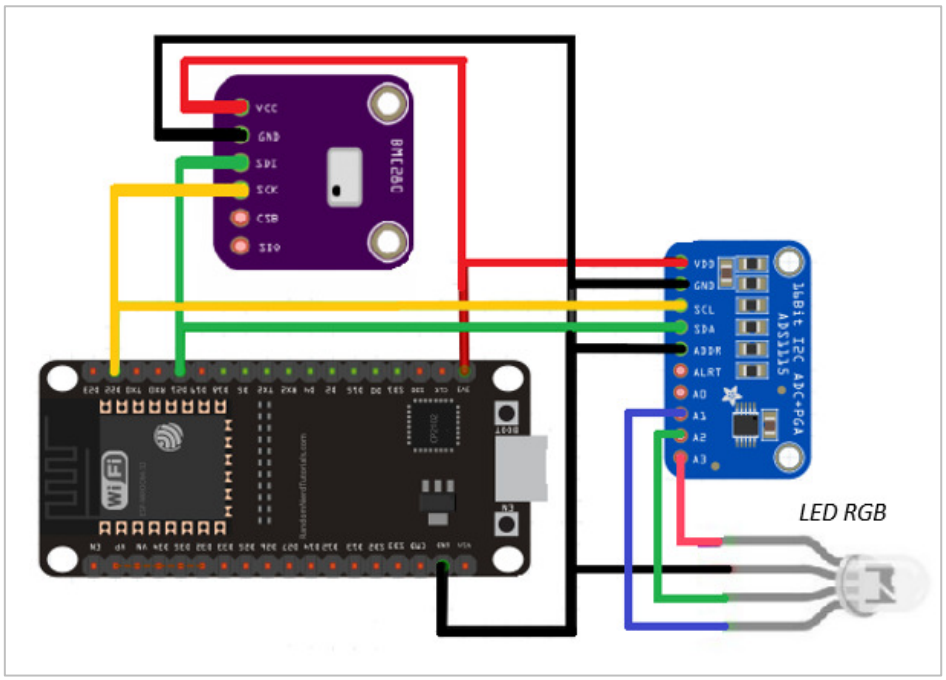


Figura 4.12. Esquema electrónico de la placa N° 1, con un sensor BMP 280 y ADS1115, utilizando como fotosensor un LED RGB. Fuente: Propia.

Los componentes electrónicos se ensamblaron como se muestra en la figura 4.12 para el primer dispositivo de prueba, donde se observan el módulo BME280 (color morado) y ADS1115 (color azul), utilizando un LED RGB o 3 LEDs con rangos de longitudes de onda en el espectro visible.

En la figura 4.13, se añade algunos componentes al esquema anterior con la finalidad de mejorar las lecturas de radiación. Los componentes agregados son: 4 Módulos AD620, un LM7805, 2 capacitores (10 uF y 1 uF), un diodo 1N4007, un interruptor deslizante, dos baterías de 3.8V y 4 LEDs de diferentes rangos de longitud de onda.

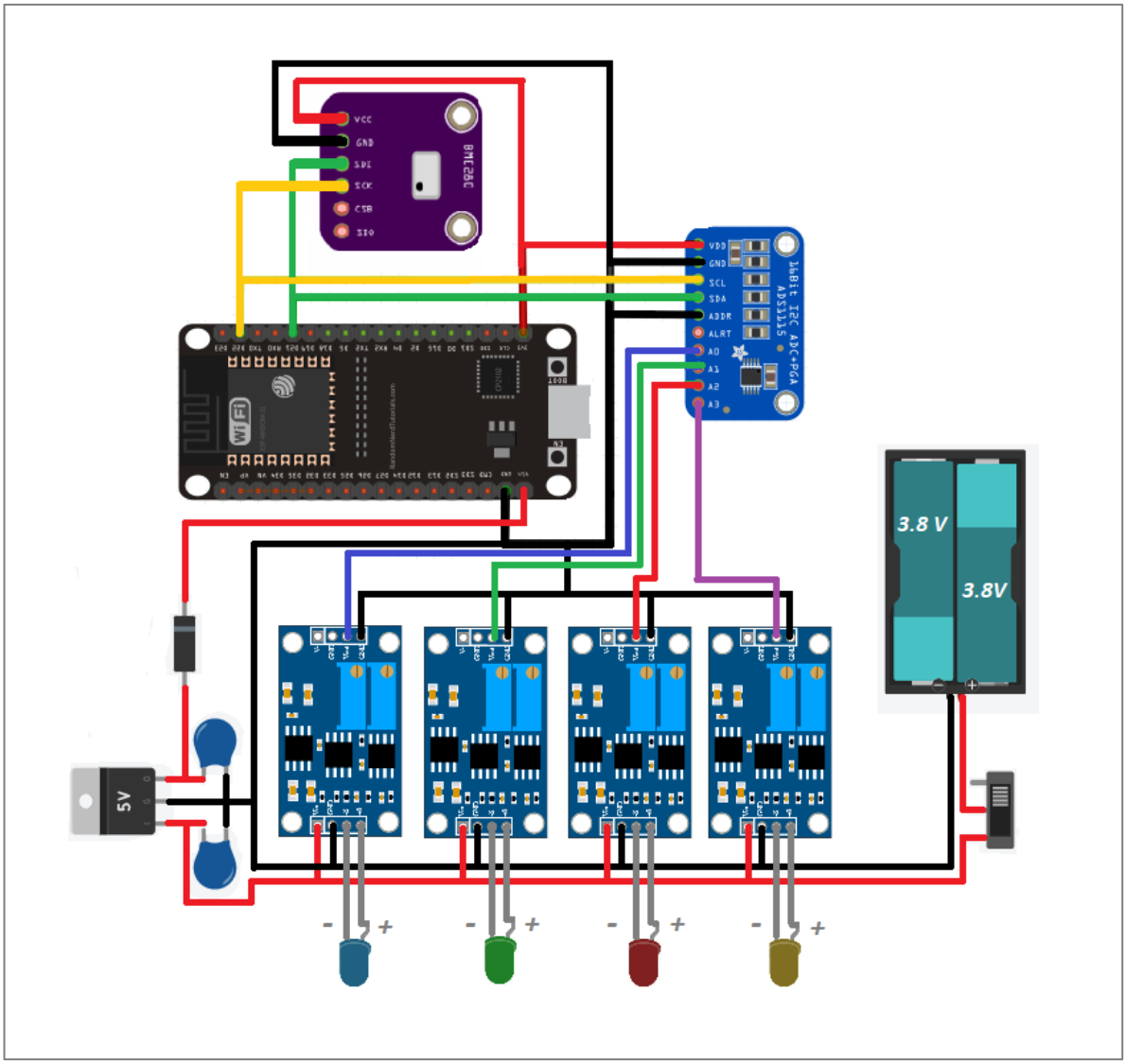


Figura 4.13. Esquema electrónico de la placa N°2, con un ADS1115, un BMP280, cuatro AD620 y cuatros LEDs de diferentes rangos de longitud de onda. Fuente: Propia.

4.3. Diseño del Solar.P en 3D

Para el diseño de las piezas en 3D, se utilizó el software de Fusion360 (Versión 2.0.13152; Autodesk:2022), donde se elaboró dos diseños, uno correspondiente a cada placa electrónica con diferentes características.

4.3.1. Diseño para Placa electrónica N°1

Se elaboraron 4 piezas que encajaran y permitieran aislar el LED RGB de toda la luz exterior. Además, el diseño que se desarrollo tiene la propiedad de poder filtrar la luz indirecta que llega del sol y solo permitir la luz directa que llegue al LED RGB, mediante un colimador de 10 cm, con disco que tienen un hueco interior de un diámetro común.

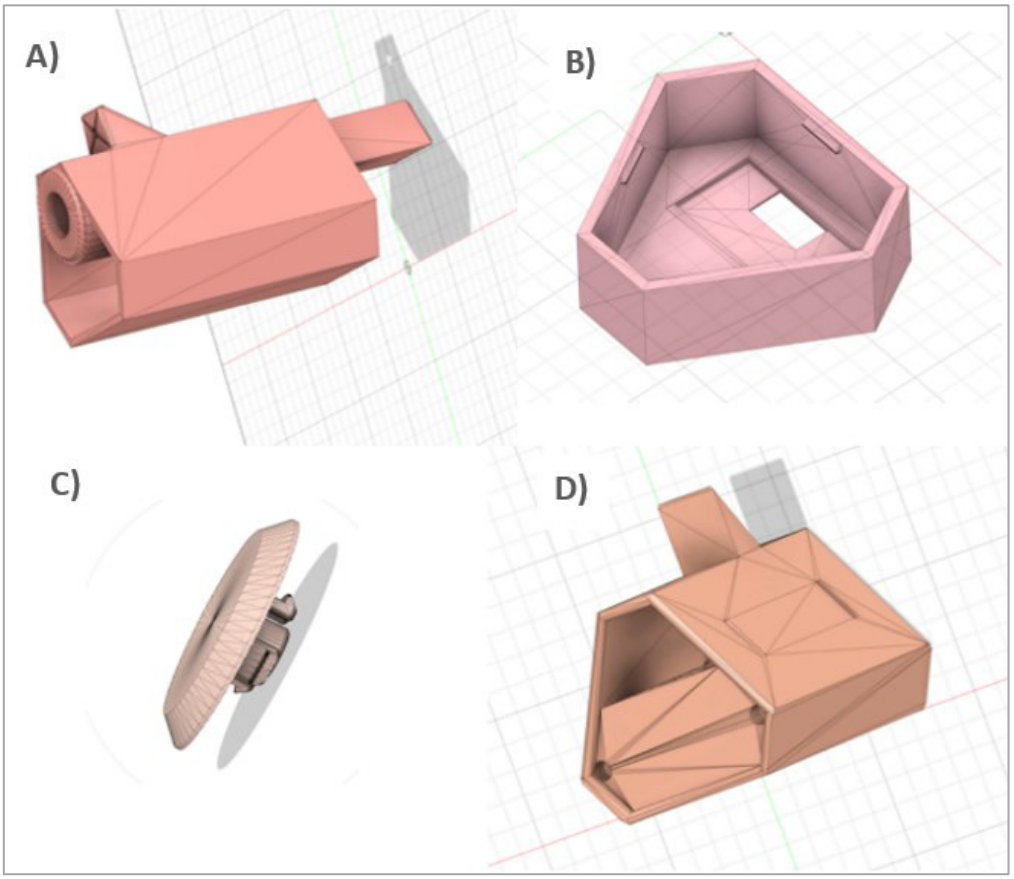


Figura 4.14. Piezas diseñadas en Fusion360 para la placa N°1. A) Tronco-colimador 5mm de diámetro del hueco de los discos internos. B) Tapa trasera del tronco principal. C) Tapa delantera del colimador. D) Tronco principal para contener la placa electrónica. Fuente: Propia.

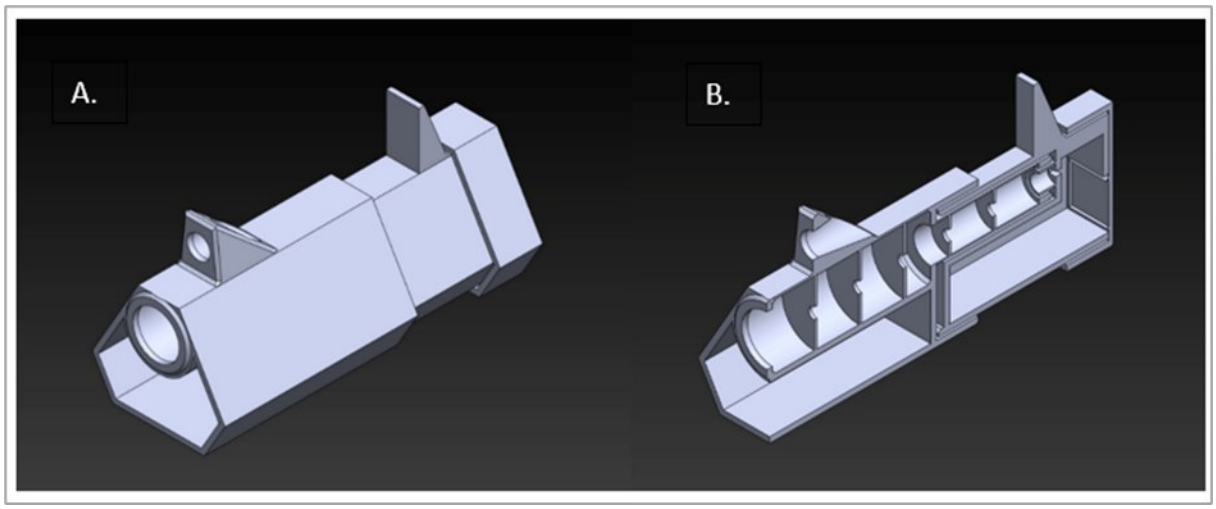


Figura 4.15. Estructura del fotómetro solar desarrollado para la placa N°1, con un LED RGB y un colimador de 5mm. Fuente: Propia.

Las piezas se guardaron en un formato ".STL" y se utilizó el software Ultimaker Cura (versión 4.12.1) para imprimir las piezas en 3D.

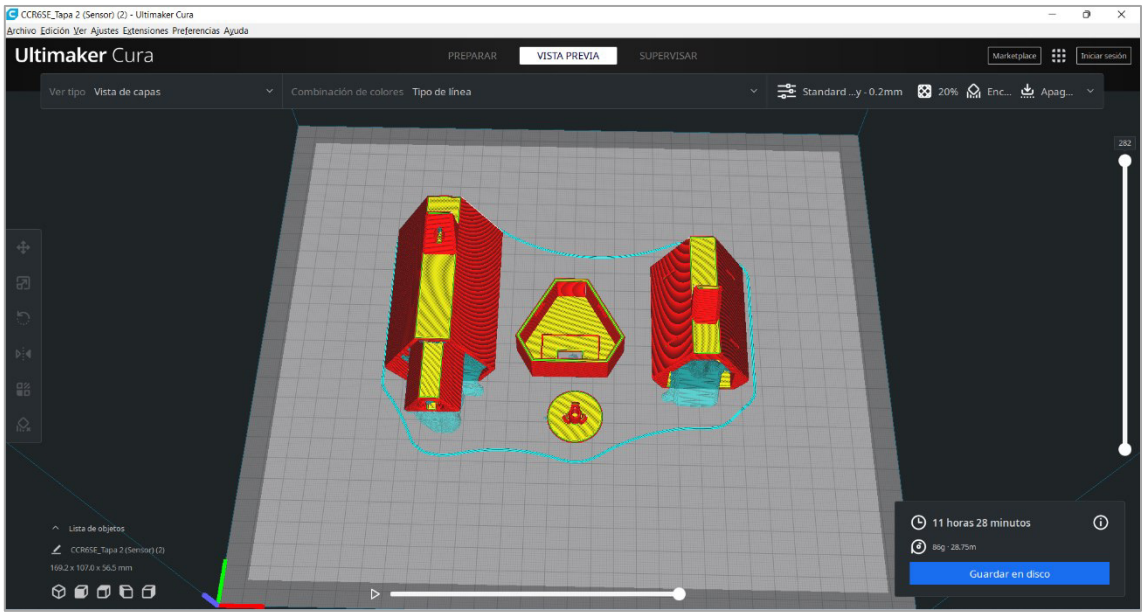


Figura 4.16. Piezas exportadas a Ultimaker Cura para obtener el archivo "PLN1. STL". Fuente: Propia.

4.3.2. Diseño para Placa electronica N° 2

Se elaboro 3 piezas para aislar los 4 LEDs de la luz del exterior y con un sistema de mira óptica compuesta de 2 piezas como se observa en la Figura 4.17. Además, la placa principal con todos los sensores se ensambló en una caja de aluminio de 10 cm x 10 cm x 5 cm.

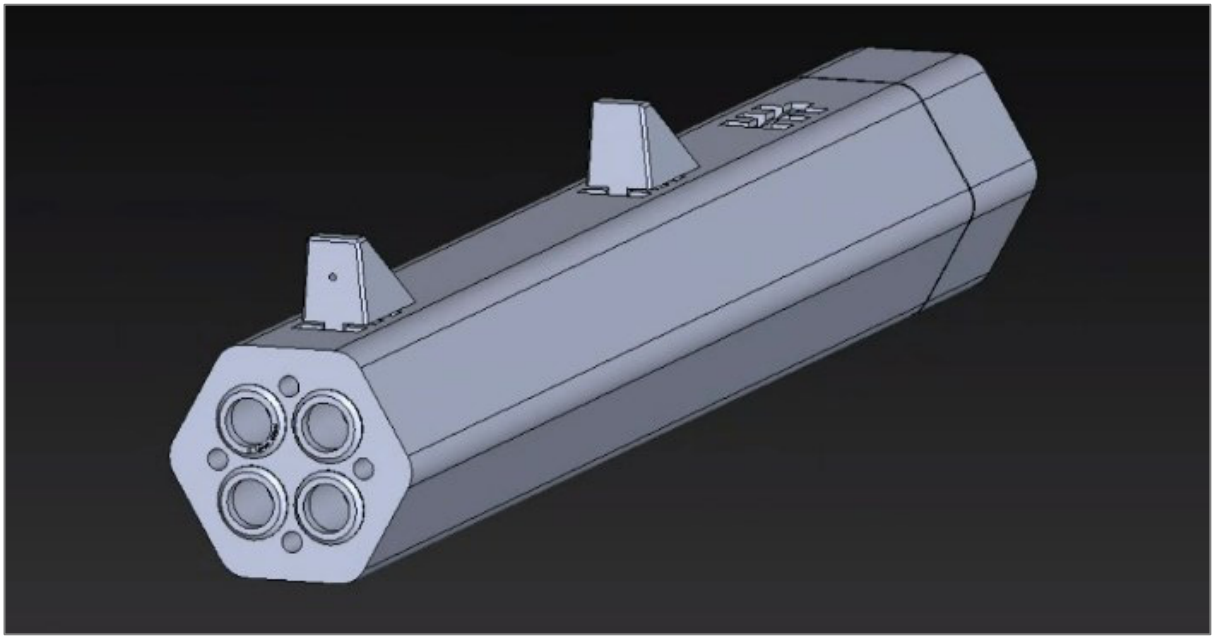


Figura 4.17. Estructura del fotómetro desarrollado para la placa N°2. Fuente: Propia.

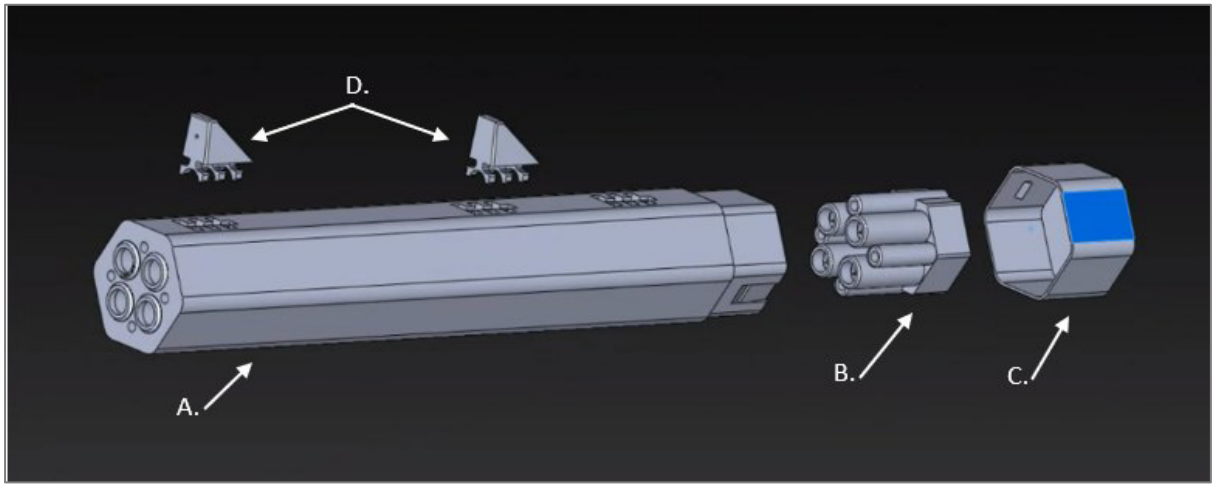


Figura 4.18. Fotometro desarrollado en piezas. A) Colimador de 15 cm. B) Portador de cuatro LEDs. C) Tapa para sellar completamente el instrumento. D) Sistema óptico para indicar al sol y obtener información sobre donde apuntar. Fuente: Propia.



Figura 4.19. Caja para contener la placa N°2 del fotómetro desarrollado. Fuente: Sensores, s.f.

Respecto al diámetro del interior de los discos del colimador en ambos diseños, imprimieron piezas con diferentes diámetros, lo cual afecto en el ángulo de ingreso de la radiación solar directa (ϑ), siendo los siguientes:

Tabla 4.1. Relación del diámetro con el ángulo de ingreso de la radiación solar directa, con un colimador de 10 cm. Fuente: Propia.

Diámetro del hueco interno de los discos -Colimador de 100 mm	$\vartheta\ (grados)$
5 mm	2.864
4 mm	2.292
3 mm	1.719
2 mm	1.146
1.5 mm	0.859
1 mm	0.573

Tabla 4.2. Relación del diámetro con el ángulo de ingreso de la radiación solar directa, con un colimador de 15 cm. Fuente: Propia.

Diámetro del hueco interno de los discos -Colimador de 150 mm	$\vartheta\ (grados)$
5 mm	1.910
4 mm	1.528
3 mm	1.146
2 mm	0.764
1.5 mm	0.573
1 mm	0.382

Para la impresión de las piezas de ambos diseños, se utilizó una impresora 3D de modelado por deposición fundida o también conocida como “Fused Deposition Modeling” (FDM), modelo CREALITY CR-5 PRO H con una boquilla de diámetro de 0.4 mm. Esta máquina puede imprimir en diferentes materiales como son PLA, ABS, PETG, Wood, TPU, HIPS, Nylon (PA) y PC.

Las piezas inicialmente fueron impresas con filamento de ácido poliláctico (PLA) para verificar su funcionamiento y encaje de las piezas. Al final se escogió el filamento de Acrilonitrilo Estireno Acrilato (ASA) de la familia del ABS para imprimir las piezas. Se escogió ese filamento debido a resistencias a temperaturas altas (95° C) y a la radiación ultravioleta.



Figura 4.20. Impresora FDM 3D - Modelo CREALITY CR-5 PRO H. Fuente: Propia.

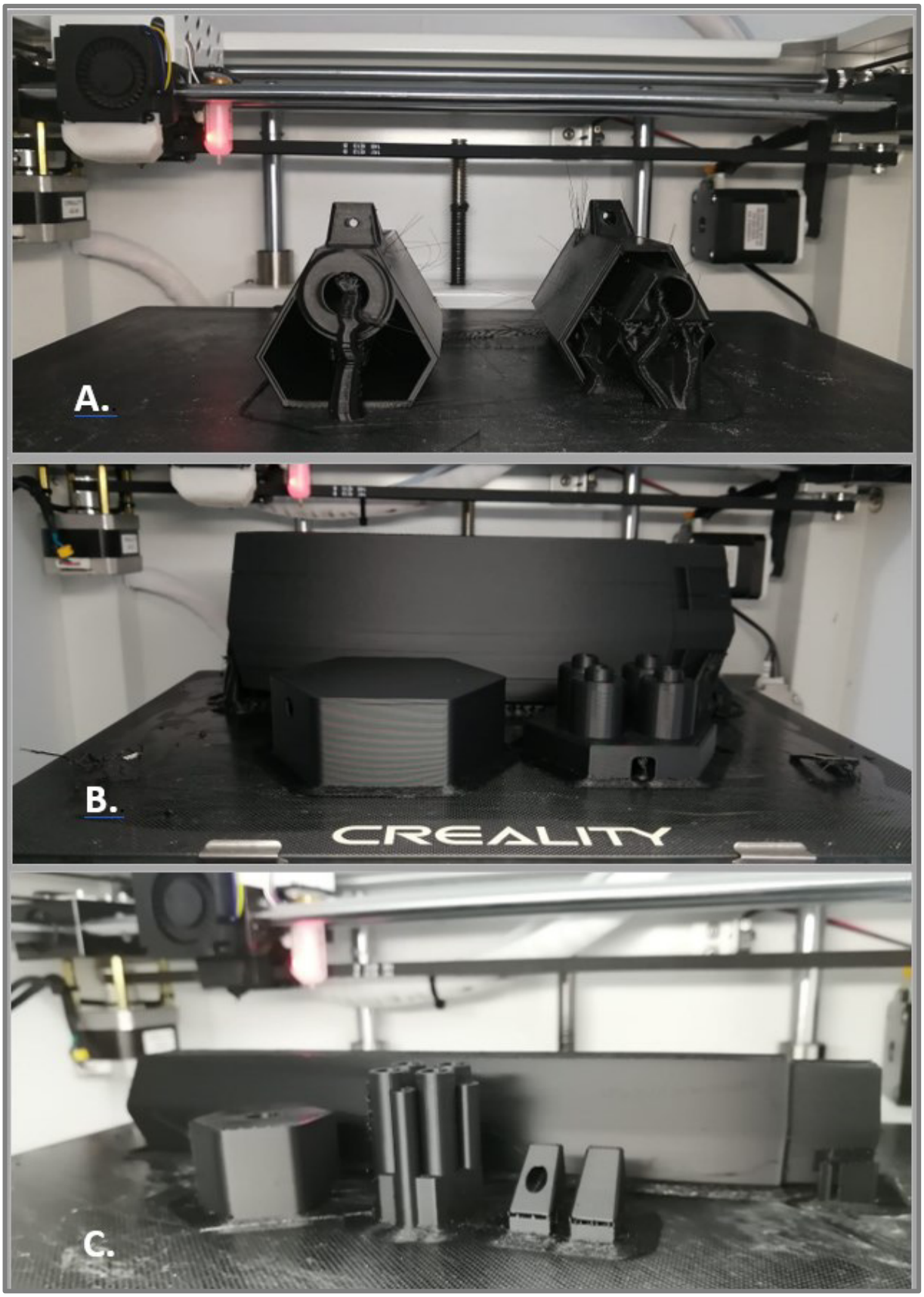


Figura 4.21. Estructuras impresas en material ASA para la placa N°1 y placa N°2. Fuente: Propia.

4.4. Ensamblaje de la placa electrónica con la estructura

Una vez lista la placa electrónica y las piezas de la estructura del dispositivo, se procedió al armado del fotómetro solar con la placa electrónica N°1, de la siguiente manera:

1. Se suelda a las patas del LED RGB con 4 cables, 1 en cada pata. Seguidamente, los cables se pasan por el orificio (del Tronco para la placa) que fue diseñado para que el LED entrara.
2. Los 4 cables, se soldarán en la placa como se explicó en el esquema electrónico anterior (figura 4.12).
3. El conector tipo A del cable USB, se introducirá por la pieza N°4 y debe llegar conectar con la placa principal.
4. Seguidamente se conectan las 4 piezas como se muestra en la figura 4.21.

Finalmente, se obtuvo el dispositivo desarrollado, con un diámetro interno del colimado de 5mm, 4mm, 3mm y 2mm. El fotómetro desarrollado tiene la capacidad de si se desea cambiar de diámetro interno del colimador, solo se debe cambiar la pieza N°2.

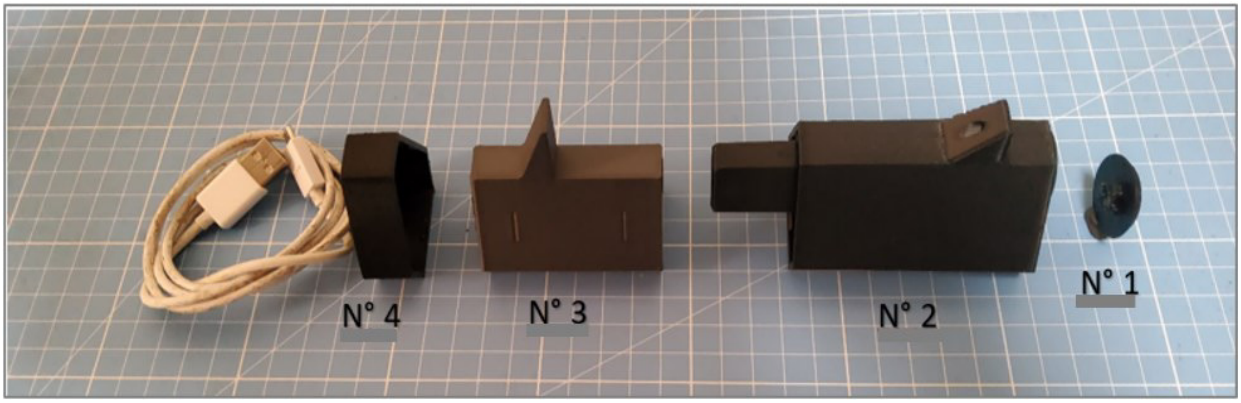


Figura 4.22. Piezas del fotómetro solar para la placa N°1. Fuente: Propia.

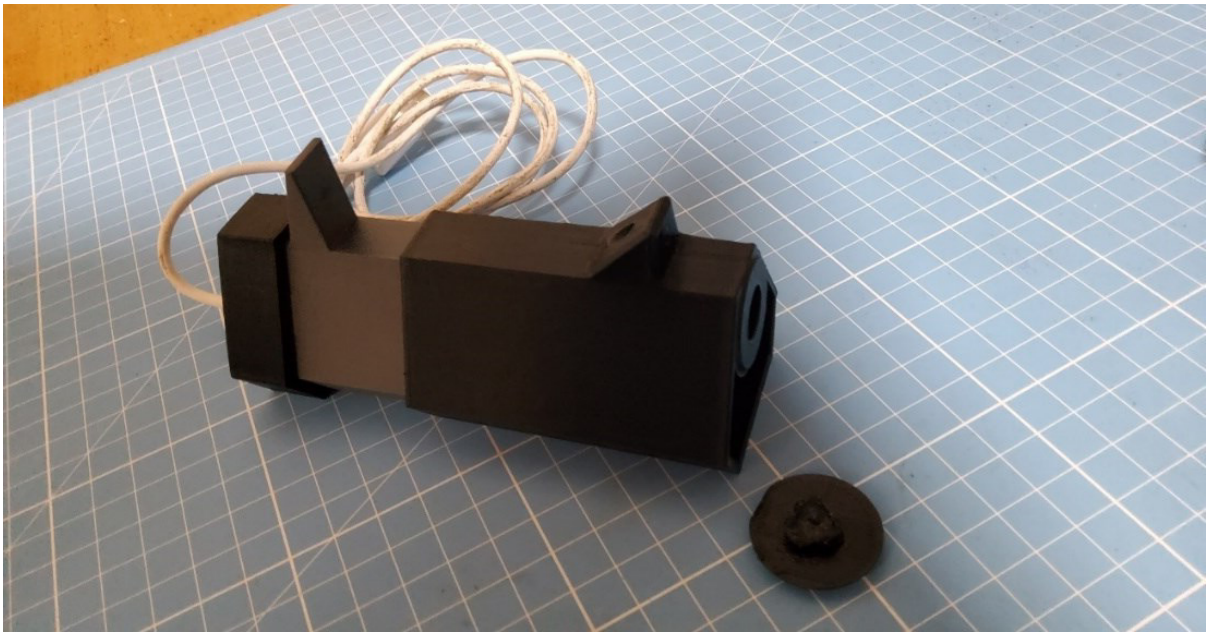


Figura 4.23. Fotómetro solar desarrollado con la placa N° 1, con un LED RGB como fotosensor. Fuente: Propia.

Para ensamblar la placa electrónica N°2 en su estructura, se procede de la siguiente manera:

1. Se suelda un cable delgado de 10 cm de largo en cada pata de los 4 LEDs. Después, se posee a ingresar los cables del LED en la pieza B. de la figura 4.17.
2. Se sella la parte trasera de la pieza B. con silicona negra.
3. Los cables salientes de las LEDs, se sueldan a unos cables largo con conectores.
4. Se cierra el fotómetro con la pieza C y A, también se instalan el sistema óptico superior piezas D de la Figura 4.17.
5. La caja de aluminio que contendrá la placa electrónica N°2, tendrá un hueco para el interruptor de encendido/apagado, 2 para el ingreso de los cables que llegan de los LEDs y 1 para el cable USB, como se muestra en la figura 4.22.

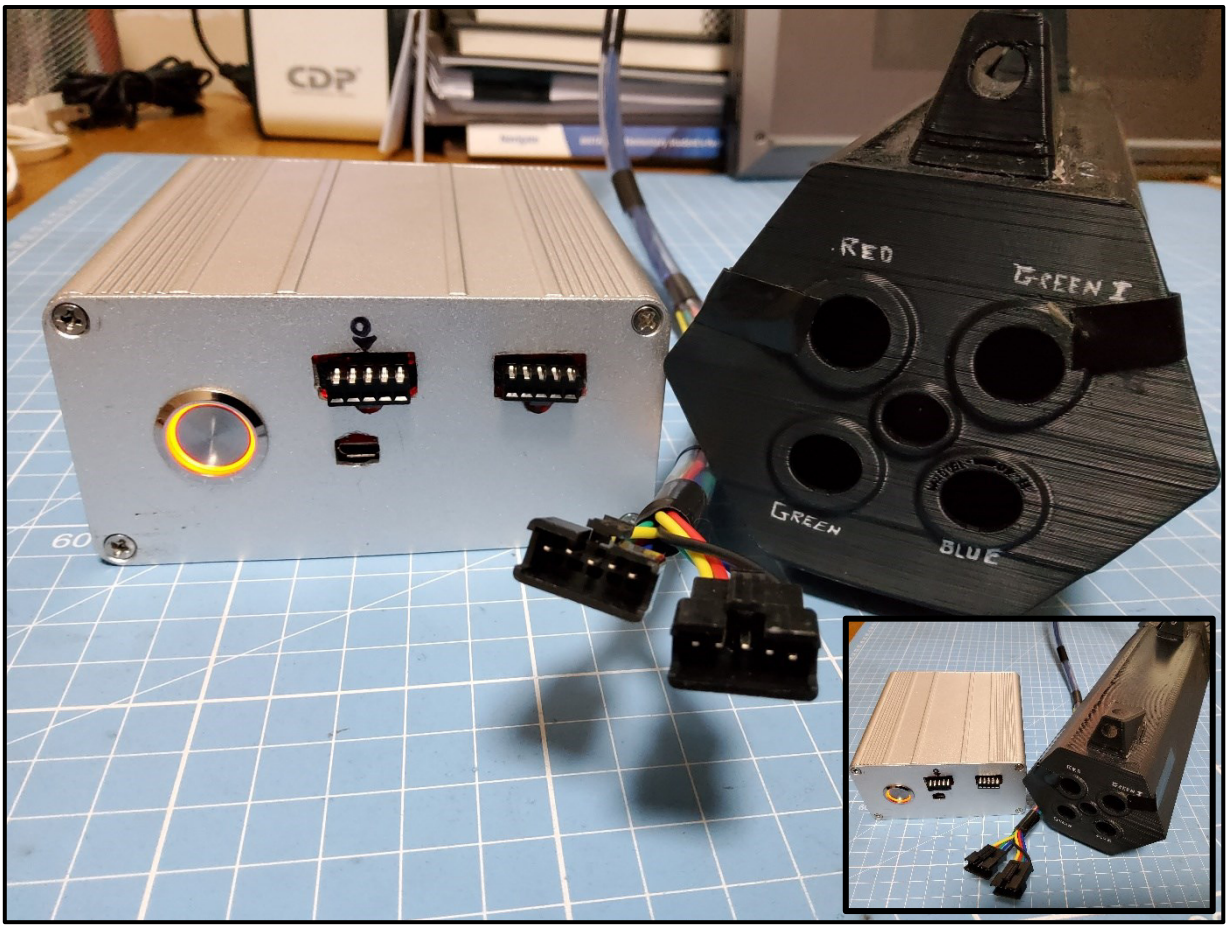


Figura 4.24. Fotometro desarrollado con la placa electronica N°2, con diametro interno del disco de 5 mm. En la caja de aluminio se tiene toda la electronica a excepcion de los fotosensores (cuatro LEDs). Fuente: Propia.



Figura 4.23. Fotómetro desarrollado con la placa electrónica N°2, con diámetro interno del disco de 1 mm y 4 LEDs. Fuente Propia.

4.5. Desarrollo del algoritmo del Photometer

El algoritmo para ambos dispositivos fue desarrollado en el software de Arduino debido a su acceso libre y, además, por que posee una gran cantidad de usuarios que le dan soporte a las librerías y apoyan a nuevos desarrolladores.

En el algoritmo, se utilizó las respectivas librerías de cada módulo, siendo las siguientes:

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>
#include <SPI.h>
#include <Adafruit_ADS1X15.h>
```

Recomendación: Se aconseja seguir el siguiente video, en caso de presentar error en la lectura del módulo BMP280.



Enlace: https://www.youtube.com/watch?v=LtZ_b2WVMrU

También se utilizó un filtro pasa bajo para filtrar el ruido externo que llegue al dispositivo. Se escogió el modo de ganancia de 2x del módulo ADS1115.

```
                                                          ADS1015          ADS1115
//ads.setGain(GAIN_TWOTHIRDS); // 2/3x gain (default)    +/- 6.144V   1 bit = 3mV     0.1875mV
//ads.setGain(GAIN_ONE);       // 1x gain                +/- 4.096V   1 bit = 2mV     0.125mV
ads.setGain(GAIN_TWO);         // 2x gain                +/- 2.048V   1 bit = 1mV     0.0625mV
// ads.setGain(GAIN_FOUR);     // 4x gain                +/- 1.024V   1 bit = 0.5mV   0.03125mV
// ads.setGain(GAIN_EIGHT);    // 8x gain                +/- 0.512V   1 bit = 0.25mV  0.015625mV
// ads.setGain(GAIN_SIXTEEN);  // 16x gain               +/- 0.256V   1 bit = 0.125mV 0.0078125mV
```

Para recibir las señales o datos que envían los dos módulos, se utilizó la comunicación mediante el protocolo Inter Integrated Circuit (I2C), el ESP32 tienes dos interfaces de bus I2C, permitiendo servir como maestro o esclavo I2C. Se uso la comunicación de múltiples

dispositivos I2C, teniendo el mismo bus, pero diferentes direcciones, llegando a utilizar los pines 21(SDA) y 22(SCL).

Para un correcto envió de datos por el protocolo I2C, cada módulo tiene una dirección I2C comúnmente diferente. Para obtener la dirección de cada módulo, se compilo el algoritmo del **Anexo 1**, que permite obtener automáticamente las direcciones I2C de los módulos conectados. Una vez subido el algoritmo al ESP32, se procede a abrir el monitor serie, y visualizara algo similar a lo figura 4.24.

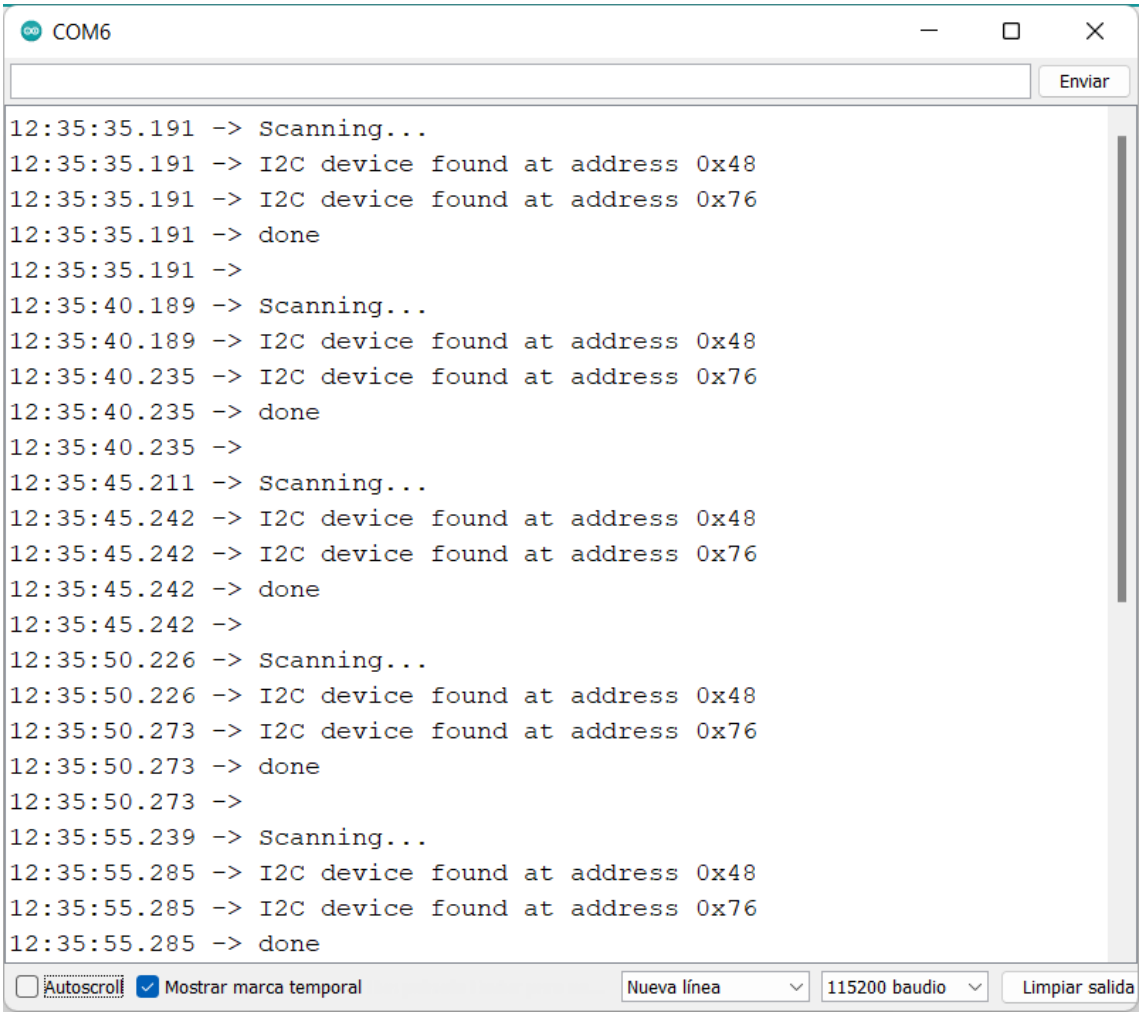


Figura 4.25. Escaneando las direcciónes I2C de los módulos conectados al ESP32. Se visualiza mediante el monitor serial. Fuente: Propia.

En la figura 4.24 se observa dos direcciones I2C las cuales son:

Modulo ADS1115 --------- 0x48

Modulo BMP280 --------- 0x76

Una vez obtenido las direcciones I2C respectivas a cada módulo, al algoritmo principal se agregará las siguientes líneas de código, con el objetivo de que la placa ESP32 reciba correctamente los datos de los dos módulos.

```
if (!ads.begin(0x48)){
  Serial.println("Failed to initialize ADS.");
  while (1);}


 Serial.println(F("BMP280 Forced Mode Test."));
 //if (!bmp.begin(BMP280_ADDRESS_ALT, BMP280_CHIPID)) {
 if (!bmp.begin(0x76)) {
  Serial.println(F("Could not find a valid BMP280 sensor, check wiring or ""try a different address!"));
  while (1);
  delay(10);}
```

Además, se agregó la funcionalidad para que al momento de ingresar el numero “1” por el monitor serie, al lado de los números se puedan visualizar los máximos valores de voltaje de cada longitud de onda leída y para desactivarlo se debe ingresa el numero “0” y el monitor serial volverá a la normalidad.

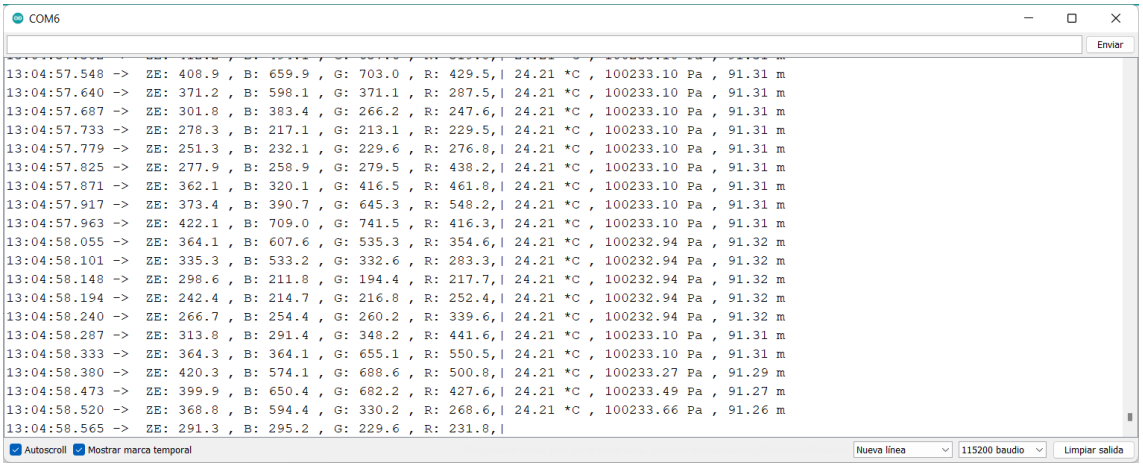


Figura 4.26. Monitor serie cuando se recién se inicia el algoritmo o se ingresó el numero “0”. Fuente: Propia.

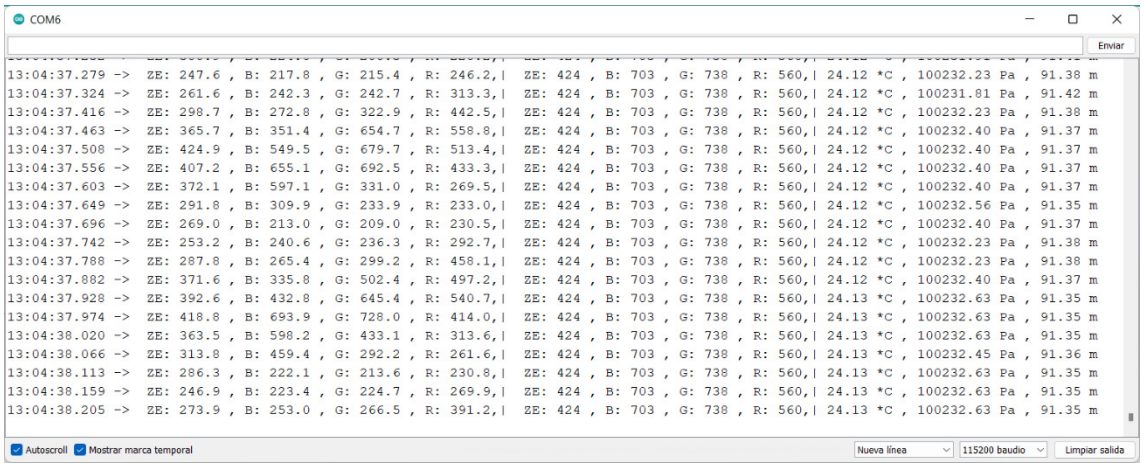


Figura 4.27. Se ingreso al monitor serie el numero “1”, evidenciándose los máximos voltajes detectados de cada longitud de onda. Fuente: Propia.

Seguidamente, se completa el algoritmo con las sentencias de los ejemplos de cada librería de los módulos, quedando el algoritmo final como en el **Anexo 2**.

Capítulo 5. Desarrollo del Solar Tracker para el Calitoo

5.1 Diseño del instrumento en 3D

Para comenzar con el diseño del Solar Tracker, se tomó como conocimiento base, diferentes trabajos e instrumentos desarrollados hasta la actualidad, teniendo como principal fuente la página de Instructables (https://www.instructables.com/Arduino-Sun-Tracker-Turret/). Una vez investigado y entendido su funcionamiento en la totalidad, se procedió hacer un boceto del instrumento, el cual se muestra en la Figura 5.1.

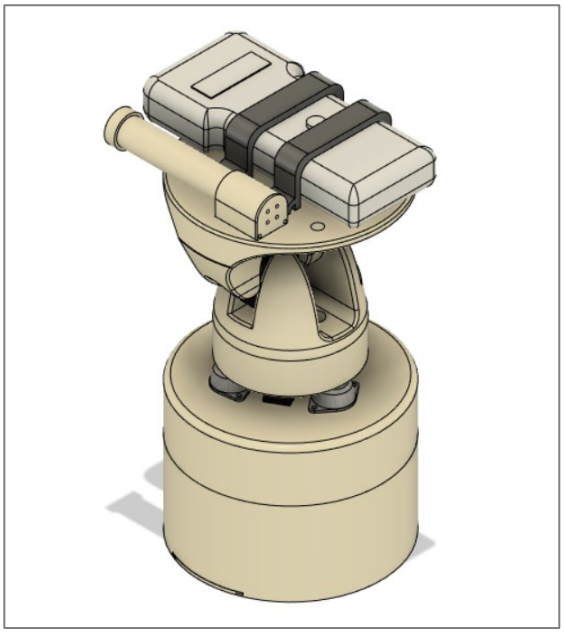


Figura 5.1. Primer esquema del Solar Tracker para el Calitoo. Fuente: Propia.

El cual, cuenta con tres niveles:

1. Primer nivel sirve para estabilizar el Solar Tracker.
2. El segundo nivel sirve para que la parte superior pueda girar en 180° (movimiento azimutal).
3. El tercer nivel ayuda para que el Calitoo puede elevar y bajar la mira en 180°.

Seguidamente, se empezó a desarrollar las 8 piezas en el software de Fusion360, como se observa en la Figura 5.2. Una vez terminado los primeros diseños, se observó que el instrumento de ser diseñado con la mira mediante un tubo, no funcionaría correctamente y,

además, su ubicación se encuentra un poco desplazado a la izquierda, trayendo consecuencias en las medidas.

Por tales motivos se diseñó una estructura que se acople a la parte superior del Calitoo como se visualiza en la Figura 5.4., la cual no afecte en sus medidas. El diseño conto con una mira de 10 cm al frente como se observa en la figura 5.3.

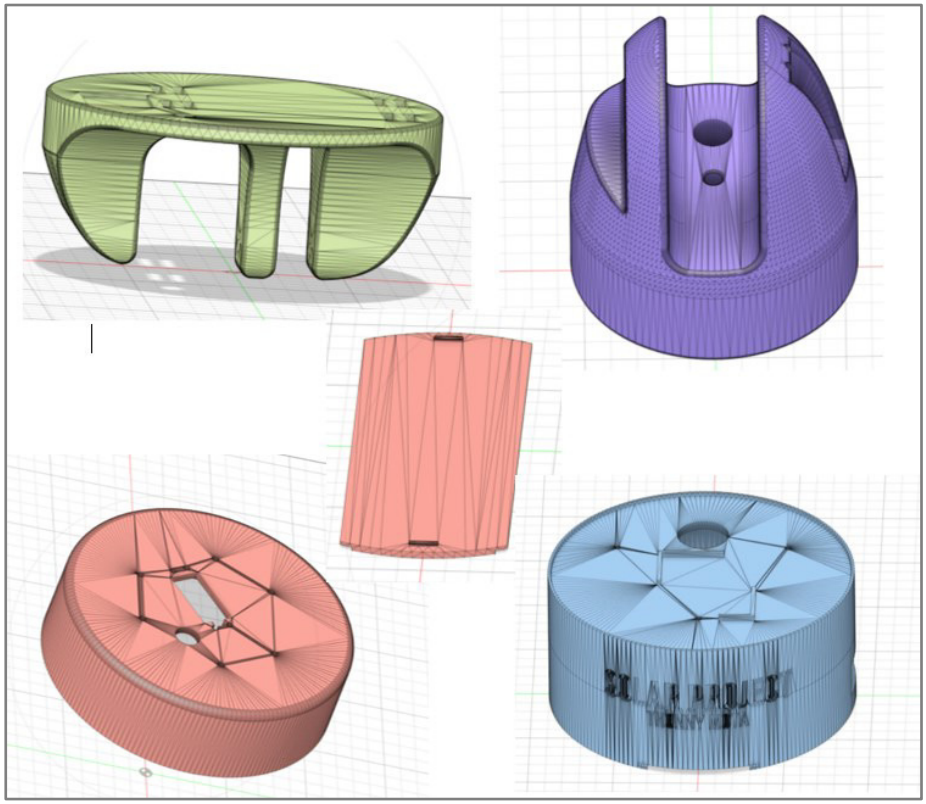


Figura 5.2. Piezas del Solar Traker. Fuente: Propia.

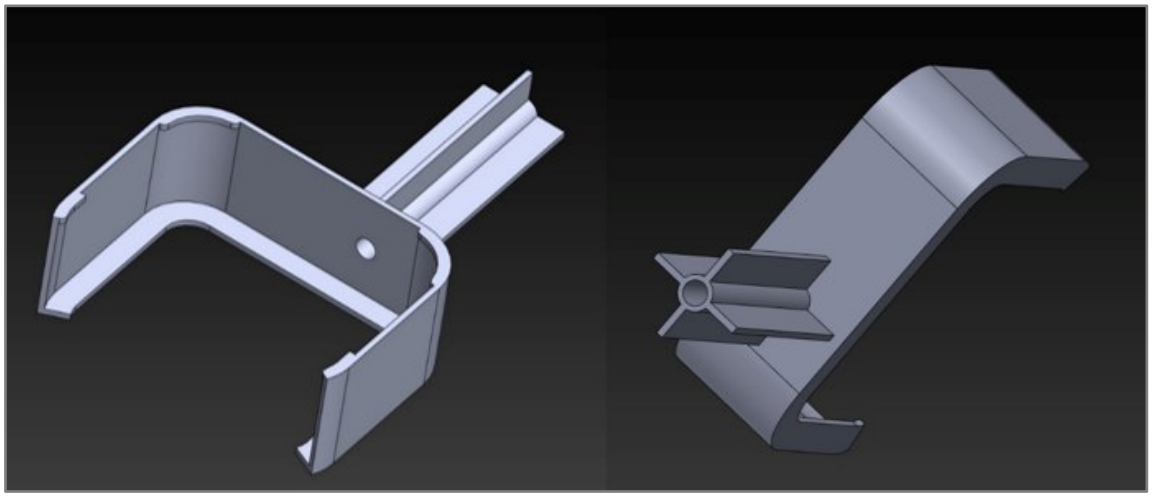


Figura 5.3. Pieza con mira de 10 cm para que se acople a la estructura del Calitoo. Fuente: Propia.



Figura 5.4. Pieza impresa en 3D, acoplándose a la parte delantera del Calitoo. Fuente: Propia.

5.2. Componentes electrónicos y materiales

- Arduino Uno
- 4 fotorresistencias LDR
- servomotor SG5010
- resistencias de 10 Kohm
- 1 rodamiento 105ZZ
- Ball caster acero
- 1 Fuente de alimentación 220V-12V AC-DC
- 1 capacitor de 0.33 uF y 0.1uF
- 1 placa perforada
- Pines hembras y machos

5.3. Esquema electrónico y armado del Solar Tracker

Para armar el instrumento se necesitó algunos materiales y otras herramientas como: pinzas, alicate, pelador de cables, pistola de silicona, etc.

El esquema electrónico a elaborar y seguir, es de la Figura 5.5.

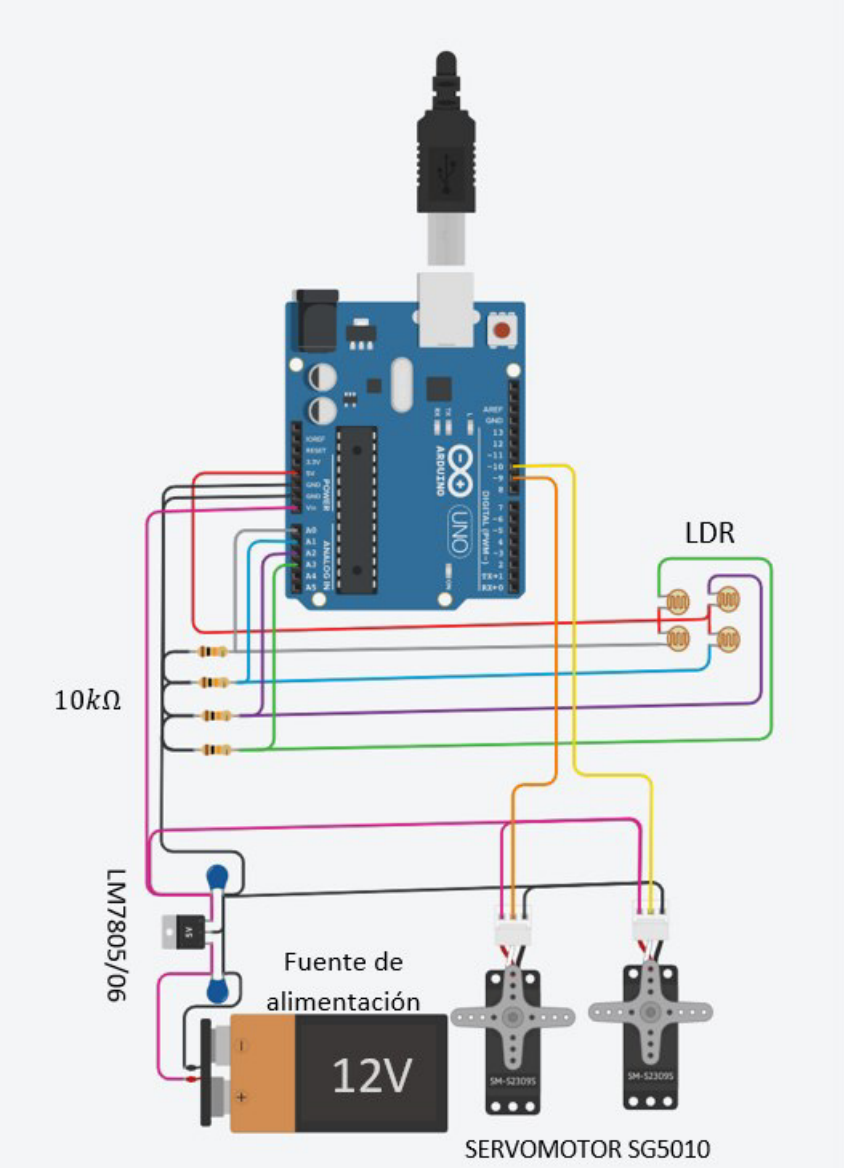


Figura 5.5. Esquema electronico del Solar Tracker. Fuente: Propia.

Se recomienda construir con una placa perforada con pines machos, el cual pueda encajar en el Arduino Uno.

Pasos a seguir para el armado:

1. Ensamblar las 3 ball caster y un servo motor en el nivel 1 de la base, de arriba hacia abajo.
2. Atornillar la pieza en forma de circulo del servo en la parte inferior de la pieza del nivel 2.

3. Insertar un servomotor en la pieza del nivel 2, del exterior al interior y proceder a atornillar.
4. En la pieza del nivel 3, insertar en la parte inferior – central un rodamiento y a su costado atornillar la pieza circular que encajara con el servomotor.
5. En la pieza que va a encajar con el Calitoo, se recomienda ubicar con mucho cuidado y a la misma distancia las 4 fotorresistencia (cada uno debe tener 2 cables soldados) en la parte inferior de la mira.
6. Los 4 cables positivos que salen de las 4 fotorresistencia, se unirán en solo uno, teniendo al final solo 5 cables que saldrán.
7. Los cables de las fotorresistencias y servos se pasarán por el interior de las piezas del nivel 3, 2 y 1.
8. La pieza del nivel 2, se insertará en el servomotor 1 inferior.
9. La pieza del nivel 3, se insertará en el servomotor 2 superior, además al sentido contrario, se insertará un tornillo con sus respectivas tuercas.
10. Los cables de los servomotores, fotorresistencias y fuente de alimentación se soldarán en el interior de la pieza de nivel 1.

Una vez construido, se debe utilizar el algoritmo de prueba (**Anexo 3**), para verificar el posicionamiento y funcionamiento correcto de las fotorresistencias tanto en el instrumento como el algoritmo principal. Para la calibración se selecciona los pines de cada fotorresistencia de la manera que se observa en la Figura 5.6.

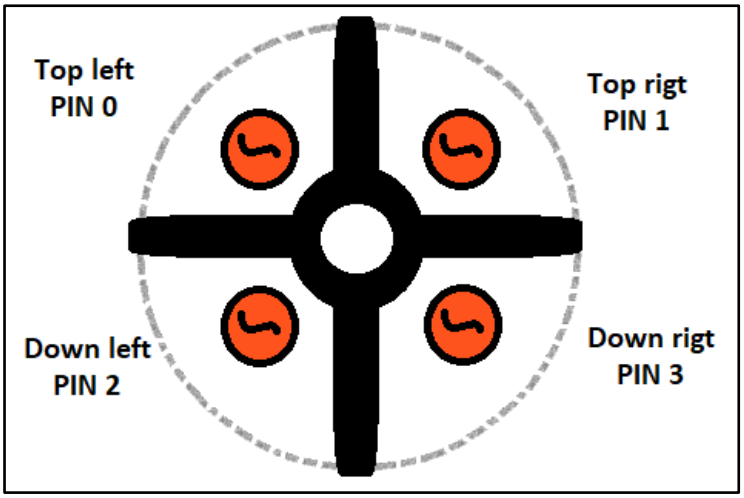


Figura 5.6. Posición correcta de las fotorresistencias y pines del instrumento. Fuente: Propio.

Una vez ubicados los pines de forma correcta con el algoritmo de prueba, dichas líneas modificadas se pasan al algoritmo principal (**Anexo 4**).

Prueba_LDR

```
// Prueba para localizar los lugares correctos de las LDR

int ldrlt = A0; //LDR top left - BOTTOM LEFT
int ldrrt = A3; //LDR top rigt - BOTTOM RIGHT
int ldrld = A1; //LDR down left - TOP LEFT
int ldrrd = A2; //ldr down rigt - TOP RIGHT
```

Figura 5.7. Líneas del algoritmo de prueba a copiar y reemplazar en el algoritmo principal. Fuente: Propia.

Seguidamente, se debe verificar el correcto funcionamiento de los servomotores. En el PIN 9 se encuentra el servomotor que se moverá de forma horizontal en el eje inferior y verticalmente superior el servomotor del PIN 10.

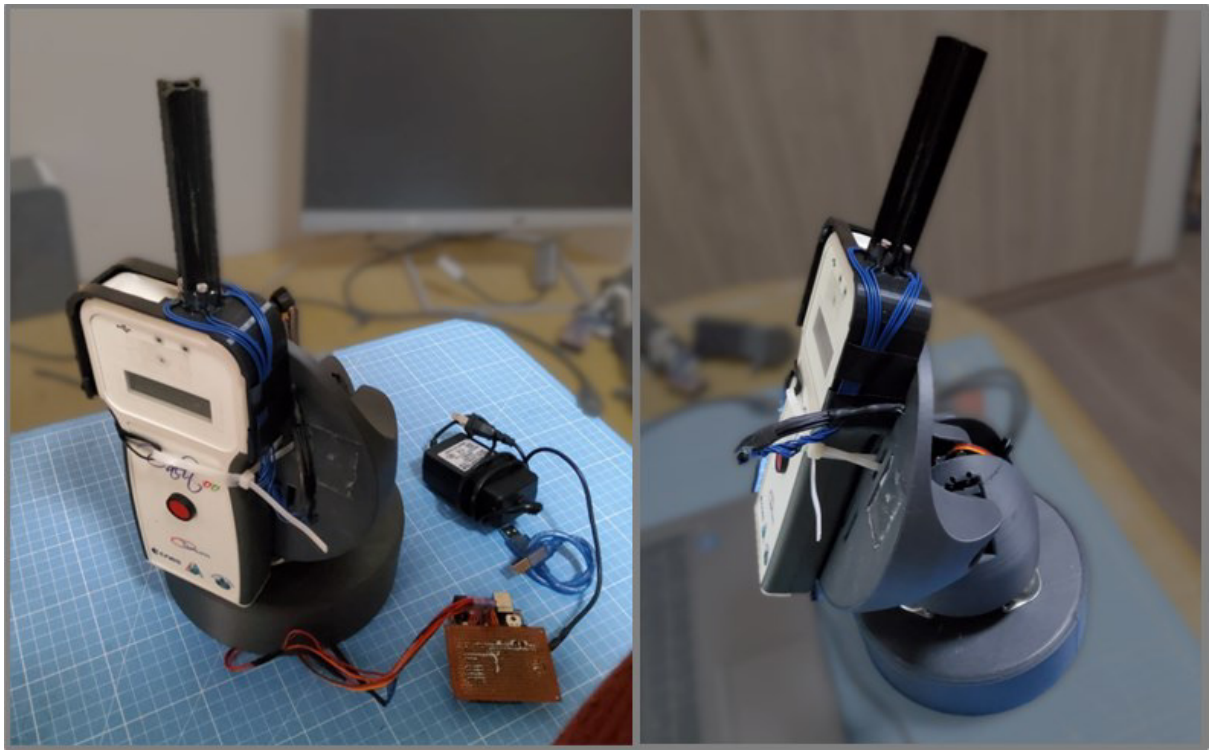


Figura 5.8. El fotómetro solar Calitoo acoplado en el Solar Tracker desarrollado, realizando medidas. Fuente: Propia.

Una vez verificado toda las conexiones y los puntos antes mencionados, se procederá a compilar en algoritmo principal. Obteniendo un Solar Tracker totalmente funcional, como se muestra en las figuras 5.8 y 5.9.



Figura 5.9. Instrumento Solar Tracker completo para el acople con el fotometro solar Calitoo. Fuente: Propia.

Capítulo 6. Prueba de laboratorio y campo

6.1. Calibración de los instrumentos en el laboratorio

6.1.1. Fotómetro Solar

Para la calibración del fotómetro desarrollado, primero se apuntó directamente al sol y a su vez registrando las medidas, oscilando la mira en todas las direcciones, con el objetivo de detectar el valor máximo (milivoltios) del LED. Una vez detectado el valor máximo en la pared donde la luz del sol incide, se marcará con un plumón color blanco círculos señalando el centro, como se observa en la figura 6.1.

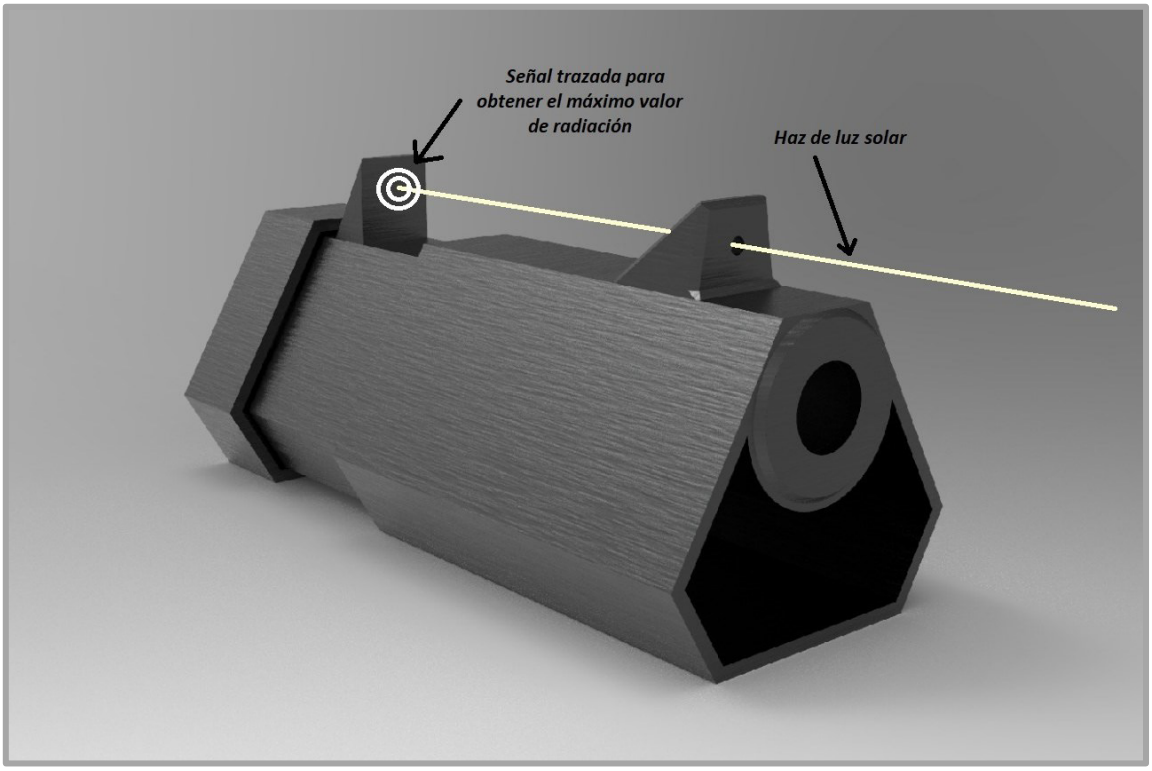


Figura 6.1. Fotómetro solar recibiendo radiación solar directa. Se traza pequeños circulos indicando el centro donde incidio la radiación directa del valor maximo registrado. Fuente: Propia.

Además, se necesita el espectro de recepción de las tres longitudes de onda del LED RGB o LEDs normales para calcular la dispersión de Rayleigh, por lo cual se necesitó ayuda de otros laboratorios ubicados en la Facultad de Ciencias físicas-UNMSM. El estudio se realizó en el

Laboratorio Óptica no Lineal que está a cargo del Dr. Whualkuer Lozano Bartra, para la medición del espectro de recepción se diseñó el esquema de la figura 6.2, en el cual se utiliza un monocromador, una fuente de luz, un LED RGB o normal y un multímetro para registrar de forma manual el voltaje en cada longitud de onda de la radiación incidente que el monocromador seleccione.

El monocromador para funcionar correctamente necesita una fuente de luz entrante, por eso se escogió para la prueba una linterna de 12W de potencia y en la salida del haz de luz monocromada, se diseñó una tapa que calzará en el pico de la salida, dicha tapa contendrá el LED RGB o normal ubicado en su centro.

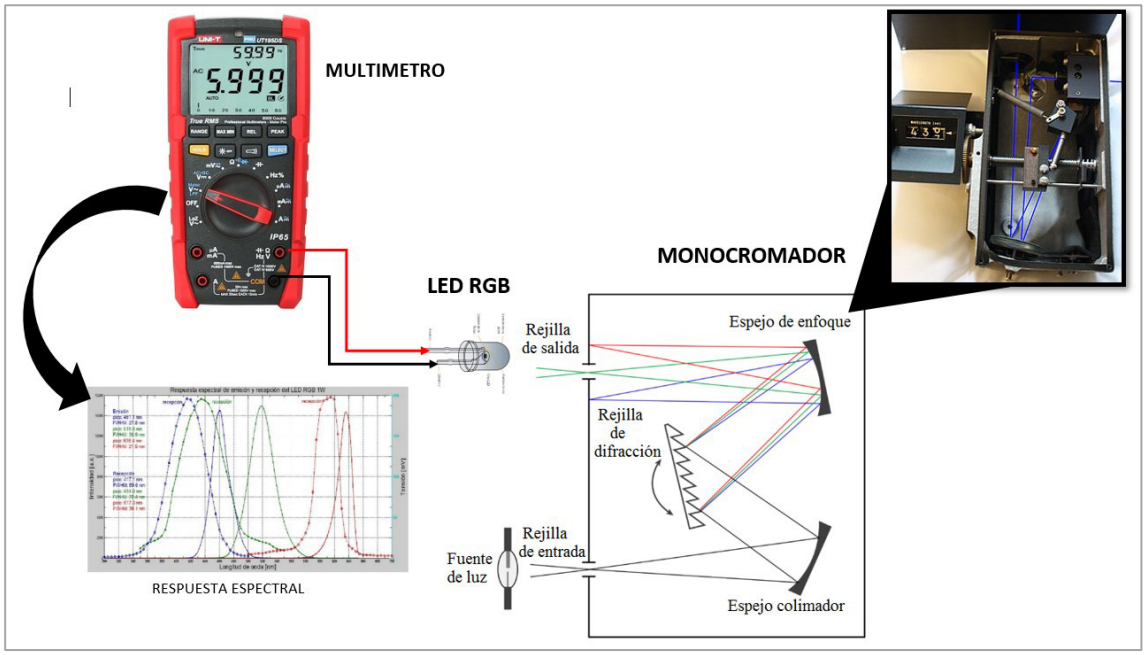


Figura 6.2. Esquema para realizar la toma del espectro de recepción de cada LED. Fuente: Propia.

Se procedió a conectar un multímetro en la pata positiva de la longitud de onda del color azul y en el negativo del LED RGB, posteriormente se fue cambiando la conexión positiva del multímetro a las otras patas. Seguidamente, se insertó la tapa con el LED en la salida del haz de luz del monocromador como se observa en la figura 6.3. Con el software Mono-Utily del monocromador de ORIEL INSTRUMENTS, se programó para que el cambio de longitud de onda se diera en un aumento de 5 nm entre el rango de 350 nm a 750 nm y se registró las medidas de voltaje manualmente para cada rango de longitud de onda (figura 6.4).

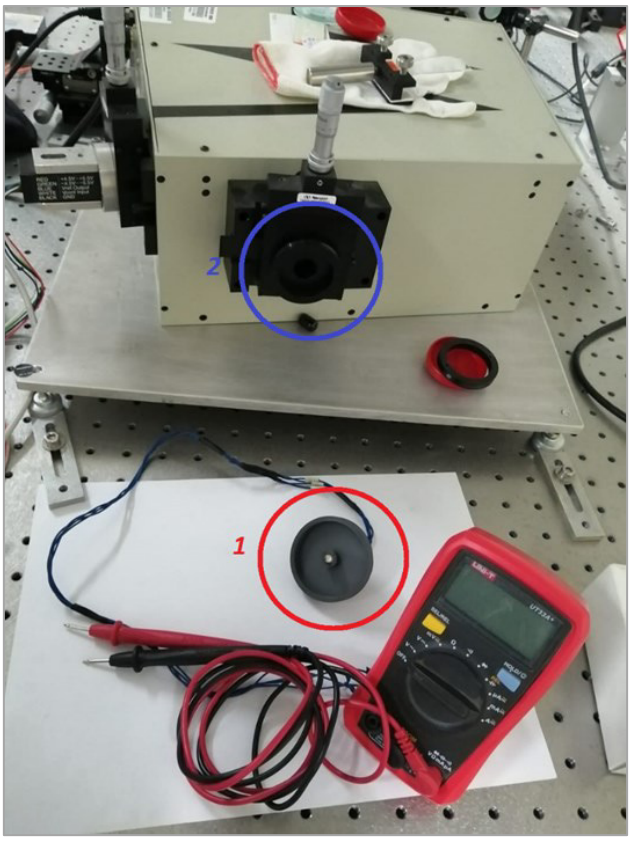


Figura 6.3. Instalación de la tapa (1) con el LED en la salida (2) del haz de luz monocromada. Fuente: Propia.

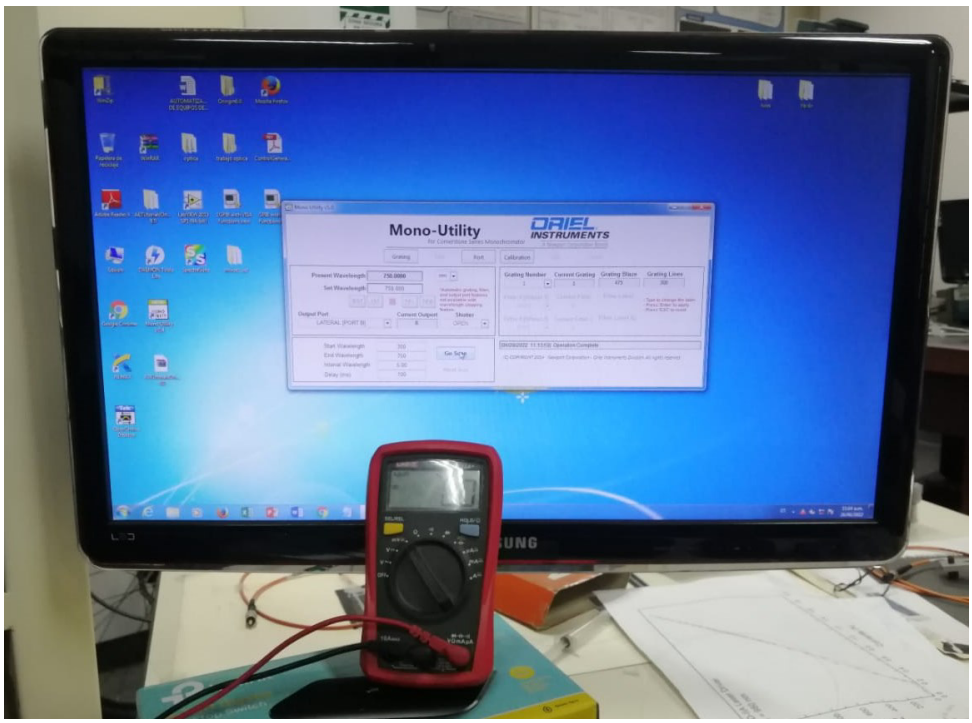


Figura 6.4. Registro de la radiación incidente en unidades de milivoltios y su longitud de onda para cada LED (Blue, Green y Red). Fuente: Propia.

Posteriormente, se diseñó un algoritmo y un pequeño hardware que nos permitiera automatizar el registro del voltaje de las 3 longitudes de onda del LED RGB al mismo tiempo.

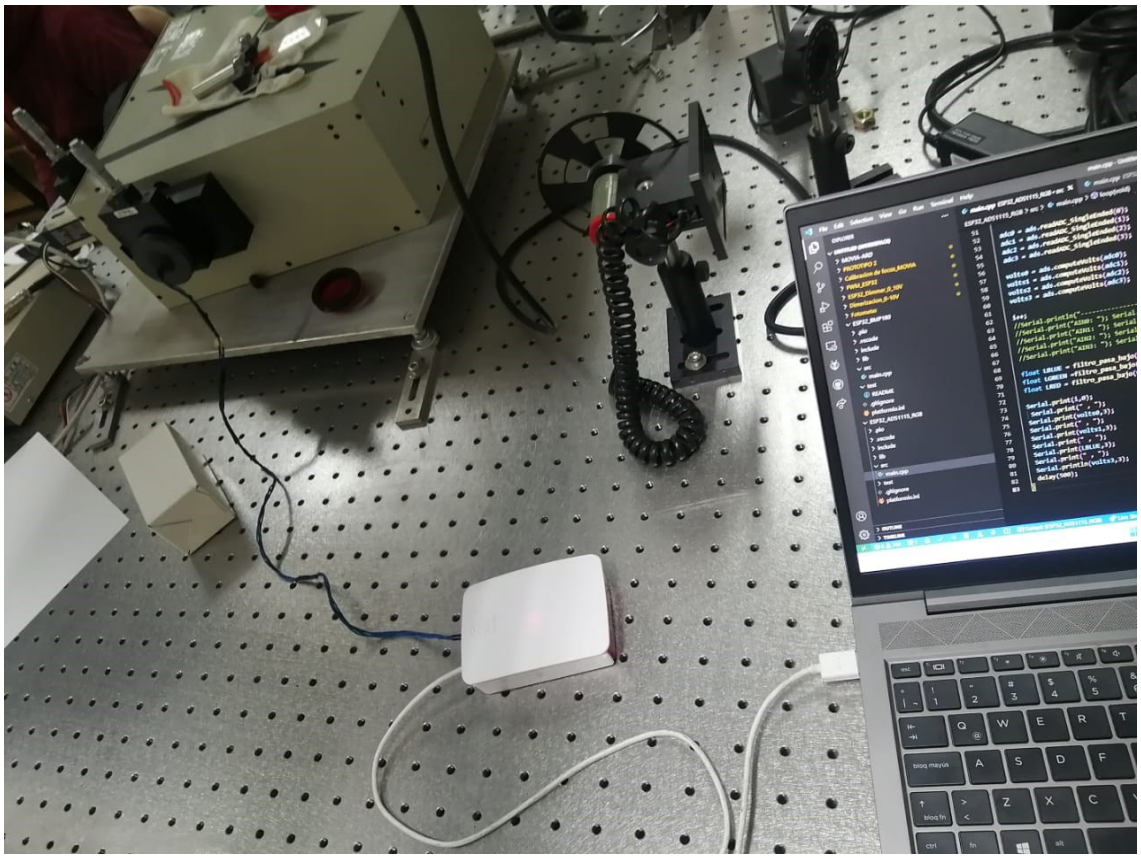


Figura 6.5. Registro de datos automatizados del LED RGB, mediante un hardware y PlatformIO. Fuente: Propia.

Los datos obtenidos en el Laboratorio de Óptica no Lineal en el estudio del espectro de recepción del LED RGB, se visualizan en la tabla 6.1 donde se observar los niveles de radiación en milivoltios.

Tabla 6.1. Datos registrados en milivoltios de la radiación incidente en diferentes longitudes de onda para medir el espectro de recepción de un LED RGB. Fuente: Propia.

Longitud de onda (nm)	LED Blue (mV)	LED Green (mV)	LED Red (mV)	Longitud de onda (nm)	LED Blue (mV)	LED Green (mV)	LED Red (mV)
350	0.0	0.0	0.0	555	1.0	0.2	64.7
355	0.0	0.0	0.0	560	1.0	0.1	62.0
360	0.0	0.0	0.0	565	1.0	0.0	59.7
365	0.0	0.0	0.0	570	1.0	0.0	57.0
370	0.0	0.0	0.0	575	1.0	0.0	55.0
375	0.0	0.0	0.0	580	1.0	0.0	53.3

380	0.0	0.0	0.0	585	1.0	0.0	52.4
385	0.0	0.0	0.0	590	1.0	0.0	51.7
390	0.1	0.1	0.1	595	1.0	0.0	51.5
395	0.3	0.2	0.2	600	1.0	0.0	51.3
400	1.2	0.7	0.3	605	1.0	0.0	51.3
405	2.8	1.3	1.0	610	1.0	0.0	51.3
410	4.8	1.8	1.1	615	1.0	0.0	50.1
415	7.9	2.3	1.3	620	0.9	0.0	48.0
420	11.6	3.0	1.3	625	0.9	0.0	43.7
425	14.7	4.0	1.3	630	0.9	0.0	37.8
430	18.2	5.4	1.4	635	0.9	0.0	30.9
435	22.0	7.8	1.4	640	0.8	0.0	22.7
440	25.5	10.5	1.5	645	0.7	0.0	15.5
445	27.9	13.1	1.7	650	0.7	0.0	7.5
450	29.1	15.2	2.3	655	0.6	0.0	3.5
455	28.4	16.6	3.1	660	0.5	0.0	1.0
460	25.6	16.7	4.0	665	0.4	0.0	0.5
465	19.9	15.9	5.3	670	0.2	0.0	0.3
470	12.2	14.1	7.8	675	0.1	0.0	0.1
475	5.9	10.9	9.5	680	0.0	0.0	0.0
480	2.5	7.4	12.8	685	0.0	0.0	0.0
485	1.4	4.0	16.7	690	0.0	0.0	0.0
490	1.0	2.4	19.8	695	0.0	0.0	0.0
495	1.0	1.8	23.2	700	0.0	0.0	0.0
500	0.9	1.2	27.9	705	0.0	0.0	0.0
505	0.9	1.1	33.8	710	0.0	0.0	0.0
510	0.9	0.9	38.2	715	0.0	0.0	0.0
515	0.9	0.8	46.9	720	0.0	0.0	0.0
520	0.9	0.7	53.5	725	0.0	0.0	0.0
525	1.0	0.7	59.7	730	0.0	0.0	0.0
530	1.0	0.6	64.5	735	0.0	0.0	0.0
535	1.0	0.5	67.6	740	0.0	0.0	0.0
540	1.0	0.4	68.5	745	0.0	0.0	0.0
545	1.0	0.3	68.6	750	0.0	0.0	0.0

A continuación, se procedió a evaluar la precisión, exactitud y sensibilidad del fotómetro desarrollado con las diferentes placas electrónicas (N°1 y N°2), colimadores de largo - diámetro del disco interno y sensores LEDs (RGB, LED azul, LED verde y rojo). El fotómetro permitirá leer señales de voltaje de +/- 2.048 V con una ganancia 2X programable.

Se comenzó a analizar los fotómetros de la siguiente manera:

1. Se ubico el fotómetro con la placa N°1 sobre la mesa, sosteniéndolo de todos los lados y dejando el cabezal del colimador libre para retirarlo o cambiarlo, a su vez

en la parte superior se ubicó un LED azul, el cual incidía la radiación directa sobre el LED. Se realizaron medidas con los diferentes (5 mm, 4 mm, 2mm) cabezales del colimador y en cada cambio se hacía pequeños movimientos del LED para ver la variación del voltaje.

2. Sometí a prueba los diferentes filtros pasa bajos y promedios del algoritmo desarrollado en las dos placas electrónicas, para evidenciar cual es más preciso y rápido.
3. Se verifico las lecturas de voltaje de cada placa electrónica con el monitor serial de Arduino y un multímetro certificado, para observar cual posee mayor precisión y exactitud. La placa electrónica N°2 puede bajar su voltaje inicial a Zero y amplificar la señal con los potenciómetros que lleva el módulo AD620.
4. Con el fotómetro de la placa electrónica N°2, se realizaron medidas para verificar el ruido que ingresa de un LED a otro. Primeramente, se inició con el LED RGB, el cual se expuso a radiación del espectro visible del azul, verde y rojo. En segundo lugar, se ubicó un LED azul, un LED verde y un LED rojo, exponiéndolo a las mismas condiciones anteriores (figura 6.7).

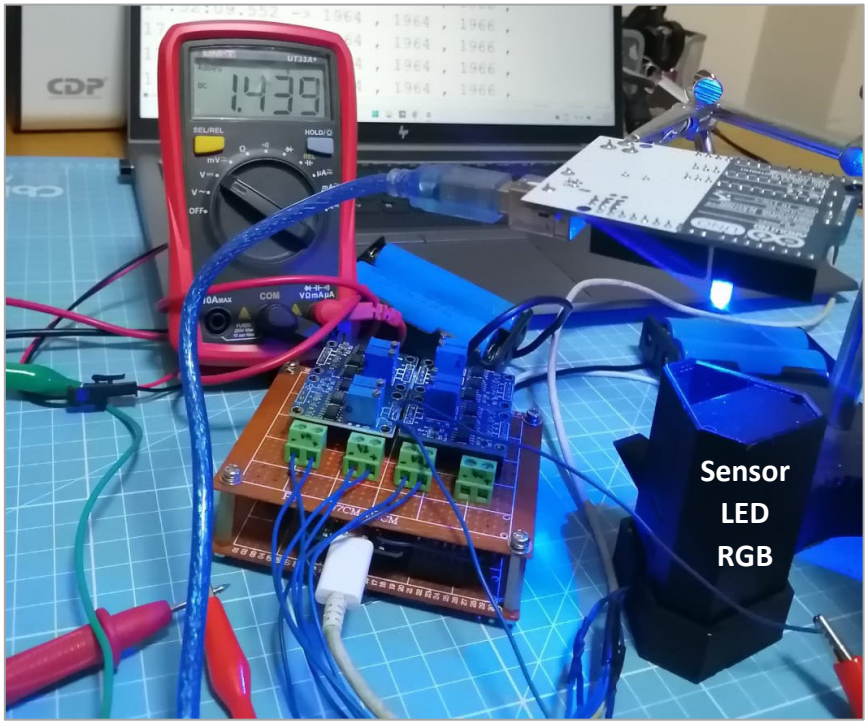


Figura 6.6. Verificación de las lecturas en milivoltios y ruido de una a otra lectura de la placa electrónica N°2, utilizando como sensor un LED RGB. Fuente: Propia.

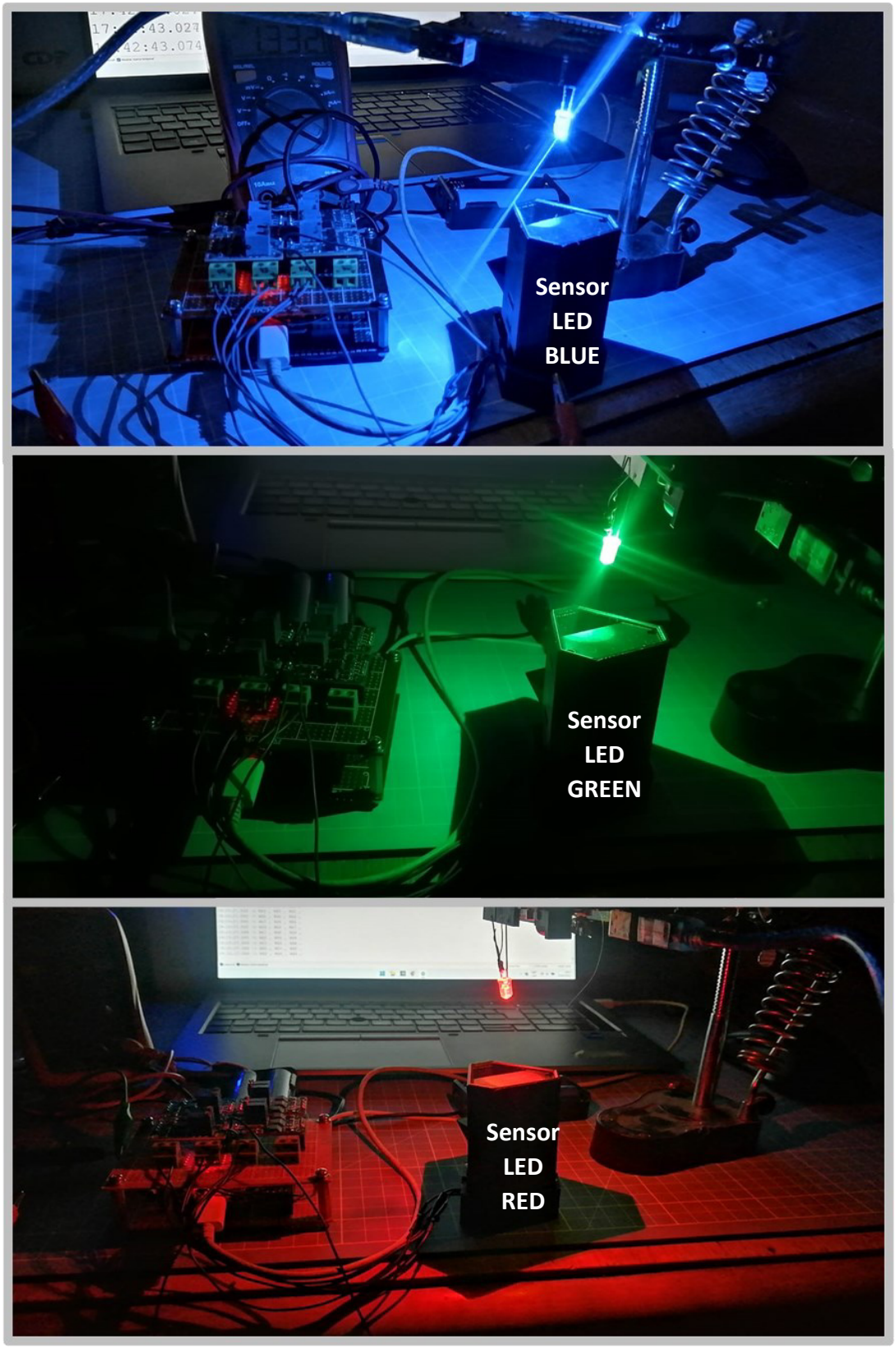


Figura 6.7. Prueba de lectura de voltaje de la placa electrónica N°2 utilizando como sensor 3 LEDs e incidiendo una radiación en su espectro visible correspondiente. Fuente: Propia.

6.1.2. Solar Tracker

Para la calibración del Solar Tracker se verifico que apuntará directamente a una fuente de luz. Las primeras pruebas fueron en el laboratorio, logrando apuntar a la luminaria ubicada en el techo. Además, se ubicó el instrumento en un lugar oscuro y con una linterna de 12W se le apuntaba variando su posición levemente, verificando la sensibilidad del seguimiento a la fuente de luz, como se observa en la figura 6.8.

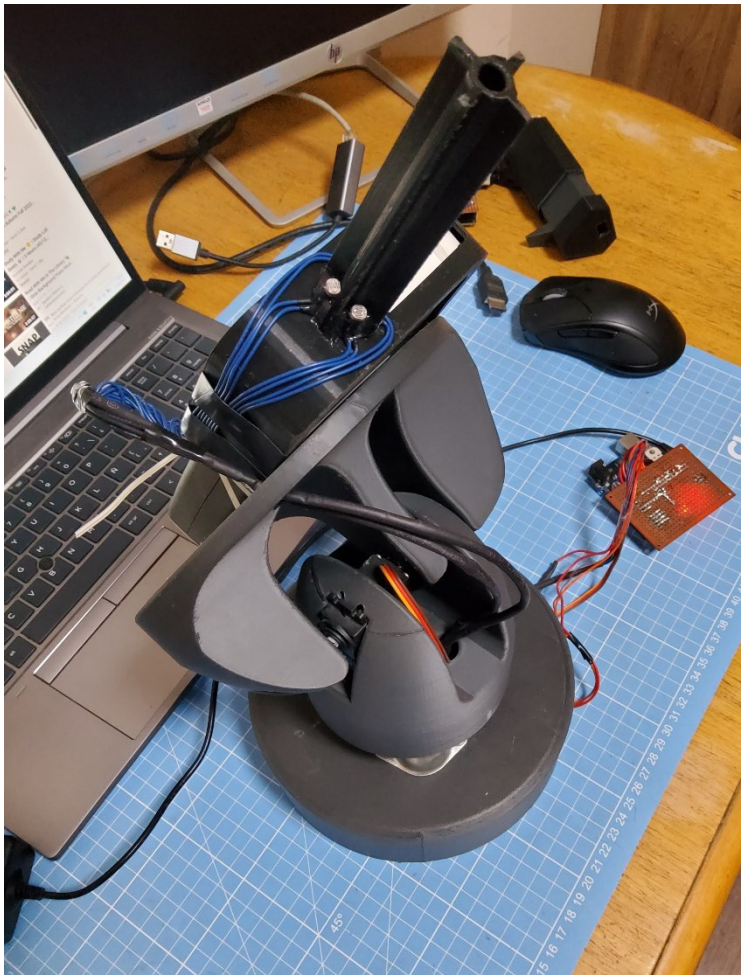


Figura 6.8. Solar Tracker más el Calitoo, apuntando a la fuente de luz con mayor intensidad del laboratorio ubicada en la parte superior (techo). Fuente: Propia.

6.2. Prueba de campo

Para poder calibrar los fotómetros desarrollados se utilizó el Método Langley, para eso se viajó al Observatorio de Huancayo a cargo del IGP, el 18 y 19 de agosto del 2022 para realizar algunas medidas. Se escogió este lugar por que presenta una atmosfera estable con cielo despejado, se ubica a una gran altura sobre el nivel del mar y tiene uno de los fotómetros CIMEL-318 de la NASA.

Se recopilo datos de los dos fotómetros desarrollados con la placa electrónica N°1 y dos fotómetros Calitoo, durante 3 horas el día viernes 19 desde las 14:00 hasta las 17:00 horas Perú (Tiempo mundial: 19:00 – 23:00 horas) en intervalos de 15 a 30 minutos. Se priorizo este horario debido a que la masa de aire registrada es más notable su variación y esto terminará ayudando en el Método Langley. Además, se descargó los datos de la página web de AERONET registrados por el CIMEL-318T aquel día.



Figura 6.9. Toma de datos con los fotómetros desarrollados (1.), Calitoo (2.) y recopilación de datos del CIMEL -CE318T (3.). Fuente: Propia.



Figura 6.10. Toma de datos de los 2 fotometros desarrollados y los Calitoo al mismo tiempo. Fuente: Propia.

Actualmente, el instrumento creado no puede calcular el ángulo zenit, coordenadas y masa óptica de aire, siendo necesarios estos parámetros, por lo cual se optó utilizar programas online (Sun Position Calculator - PVEducation o SunEarthTools) que nos permitiera obtener la masa del aire y/o ángulo zenit, los cuales depende de la hora, latitud y longitud. En la figura 6.11 se visualiza el programa online utilizado.

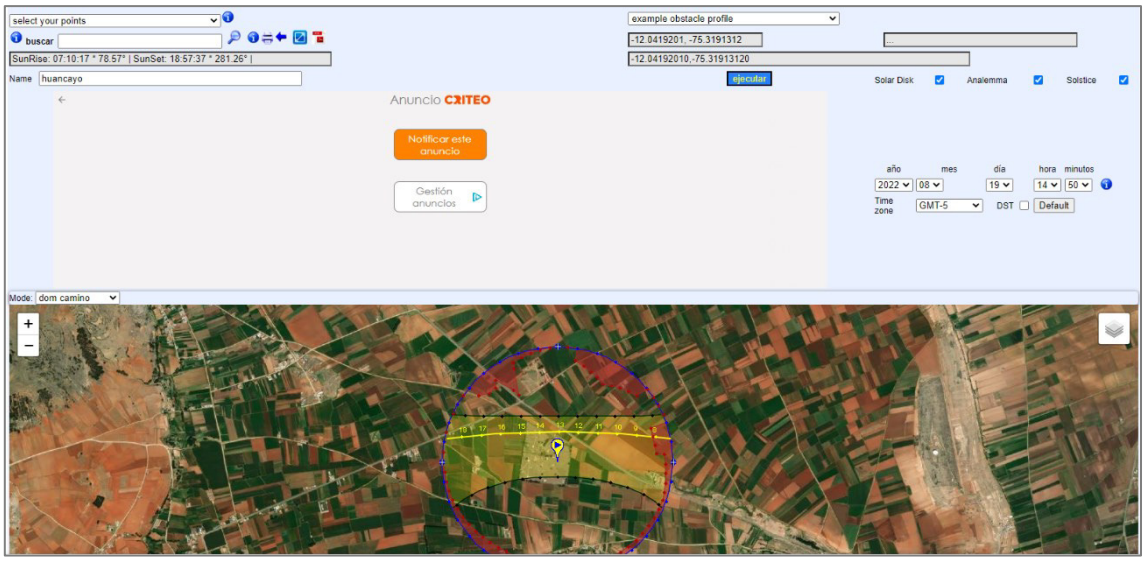


Figura 6.11. Promaga utilizado para obtener el angulo zenit de un dia, hora y coordenadas. Fuente: SunEarthTools, 2022.

En las tablas 6.2 y 6.3, se obtuvo las medidas realizadas con los fotómetros desarrollados (placa electrónica N°1) en las longitudes de onda de 450 nm, 455nm y 545 nm. En las tablas

6.4 y 6.5 se tiene las medidas obtenidas de los fotómetros Calitoo (#394 - #395) en las longitudes de ondas de 465 nm, 540 nm y 619nm. En la tabla 6.6 se observan las medidas descargadas de AERONET del fotómetro CIMEL-318T INSTRUMENT 965, en las longitudes de onda (765nm y 500 nm y 400 nm) más cercanas a las estudiadas. Todas las medidas obtenidas fueron procesadas u obtenidas a un nivel 1.5 (filtrado de nubes o perturbaciones físicas), obteniendo las siguientes tablas:

Tabla 6.2. Datos obtenidos por el fotómetro solar desarrollado N#1 en unidades de milivoltios. Fuente: Propia.

Fotómetro desarrollado N#1 - Placa electrónica N°1 Fecha: 19/08/2022 Presión: 688 Altitud: 3179 Latitud: -12.0419254 Longitud: -75.3198613 Datos nivel: 1.5					
Tiempo Perú	**Voltaje (mV) 450 nm**	**Voltaje (mV) 455 nm**	**Voltaje (mV) 545 nm**	**Elevación Solar**	**Masa óptica de aire**
15:00	2552	2189	1603	38.8	1.60
15:30	2350	2084	1554	32.2	1.88
16:00	2246	1979	1520	25.3	2.34
16:30	1878	1865	1500	18.3	3.18
17:00	1509	1778	1468	11.3	5.10
17:15	1420	1635	1475	7.7	7.46
17:20	1297	1476	1466	6.5	8.83
17:25	1093	1388	1428	5.3	10.83
17:30	987	1360	1402	4	14.34

Tabla 6.3. Datos obtenidos por el fotómetro solar desarrollado N#2 en unidades de milivoltios. Fuente: Propia.

Fotómetro desarrollado N#2 - Placa electrónica N°1 Fecha: 19/08/2022 Presión: 687 Altitud: 3181 Latitud: -12.0419254 Longitud: -75.3198613 Datos nivel: 1.5					
Hora de Perú	**Voltaje 450 nm**	**Voltaje 455 nm**	**Voltaje 545 nm**	**Elevación Solar**	**Masa óptica de aire**
15:30	1504	1746	1746	38.8	1.60
15:30	1501	1736	1615	32.2	1.88
16:00	1501	1730	1612	25.3	2.34
16:30	1395	1605	1560	18.3	3.18
17:00	1244	1497	1446	11.3	5.10
17:15	1178	1321	1386	7.7	7.46
17:25	994	1155	1245	5.3	10.83
17:30	882	1074	1129	4	14.34

Tabla 6.4. Mediciones obtenidas por el Calitoo #395, con un nivel de datos 1.5. Fuente: Propia.

Calitoo #1805-0395

CN0_465=3274; RAY_465=0.19490
CN0_540=3156; RAY_540=0.10637; OZ_540=0.0128
CN0_619=2447; RAY_619=0.06281; OZ_619=0.0154
Date: 19/08/2022 Data Level: 1.5
Pression: 686 Altitude: 1202.41270S Longitude: 07519.25540W Altitude: 3349

Time	Temperatura (°C)	RAW 465	RAW 540	RAW 619	Elevation	AOT 465	AOT 540	AOT 619
19:30:39	24	1537	1662	1346	45.3	2.4806	2.4722	2.6489
20:01:02	25	1800	2027	1711	38.8	2.0729	2.0457	2.1787
20:28:10	27	1634	1881	1606	32.8	1.8259	1.7969	1.9093
20:58:49	26	1518	1784	1544	25.8	1.4748	1.4516	1.5414
21:02:06	26	1479	1749	1520	25	1.4418	1.418	1.5043
21:29:40	23	1178	1457	1322	18.7	1.1304	1.1095	1.1674

Tabla 6.5. Mediciones obtenidas por el Calitoo #394, con un nivel de datos 1.5. Fuente: Propia.

Calitoo #1805-0394

CN0_465=3254; RAY_465=0.19490
CN0_540=3068; RAY_540=0.10637; OZ_540=0.0128
CN0_619=2500; RAY_619=0.06281; OZ_619=0.0154
Date: 19/08/2022 Data Level: 1.5
Pression: 687 Altitude: 1202.41270S Longitude: 07519.25540W Altitude: 3355

Time	Temperatura (°C)	RAW 465	RAW 540	RAW 619	Elevation	AOT 465	AOT 540	AOT 619
19:00:51	24	2083	2202	1854	51.2	0.1985	0.1565	0.1579
19:29:01	23	2011	2152	1834	45.6	0.1961	0.1528	0.1477
19:56:21	25	1873	2057	1795	39.8	0.2075	0.157	0.14
20:26:44	25	1668	1878	1678	33.1	0.2209	0.1711	0.1477
20:57:10	25	1551	1787	1609	26.2	0.1853	0.144	0.1268
21:02:46	26	1495	1732	1572	24.9	0.1862	0.1466	0.1281
21:30:34	22	1175	1432	1344	18.5	0.1837	0.1495	0.1316
22:10:38	18	482	693	731	9.0	0.1642	0.1451	0.1315
22:17:47	19	480	732	808	7.3	0.1094	0.0952	0.0834

Tabla 6.6. Datos del AOD (longitud de onda: 675 nm, 500 nm, 440nm) obtenidos de AERONET del fotómetro CIMEL del ubicado en Huancayo. Fuente: National Aeronautics and Space Administration, 2022.

AERONET – Versión 3 Huancayo – IGP Versión 3: AOD Level 1.5 Fecha: 19 - Agosto – 2022 (Dia del año: 231) AERONET – Instrument: 965 Site_Latitud: -12.0402 Site_Longitud: -75.3209 Site_Elevation: 3313						
Tiempo mundial	AOD 675 nm	AOD 500 nm	AOD 440 nm	Solar_ Zenith	Opticar Air Mass	Sensor Temperature
19:50:56	0.111039	0.178030	0.213430	47.973981	1.491730	22.1
19:55:56	0.129111	0.204536	0.245278	49.041584	1.523370	22.5
20:00:56	0.136525	0.218726	0.261984	50.117060	1.557184	23.0
20:05:56	0.118431	0.185433	0.223301	51.199906	1.593353	23.2
20:15:15	0.135167	0.215953	0.259261	53.235696	1.667762	23.8
20:24:54	0.134554	0.214087	0.256686	55.366743	1.755936	23.7
20:34:12	0.145123	0.229867	0.275820	57.439677	1.853679	24.0
20:45:43	0.131733	0.208581	0.250238	60.029720	1.996068	23.8
20:55:03	0.112442	0.176459	0.211305	62.145276	2.133039	23.5
21:25:28	0.107392	0.162532	0.191698	69.123353	2.788121	20.6
22:18:28	0.110546	0.161648	0.189109	81.476370	6.472253	17.9

Capítulo 7. Resultados

De las medidas realizadas en el Laboratorio de Óptica no Lineal se logró obtener la gráfica de la figura 7.1, donde se observa los picos del espectro de recepción de cada longitud de onda del LED RGB, siendo para el rango de longitud de onda del espectro del color azul su máxima sensibilidad a los 450 nm, del LED verde a los 460nm y del LED rojo a los 550 y 615 nm.

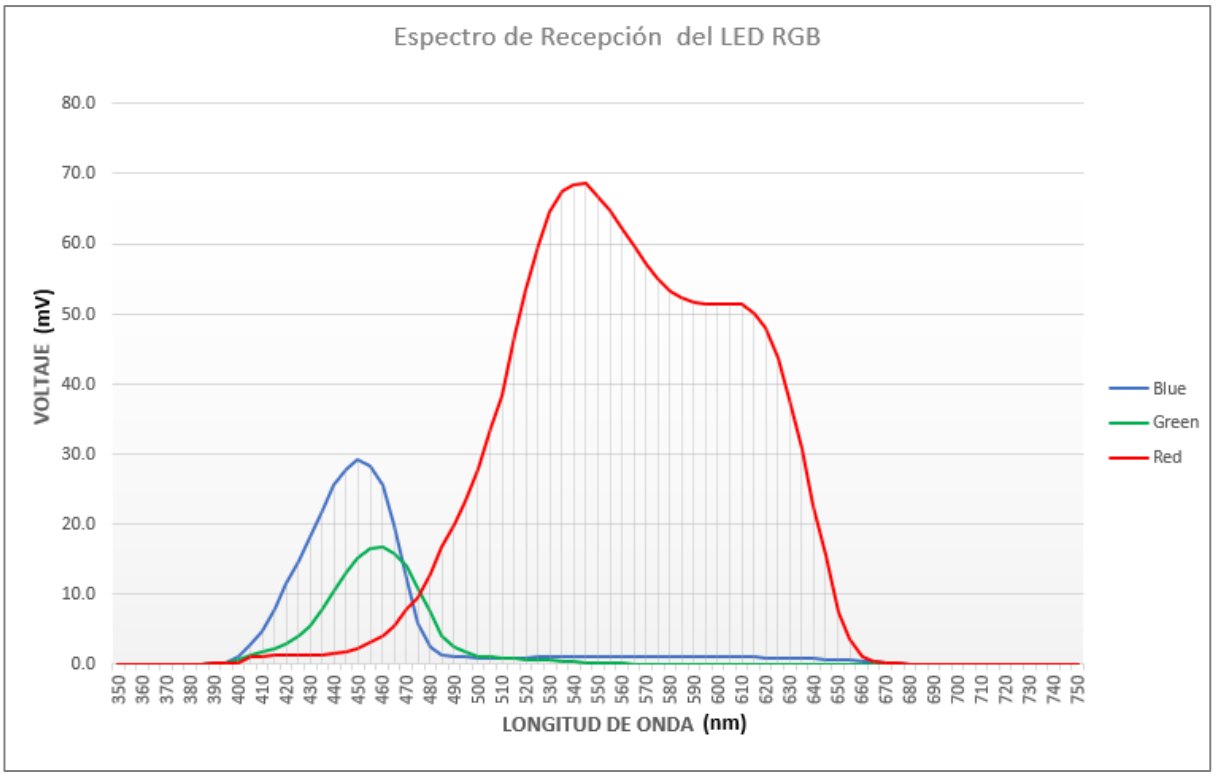


Figura 7.1. Espectro de Recepción del LED RGB. Fuente: Propia.

El análisis que ese realizó al fotómetro solar desarrollado comparando en las dos placas electrónicas, diferentes colimadores y fotodiodos (LED RGB o LED de un canal individual). Se observó lo siguiente:

La placa electrónica N°2 es precisa en un 99% en las lecturas del voltaje en comparación a un multímetro y las lecturas de voltaje de la placa electrónica N°1 se mantienen muy lejanas a los reales, esto se debe principalmente a que la placa N°2 posee los módulos AD620 que amplifican señales en el rango de uV y permite regular el voltaje inicial a cero mediante potenciómetros.

El filtro pasa bajo, es el mejor método para filtrar las señales obtenidas por el módulo ADS1115, este permite tener una mayor velocidad de lectura de señales, datos estables y reducir el ruido notablemente en comparación de otros métodos (promediar, filtro de matrices, etc.), en la figura 7.2 se observa la comparación. El valor de Alpha del algoritmo se debe encontrar entre 0.4 a 0.6 para obtener la mejor velocidad y precisión.

Respecto al uso de los colimadores, se observó que con colimadores con discos internos menores o igual a 2mm de diámetro, mejoraría la toma de datos debido que se evita la saturación de LED.

Los LEDs RGB al momento de ser usados como fotodiodos son buenos debido a que encapsulan tres LEDs con diferentes rangos de longitud de onda, aunque cuando miden la radiación incidente en un rango de longitud de onda acaba afectando en las medidas de las otras longitudes, esto se evidencia en la figura 7.3, en la cual se desconectó en un momento la patita positiva del LED azul bajando rápidamente la radiación incidente detectada, pero a su vez las otras dos medidas descendieron notablemente. En cambio, los LEDs normales (con solo un canal o rango de longitud de onda) no afectan, notablemente, a otras medidas obtenidas por otros LEDs al mismo tiempo. En la figura 7.4 se experimentó el efecto de la radiación incidente en un LED Azul en otros LEDs (Verde y Rojo) de un canal y se observa que afecta mínimamente.

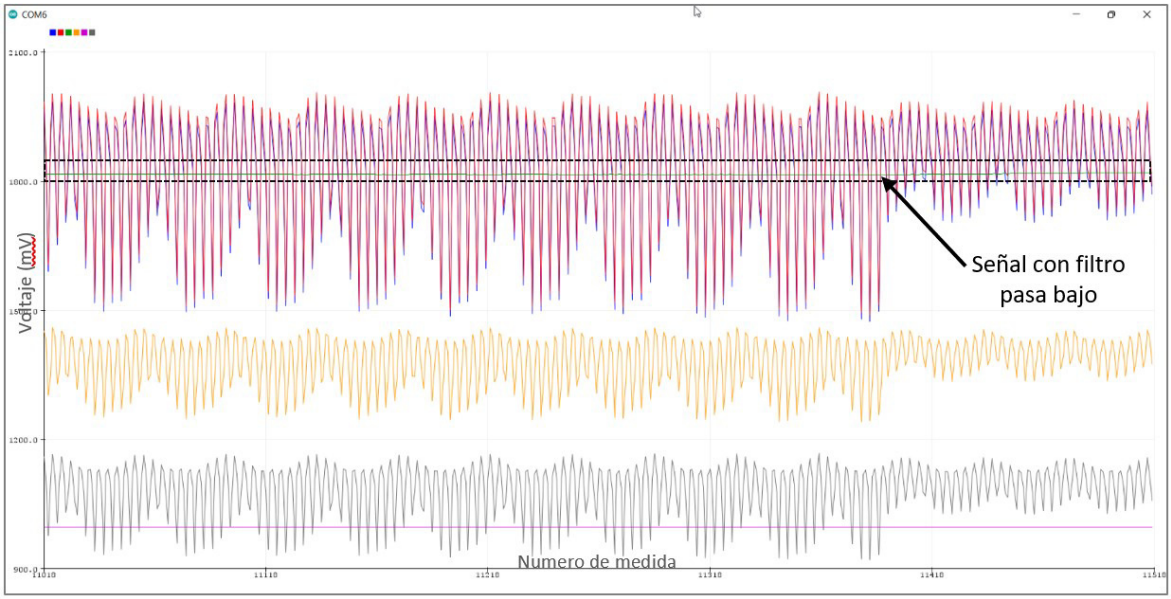


Figura 7.2. Filtro pasa bajo en funcionamiento y otros métodos de filtrados (promedios, etc.). Fuente: Propia.

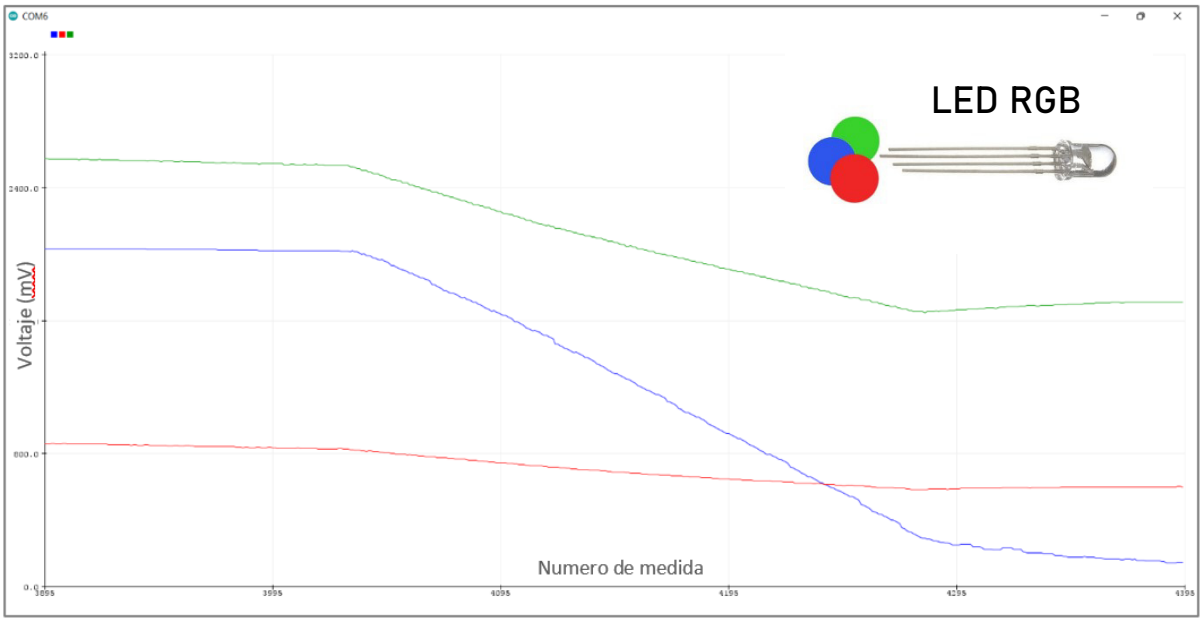


Figura 7.3. Influencia de la señal recibida por el LED azul en los otros rangos de longitud de onda del LED RGB. Fuente: Propia.

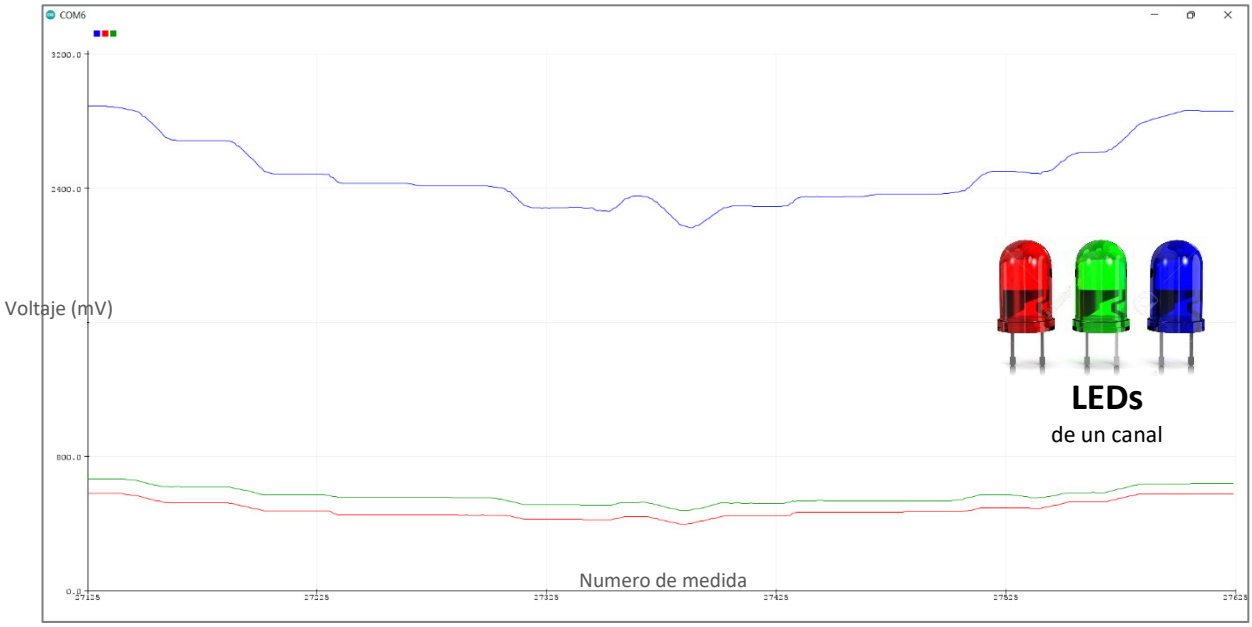


Figura 7.4. Influencia de la señal recibida por el LED azul (un canal) en los otros LEDs de un canal. Fuente: Propia.

El 19 de agosto del 2022, se realizaron medidas y recolección de datos de los 3 instrumentos fotométricos solares (fotómetro desarrollado, Calitoo y CIMEL-318T) al mismo tiempo e intervalo aproximado, obteniendo las siguientes graficas:

Con los datos obtenidos de las medidas de los fotómetros desarrollados, se realizó la calibración respectiva de cada instrumento por el Método Langley, obteniendo la tabla 7.1 donde se aprecia los coeficientes de calibración y determinación para cada longitud de onda de los instrumentos. El coeficiente de calibración fue calculando mediante la constante de su respectiva ecuación de la siguiente manera: $e^{Ln(V_0)}$.

Tabla 7.1. Datos obtenidos de las figuras 7.5. y 7.6. Fuente: Propia.

FOTÓMETRO DESARROLLADO #1			
	Constante Ln(V_o)	Coeficiente de Determinación (R^2)	Coeficiente de calibración en milivoltios (V_o)
Blue_ 450 nm	8.0116	0.9845	3015.74
Green_455 nm	7.774	0.9864	2377.96
Red_615 nm	7.3794	0.9426	1602.63
FOTÓMETRO DESARROLLADO #2			
	Constante Ln(V_o)	Coeficiente de Determinación (R^2)	Coeficiente de calibración en milivoltios (V_o)
Blue_ 450 nm	7.4828	0.9751	1777.21
Green_455 nm	7.6295	0.9778	2058.02
Red_615 nm	7.5127	0.9662	1831.15

En la figura 7.5 y 7.6, se observa los datos adquiridos en las pruebas de campos, se graficó el Ln (Voltaje medido – voltaje inicial (colimador tapado) u oscuro) contra la masa óptica del aire, que se calcula mediante el ángulo cenit o solar.

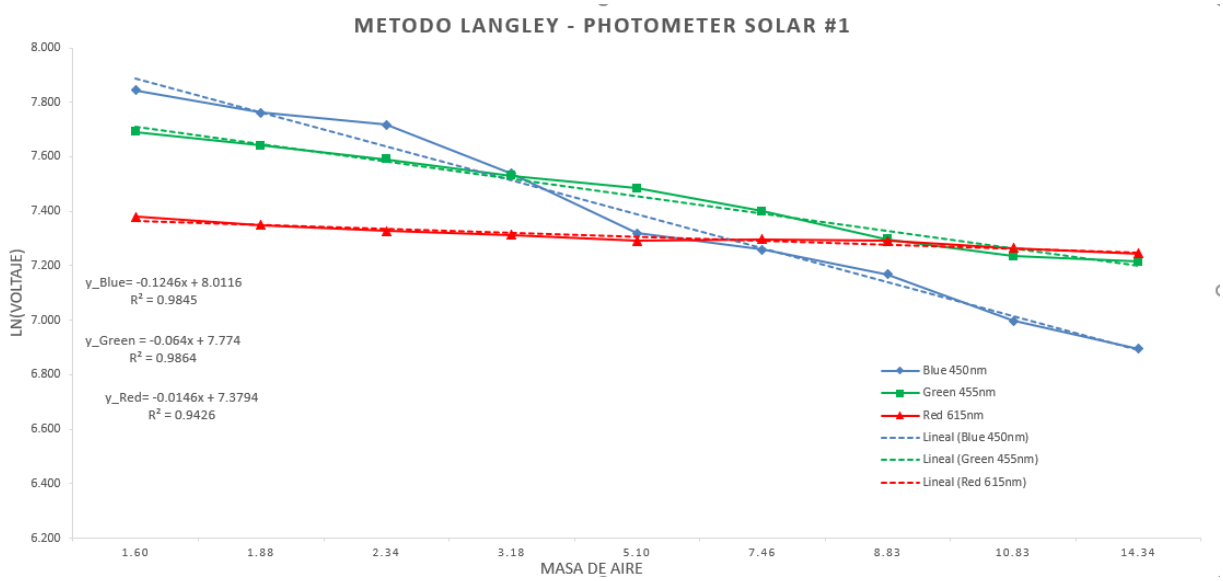


Figura 7.5. Grafica de Ln(Voltaje medido) vs Masa de aire del fotometro desarrollado N°1. Fuente Propia.

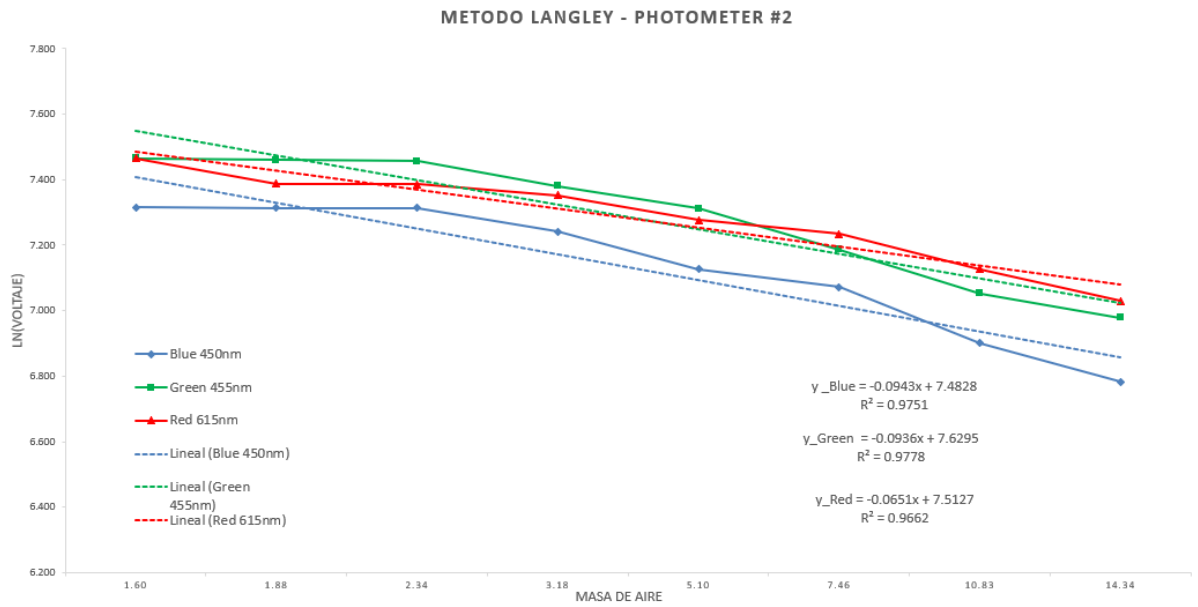


Figura 7.6. Grafica de Ln(Voltaje medido) vs Masa de aire del Photometer desarrollado N°2. Fuente Propia.

El fotómetro Calitoo #395 y #394 detectaron partículas de origen no identificable en el AOD de 465 nm con un exponente de angstrom de 465 nm - 619 nm, dichas medidas tienen un valor muy cercano a las partículas de formación desérticas o por la quema de biomasa y polución.

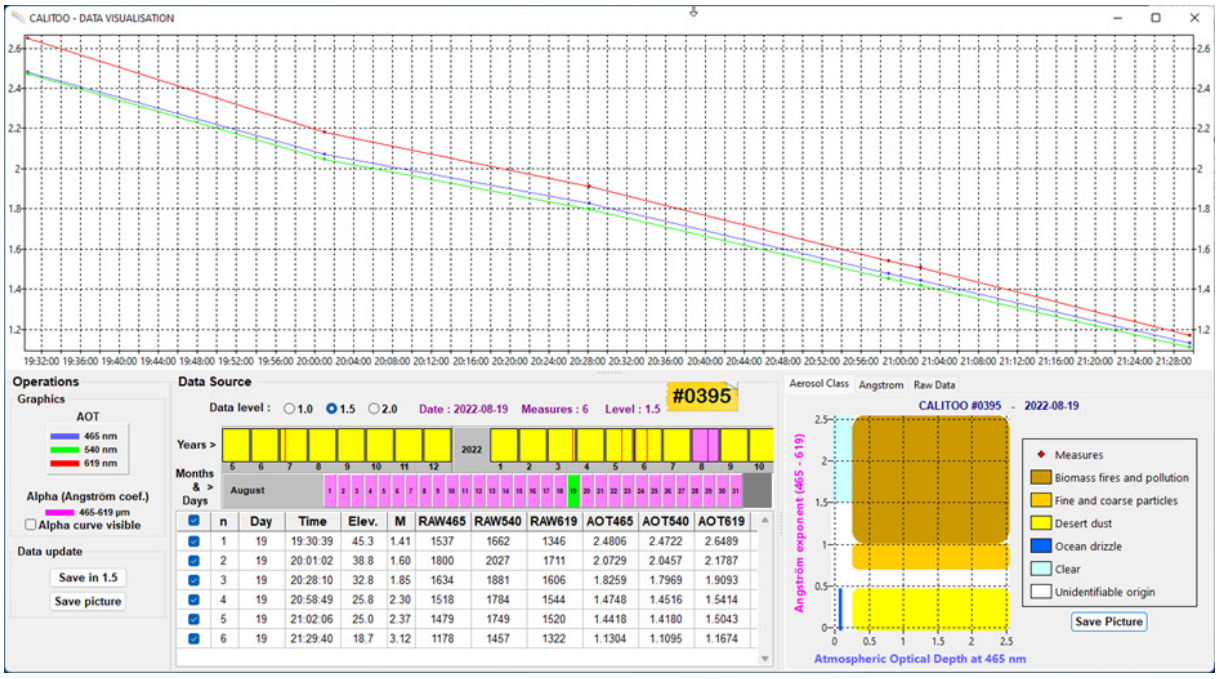


Figura 7.7. Hora de la medida realizada vs AOD de las longitudes de onda de 465 nm, 540 nm y 619nm del Calitoo #395. Fuente: Propia.

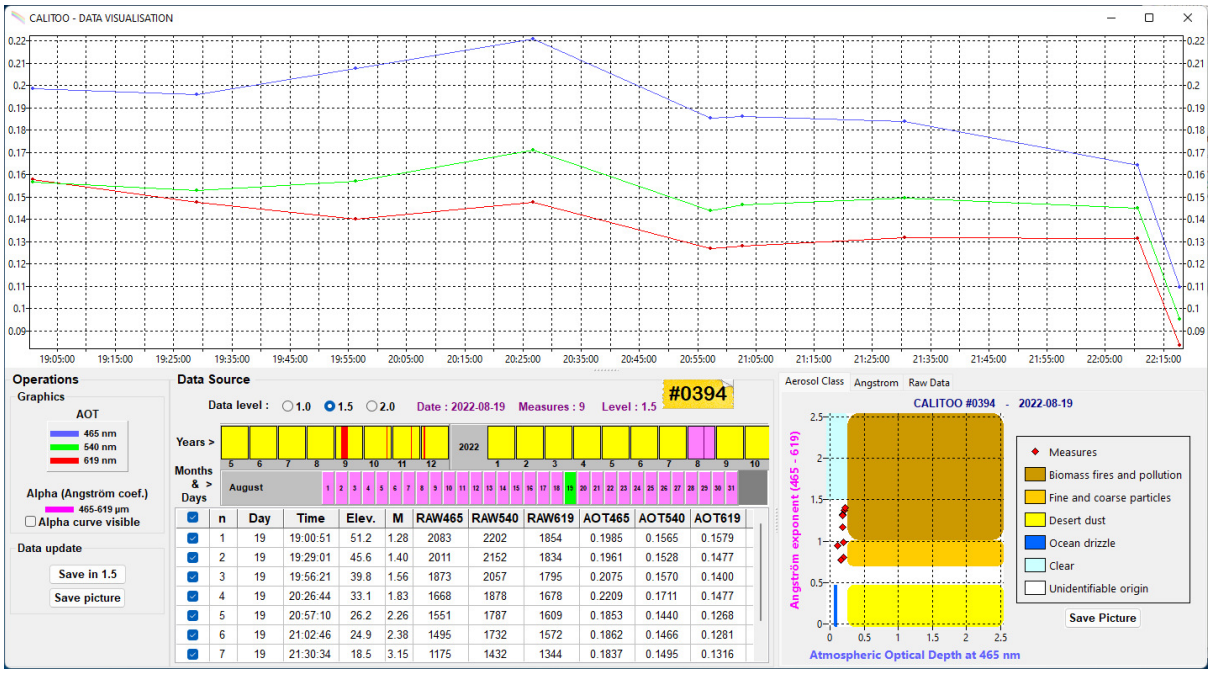


Figura 7.8. Hora de la medida realizada vs AOD de las longitudes de onda de 465 nm, 540 nm y 619nm del Calitoo #394. Fuente: Propia.

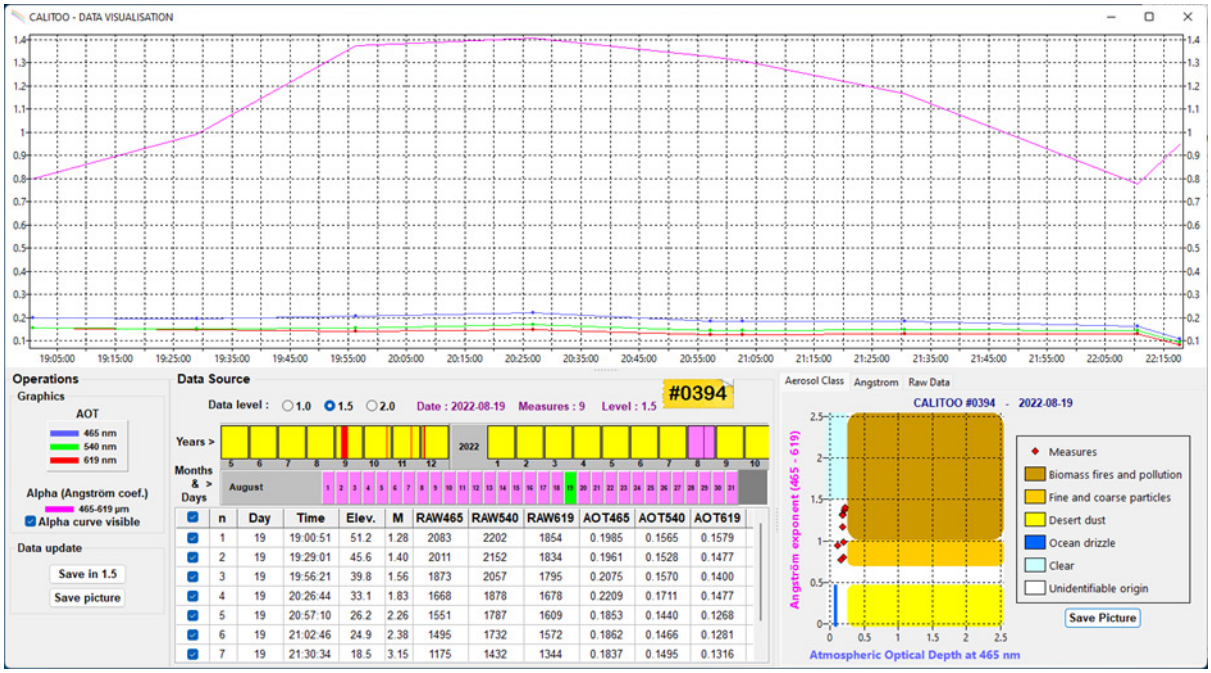


Figura 7.9. Hora de la medida realizada vs AOD de las longitudes de onda de 465 nm, 540 nm y 619nm del Calitoo #394 y se observa la grafica del exponente de Angstrom (465 – 615 nm) Fuente: Propia.

El CIMEL 318-T ubicado en Huancayo, midió el AOD en diferentes longitudes de onda, obteniendo principalmente en 440 nm un AOD de 0.222, en 500 nm un AOD de 0.187 y en 675 nm un AOD de 0.120. Estos valores se encuentran muy lejanos a los valores obtenidos por los otros instrumentos y se debe a que el fotómetro CIMEL utiliza un filtro óptico que le permite obtener una lectura en rangos de +/- 1 nm.

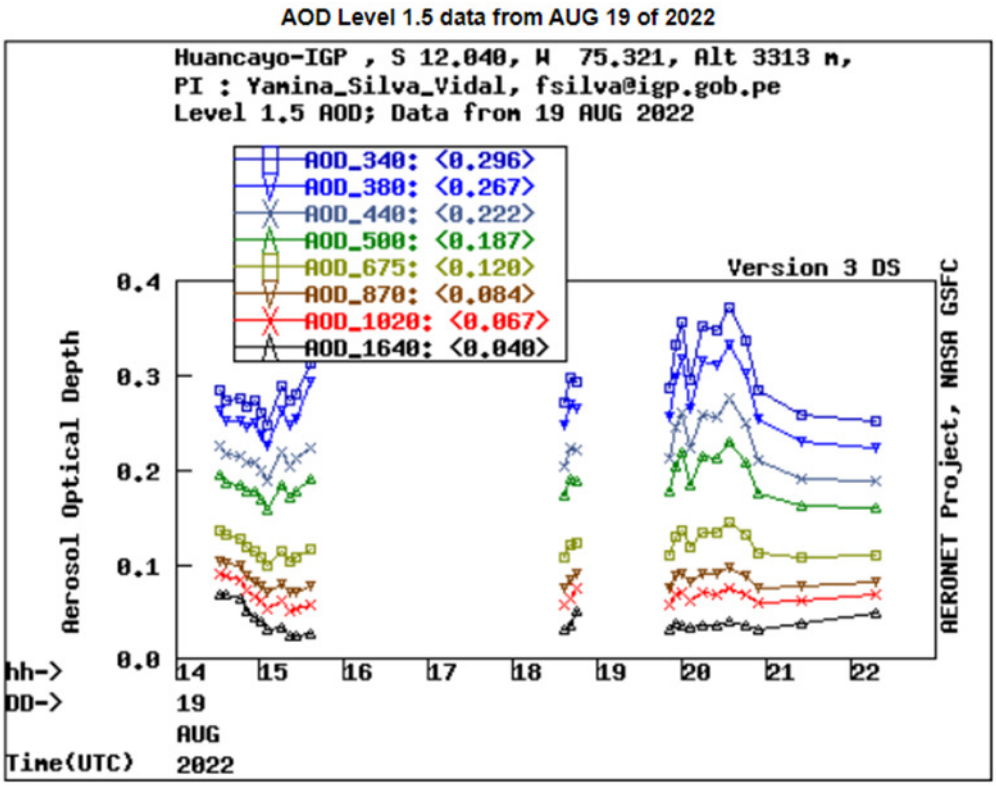


Figura 7.10. Grafica del AOD vs la hora que la medida fue tomada del día 19 de agosto por el Fotómetro CIMEL de Huancayo. Fuente: National Aeronautics and Space Administration.

Conclusiones

1. El instrumento fotométrico desarrollado con la placa electrónica N°1, registró adecuadamente la radiación directa del sol, pero sus lecturas de voltaje se encuentran muy lejanas comparadas con un multímetro UT33A+, posee altos niveles de ruido entre canales y tiene un costo aproximado de $ 28 dólares su construcción. El instrumento fotométrico desarrollado con la placa electrónica N°2, registra la radiación directa solar con una sensibilidad de 0.0625mV entre un rango de +/- 2.048V, con una precisión de +/- 1 mV y un ángulo de visión 0.76°, posee niveles de interferencia bajos entre los 4 rangos de longitud de onda que mide al mismo tiempo, puede ser calibrado para que el voltaje inicial sea cero y para amplificar o disminuir la señal entrante de los LEDs. Las medidas estructurales optimas del instrumento son de 15 cm de largo del colimador y con 2 mm de diámetro del disco, lo cual ayuda a evitar la sobresaturación de los LEDs y mejorar la entrada de la radiación directa. Las medidas obtenidas fueron verificadas con multímetro UT33A+ obteniendo un parecido en 99.9% de las medidas realizadas. Tiene un costo aproximado de $ 50 dólares y puede conectarse a diferentes dispositivos (Laptop, Tablet y Smartphone) para su adquisición de datos. Por tales motivos se concluyó que el instrumento con la placa N°2 es mucho mejor que la Placa N°1.

2. Respecto a los fotosensores utilizados, se evidencio que los LEDs con un solo canal (un rango de longitud de onda) en comparación de los LED RGB (3 canales) son mucho mejores, debido a su bajo ruido que introduce en los otros canales.

3. La calibración mediante el Método Langley fue satisfactoria para los instrumentos desarrollados, obteniendo coeficientes de determinación mayores de 0.94 en ambos instrumentos, siendo realizado las medidas entre las 2 pm y 5 pm para obtener mayor variabilidad del ángulo solar o masa óptica de aire. En la medición del espectro de recepción de LED RGB se obtuvo picos de máxima sensibilidad en 450nm, 460nm y 550nm en los 3 rangos de longitud de onda, siendo estos no suficiente para comparar los datos adecuadamente con los instrumentos de referencia.

4. La comparación de las medidas del instrumento desarrollado con el CALITOO y el CIMEL CE-318T, no fueron posible debido a que poseen diferentes rangos de longitud de onda.

5. El Solar Tracker ayuda notablemente a tomar medidas continuas al fotómetro Calitoo con una precisión de giro mínima de 1° por paso, con un giro de 180° y en un tiempo de 200 ms para mantenerse estable.

6. Debido al presupuesto económico limitado, nos restringió a testear y calibrar los instrumentos en 3 días solamente, lo cual pudo haber afectado la calibración mediante el método Langley.

Recomendaciones

La proyección de este trabajo es muy amplio y ambicioso, pudiendo mejorar el instrumento desarrollado, bajo las siguientes consideraciones:

a) Construir el instrumento con la placa electrónica N°2, con LEDs de un solo canal, con filamento ASA o con partículas de aluminio, aislar completamente los LEDs de la luz que no ingrese por el colimador y con un colimador mayor o igual a 15 cm, con un diámetro de disco interno menor o igual a 2mm.

b) La calibración debe ser hecha en un tiempo estable soleado, con el cielo despejado y una altitud mayor a 2700 metros sobre el nivel del mar, de ser posible de las 7 am a 10 am o 2pm a 5pm en el Perú. Además, la calibración debe ser realizada mínimamente durante 3 días continuos.

c) Se debe utilizar LEDs de un solo canal o fotodiodos con un filtro óptico incluido.

d) En este enlace https://drive.google.com/drive/folders/1QyS6pk3MPhTOVISmcfu108WGK-ISEu9L?usp=sharing, se deja todos los archivos, diseños, circuitos y algoritmos que se desarrolló en este proyecto, con la finalidad de ayudar a mejorar el instrumento en el tiempo.

Referencias bibliográficas

Alegría, D. (2015). Propiedades microfísicas de los aerosoles troposféricos derivadas de medidas de fotómetro solar y LIDAR en el Valle de Aburrá. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

AERONET. (s. f.). *Aerosol Robotic Network (AERONET) Homepage*. Aerosol Robotic Network. Recuperado 22 de septiembre de 2022, de https://aeronet.gsfc.nasa.gov/

Autodesk (2022). *Fusion 360 (Versión 2.0.13152)*. Windows. California, USA: Autodesk.

Blanchard, D.C., Woodcock, A.E. (1980). The production, concentration and vertical distribution of the sea-salt aerosol, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **338**, 330-347.

Bosch, G. (s. f.). *Qualification*. Calitoo. Recuperado 22 de septiembre de 2022, de https://www.calitoo.fr/index.php?page=qualification-2

Brooks, D. (2010, noviembre). *Measuring Aerosol Optical Thickness*. Instesre.org. Recuperado 22 de septiembre de 2022, de https://instesre.org/Aerosols/Aerosols_home_page.htm

Calculating Aerosol Optical Thickness. (s. f.). Recuperado 22 de septiembre de 2022, de https://instesre.org/Aerosols/aot_eq.htm

Cameron, A.G.W. (1981) *Elementary and nuclidic abundances in the solar system, in Essays in Nuclear Astrophysics*, Ed. C.A. Barnes, D.D. Clayton and D.D. Schramm, Cambridge University Press, England.

Chuvieco, E. (1995). Fundamentos de Teledetección especial. Segunda edición, Rialp, Madrid, pp. 97-116.

Climate Change 2022 - Impacts, Adaptation and Vulnerability. (2022). En *IPCC*. https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/

Deroo, C. F. D. R. /. (s. f.). *Laboratoire d'Optique Atmosphérique*. Recuperado 6 de octubre de 2022, de http://www-loa.univ-lille1.fr/

Díaz–Ramírez, P., García–Sosa, I., Iturbe–García, J.L., Granados–Correa, Sánchez–Meza, J.C. (1999) Air pollution in the atmosphere of the Toluca Valley, Mexico. Rev. Int. Contam. Ambient.15 (1): 13–17.

Diego, C. (2021, 15 diciembre). *ESP32 with an external ADC ADS1115 - Cedric Diego*. Medium. Recuperado 3 de agosto de 2022, de https://medium.com/@cedricdiego0/esp32-with-an-external-adc-ads1115-a86d3b51bb8

Dietz, P., Yerazunis, W. & Leigh, D. (2003, julio). *Very Low-Cost Sensing and Communication Using Bidirectional LEDs*. *MITSUBISHI ELECTRIC RESEARCH*

Estevan, R., Martínez-Castro, D., Suarez-Salas, L., Moya, A. & Silva, Y. (2019, julio). First two and a half years of aerosol measurements with an AERONET sunphotometer at the Huancayo Observatory, Peru. *Atmospheric Environment: X, 3, 100037. https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100037*

Esteve, A. R. (2011). Estudio de los aerosoles atmosféricos en Valencia mediante medidas del nefelómetro de integración. Tesis doctoral, Universidad de Valéncia, España.

ESP32, módulo ESP32-WROOM GPIO Pinout. (2022, 31 marzo). Descubrearduino.com. Recuperado 3 de octubre de 2022, de https://descubrearduino.com/esp32-modulo-esp32-wroom-gpio-pinout/

Shettle, E.P., Fenn, R.W. (s.f.). Models for the Aerosol of the lower Atmosphere and the Effects of Humidity Variations on their Optical Properties. AFGL-TR-79-0214. Environmental Research Papers, N° 676.

E. (2021, 10 mayo). *Comparación de Arduino vs ESP8266 vs ESP32*. El Osciloscopio. Recuperado 14 de junio de 2022, de https://elosciloscopio.com/comparacion-arduino-vs-esp8266-vs-esp32/

Fernandez, S. (2022, 21 abril). *Led antivandálico*. Visual Led. Recuperado 3 de agosto de 2022, de https://visualled.com/glosario/led-antivandalico/

Get Started Overview - GLOBE.gov. (s. f.). Recuperado 6 de octubre de 2022, de https://www.globe.gov/get-started/get-started-overview

Bosch, G. (s. f.). Photomètre solaire Calitoo. Calitoo Tenum. Recuperado 16 de mayo de 2022, de https://www.calitoo.fr/

Jaenicke & d'Almeida, G.A. (1983) Atmospheric turbidity over Africa disturbed by the El Chichon Eruption, *Geophys. Res. Lett.*, **10**, 233-235.

LABORATORIES (s.f). *35*(TR2003), 12-15. http://www.merl.com

Mims, F. (s. f.). An Inexpensive and Accurate Student Sun Photometer with Light-Emitting Diodes as Spectrally Selective Detectors. *Instesre.org*. Recuperado 22 de septiembre de 2022, de https://instesre.org/papers/Snowmass/MimsSnowmass.htm

MICROTOPS II Sunphotometer. (s. f.). Recuperado 22 de septiembre de 2022, de http://www.dproscientific.com/microtops-ii-sunphotometer.html

Mie, G. (1908). Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. *Annalen der Physik*, *330*(3), 377-445. https://doi.org/10.1002/andp.19083300302

Mota, T. (2021). Estudio de aerosoles atmosféricos usando fotometría solar. [Trabajo de investigación de bachiller, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Física]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2022, 3 marzo). Aerosol Robotic Network (AERONET) Homepage. AERONET. Recuperado 9 de mayo de 2022, de https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/index.html

Paiva, E. M., Rohwedder, J. J. R., Pasquini, C. & Pereira, C. F. (2019, mayo). Method for building a portable near infrared photometer based on LEDs and interference filters chosen by a spectral variable selection algorithm. *Microchemical Journal*, *146*, 842-849. https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.01.074

Papandrea, s., Repetto, C., Junod, G., Vilar, O., Dworniczak, J.C. & Raponi2, M. (2015). Design and development of a sunphotometer based on LED technology. FÍSICA DE LA TIERRA, AGUA Y ATMÓSFERA. FÍSICA DEL MEDIO AMBIENTE, 26(2), Scielo. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-11682015000200004

Penelope Vargas Gargate (2009). *Variabilidad espacial y temporal del espesor óptico de los aerosoles sobre Perú usando imágenes de satélite*, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Reagan, J. A., Thomason, L. W., Herman, B. M., and Palmer, J. M. Assenssment of atmospheric limitations on the determination of the solar spectral constant from ground-based spectroradiometer measurements. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. GE-24, 258-265,1986.

Repositorio Geofísico Nacional. (s. f.). Recuperado 6 de octubre de 2022, de https://repositorio.igp.gob.pe/

Russell, P.B., Livingston, J. M., Dutton, E. G., Pueschel, R. F., Reagan, J. A., Defoor, T. E., Box, M.A., Allen, D., Pilewshi, P., Herman, B. M., Kinne S. A. & Hoffmann D. J. (1993). Pinatubo and Pre-Pinatubo optical Depth spectra: Mauna Loa measurements, comparisons, inferred particle size distributions, radiative effects, and relationship to lida data. J. Geophys. Res 98, D12, 229679-22985.

Santos, S. (2019, 2 octubre). *ESP32 I2C Communication: Set Pins, Multiple Bus Interfaces and Peripherals*. Random Nerd Tutorials. Recuperado 3 de agosto de 2022, de https://randomnerdtutorials.com/esp32-i2c-communication-arduino-ide/

Scagliotti, A. F. & Jorge, G. A. (2020). ONE-YEAR ANALYSIS OF MEASUREMENTS WITH SOLAR PHOTOMETER IN THENORTHWEST OF GREAT BUENOS AIRES AREA. *AnalesAFA Vol.31 N.2*, *31*(2), 46-50. https://doi.org/10.31527/analesafa.2020.31.2.46

Seetasang, S. & Kaneta, T. (2019, noviembre). Development of a miniaturized photometer with paired emitter-detector light-emitting diodes for investigating thiocyanate levels in the saliva of smokers and non-smokers. Talanta, 204, 586-591. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.06.024

Seinfeld, J. H. & Pandis, S. N. (2006). Atmospheric chemistry and physics: From Air pollution to Climate Change. 2nd ed. California, USA pp 350-352.

Sensores. (s. f.). Naylamp Mechatronics. Recuperado 10 de junio de 2022, de https://naylampmechatronics.com/

Servicio Meteorológico Nacional (2017). Fotómetro solar: Medición del espesor óptico de los aerosoles atmosféricos. Servicio Meteorológico Nacional, Ministerio de Defensa, Buenos Aires, Argentina.

Slusser, J., J. Gibson, D. Bigelow, D. Kolinski, P. Disterhoft, K. Lantz, and A. Baubien. Langley method of calibrating UV filter radiometers. J Geophys. Res., 105, D4, 4841-4849, 2000.

Suarez, J. (s. f.). *Sistemas espaciales de teledetección* [Diapositivas]. Docplayer. https://docplayer.es/73373940-Tema-iii-sistemas-espaciales-de-teledeteccion.html

Sun Position Calculator | PVEducation. (s. f.). Recuperado 6 de octubre de 2022, de https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/sun-position-calculator

Sun Photometer - Calitoo. (s. f.). Recuperado 22 de septiembre de 2022, de https://www.calitoo.fr/index.php?page=en

SunEarthTools. (s. f.). *Cálculo de la posición del sol en el cielo para cada lugar en cualquier momento*. Recuperado 6 de octubre de 2022, de https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es

Triple Output LED RGB-Common Anode (10pcs). (s. f.). ShenZhen2U — PCB|Sourcing|Assembly|Components. Recuperado 3 de agosto de 2022, de https://www.shenzhen2u.com/5mm-Triple-Output-LED-RGB-Common-Anode

Toledano C. (2005). *Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación "El Arenosillo" de la red AERONET*. Universidad de Valladolid.

Toledano, C. (2006). Field calibration methods for aerosol optical depth determination with sun photometers. *ÓPTICA PURA Y APLICADA*, *39*(4), www.sedoptica.es

USEPA. (2003). EPA's Report on the Environment (2003 Draft) | Risk Assessment Portal | US EPA. United States Environmental Protection Agency. Recuperado 15 de agosto de 2022, de https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=56830

Valdivia, C. (2022, 31 enero). *La UNAM da otro gran salto en investigación, ahora cuenta con un fotómetro solar en la filial ILO*. Universidad Nacional de Moquegua. Recuperado 15 de septiembre de 2022, de https://unam.edu.pe/la-unam-da-otro-gran-salto-en-investigacion-ahora-cuenta-con-un-fotometro-solar-en-la-filial-ilo/

Vergaz, R. (2001). Propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos. Caracterización del área del Golfo de Cádiz. Tesis doctoral, Universidad de Valladolid.

Whitby, K. T., Cantrell, B. K., Husar, R. B., Gallani, N. V., Anderson, J. A., Blumenthal, D. L., & Wilson Jr, W. E. (1976). Aerosol formation in a coal fired power plant plume. *Am. Chem. Soc., Div. Environ. Chem., Prepr. ;(United States)*, *16*(1).

Willeke, K. and Baron, P.A., 1993. Editores de Aerosol Measurement. Principles, Techniques and Applications. Van Nostrand Reinhold, Nueva York.

Zaragoza Mulas, M. (2018, 6 noviembre). RETO 10: LED RGB, JUGANDO CON LOS COLORES PRIMARIOS DE LA LUZ. EDUCAR para el CAMBIO. Recuperado 14 de junio de 2022, de https://educarparaelcambio.com/arduino/reto-10-led-rgb-jugando-con-los-colores-primarios-de-la-luz/

ANEXO 1

```
/*********

----------ALGORITMO PARA IDENTIFICAR DIRECCIONES I2C ----------

*********/

#include <Wire.h>

void setup() {
  Wire.begin();
  Serial.begin(115200);
  Serial.println("\nI2C Scanner");
}

void loop() {
  byte error, address;
  int nDevices;
  Serial.println("Scanning...");
  nDevices = 0;
  for(address = 1; address < 127; address++ ) {
    Wire.beginTransmission(address);
    error = Wire.endTransmission();
    if (error == 0) {
      Serial.print("I2C device found at address 0x");
      if (address<16) {
        Serial.print("0");
      }
      Serial.println(address,HEX);
      nDevices++;
    }
    else if (error==4) {
  Serial.print("Unknow error at address 0x");
if (address<16) {
        Serial.print("0");
      }
      Serial.println(address,HEX);
    }
  }
  if (nDevices == 0) {
    Serial.println("No I2C devices found\n");
  }
  else {
    Serial.println("done\n");
  }
  delay(5000);
}
```

ANEXO 2

```
/*********

----------ALGORITMO DEL FOTOMETRO SOLAR ----------

*********/

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>
#include <SPI.h>
#include <Adafruit_ADS1X15.h>

#define BMP_SCK  (13)
#define BMP_MISO (12)
#define BMP_MOSI (11)
#define BMP_CS   (10)

Adafruit_BMP280 bmp; // I2C
//Adafruit_BMP280 bmp(BMP_CS); // hardware SPI
//Adafruit_BMP280 bmp(BMP_CS, BMP_MOSI, BMP_MISO,  BMP_SCK);
Adafruit_ADS1115 ads;  /* Use this for the 16-bit version */
//Adafruit_ADS1015 ads;     /* Use this for the 12-bit version */
float Y = 0.0;
float alpha = 0.5;   // valor entre 0-1 , a más alto el valor mayor velocidad, pero menor precisíon
float S=Y;
float i = 0;

char a;
int valor;
int ZE;
int BL;

int GR;
int RE;
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Serial.println("Hello!");
  //                                                ADS1015  ADS1115
  //                                                -------  -------
  //ads.setGain(GAIN_TWOTHIRDS);  // 2/3x gain +/- 6.144V  1 bit = 3mV      0.1875mV (default)
  //ads.setGain(GAIN_ONE);        // 1x gain   +/- 4.096V  1 bit = 2mV      0.125mV
  ads.setGain(GAIN_TWO);        // 2x gain   +/- 2.048V  1 bit = 1mV      0.0625mV
  // ads.setGain(GAIN_FOUR);       // 4x gain   +/- 1.024V  1 bit = 0.5mV    0.03125mV
  // ads.setGain(GAIN_EIGHT);      // 8x gain   +/- 0.512V  1 bit = 0.25mV   0.015625mV
  // ads.setGain(GAIN_SIXTEEN);    // 16x gain  +/- 0.256V  1 bit = 0.125mV  0.0078125mV

  if (!ads.begin(0x48)){
    Serial.println("Failed to initialize ADS.");
```

```
    while (1);}
   Serial.println(F("BMP280 Forced Mode Test."));
  //if (!bmp.begin(BMP280_ADDRESS_ALT, BMP280_CHIPID)) {
  if (!bmp.begin(0x76)) {
    Serial.println(F("Could not find a valid BMP280 sensor, check wiring or ""try a different
address!"));
    while (1);
    delay(10);}
  /* Default settings from datasheet. */
  bmp.setSampling(Adafruit_BMP280::MODE_FORCED,     /* Operating Mode. */
                  Adafruit_BMP280::SAMPLING_X2,     /* Temp. oversampling */
                  Adafruit_BMP280::SAMPLING_X16,    /* Pressure oversampling */
                  Adafruit_BMP280::FILTER_X16,      /* Filtering. */
                  Adafruit_BMP280::STANDBY_MS_500); /* Standby time. */

 /*-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
-----------------------*/
                                        /*NOMBRES Y ORDEN DE VARIABLES*/
 /* FECHA - HORA - Z.OSCURIDAD(milivoltios) - BLUE, GREEN, RED,|   MAX.ZERO,
MAX.BLUE, MAX.GREEN, MAX.RED,| TEMPERATURA, PRESIÓN AT., ALTITUD */
 /*-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
-----------------------*/
}

float filtro_pasa_bajo(float val){
  Y = (float)val;
  S = (alpha*Y)+((1-alpha)*S);
  return S;}

void loop() {

  a = Serial.read();

  if(a=='1'){
    valor = 1;
  }
  else if(a=='0'){
    valor = 0;    }
  int16_t adc0, adc1, adc2, adc3;
  float volts0, volts1, volts2, volts3;

  adc0 = ads.readADC_SingleEnded(0);
  adc1 = ads.readADC_SingleEnded(1);
  adc2 = ads.readADC_SingleEnded(2);
  adc3 = ads.readADC_SingleEnded(3);

  volts0 = ads.computeVolts(adc0)*1000;
  volts1 = ads.computeVolts(adc1)*1000;
  volts2 = ads.computeVolts(adc2)*1000;
  volts3 = ads.computeVolts(adc3)*1000;
```

```
  float LZEROO = 0; //276
  float LZERO = filtro_pasa_bajo(volts0);
  float LBLUE = filtro_pasa_bajo(volts1)-LZEROO;
  float LGREEN =filtro_pasa_bajo(volts2)-LZEROO;
  float LRED = filtro_pasa_bajo(volts3)-LZEROO;

   Serial.print(" ZE: ");
   Serial.print(LZERO,1);
   Serial.print(" , ");
   Serial.print("B: ");
   Serial.print(LBLUE,1); //
   Serial.print(" , ");
   Serial.print("G: ");
   Serial.print(LGREEN,1);   //
   Serial.print(" , ");
   Serial.print("R: ");
   Serial.print(LRED,1);    //
   Serial.print(",| ");
   if(valor ==1){
     if(ZE < LZERO){ ZE = LZERO;}
     if(BL < LBLUE){ BL = LBLUE;}
     if(GR < LGREEN){GR = LGREEN;}
     if(RE < LRED){ RE = LRED;}
    Serial.print(" ZE: "); Serial.print(ZE,1);Serial.print(" , ");
    Serial.print("B: ");Serial.print(BL,1); Serial.print(" , ");
    Serial.print("G: ");Serial.print(GR,1);   Serial.print(" , ");
    Serial.print("R: ");Serial.print(RE,1);    Serial.print(",| "); }
  // must call this to wake sensor up and get new measurement data
  // it blocks until measurement is complete
  if (bmp.takeForcedMeasurement()) {
   // can now print out the new measurements
   //Serial.print(F("Temperature = "));
   Serial.print(bmp.readTemperature());
   Serial.print(" *C");
   Serial.print(" , ");
   //Serial.print(F("Pressure = ")); Serial.print(bmp.readPressure());
   Serial.print(" Pa"); Serial.print(" , ");
   //Serial.print(F("Approx altitude = "));
   Serial.print(bmp.readAltitude(1013.25)); /* Adjusted to local forecast! */
   Serial.println(" m ");
   //Serial.println(" , ");
   //Serial.print("Humidity = ");
   //Serial.print(bmp.readHumidity());
   //Serial.println(" %");
   //delay(100);
   }
  else {
   Serial.println("Forced measurement failed!");
 }
 }
```

ANEXO 3

```
/*********

----------**PRUEBA DE SENSORES LDR ----------**

*********/

int ldrlt = 0; //LDR top left - BOTTOM LEFT
int ldrrt = 3; //LDR top rigt - BOTTOM RIGHT
int ldrld = 1; //LDR down left - TOP LEFT
int ldrrd = 2; //ldr down rigt - TOP RIGHT

void setup() {
 // put your setup code here, to run once:
Serial.begin(9600);
 pinMode(ldrlt,INPUT);
 pinMode(ldrrt,INPUT);
 pinMode(ldrld,INPUT);
 pinMode(ldrrd,INPUT);
 delay(1000);
}
void loop() {
 // put your main code here, to run repeatedly:
 int lt = analogRead(ldrlt); // top left
 int rt = analogRead(ldrrt); // top right
 int ld = analogRead(ldrld); // down left
 int rd = analogRead(ldrrd); // down rigt
 Serial.print(lt);  Serial.print(" "); Serial.print(rt);
 Serial.print(" "); Serial.print(ld);
 Serial.print(" "); Serial.println(rd);
 delay(250);
}
```

ANEXO 4

```
 /*********

 ----------**ALGORITMO DEL SOLAR TRACKER**----------

 *********/

#include <Servo.h> // include Servo library
Servo servo1;
Servo servo2;

// 180 horizontal MAX
Servo horizontal; // horizontal servo
int servoh = 90;   // 90;     // stand horizontal servo

int servohLimitHigh = 180;
int servohLimitLow = 0;

// 65 degrees MAX
Servo vertical;   // vertical servo
int servov = 90;    //   90;     // stand vertical servo

int servovLimitHigh = 178;
int servovLimitLow = 20;


// LDR pin connections
//  name  = analogpin;
int ldrlt = A0; //LDR top left - BOTTOM LEFT
int ldrrt = A3; //LDR top rigt - BOTTOM RIGHT
int ldrld = A1; //LDR down left - TOP LEFT
int ldrrd = A2; //ldr down rigt - TOP RIGHT

unsigned long promedio1=0, promedio2=0, comodin1=0, comodin2=0,promedio3=0,
  comodin3=02, promedio4 = 0, comodin4=0;
unsigned short contador=0;

unsigned long  comodin11=0, comodin22=0, comodin33=0, comodin44=0;
unsigned short contador1=0;

void setup()
{
 Serial.begin(9600);
 //servo connections
 //name.attacht(pin);
 horizontal.attach(6);
 vertical.attach(5);
 horizontal.write(100);
 vertical.write(100);
 pinMode(ldrlt,INPUT);
```

```
  pinMode(ldrrt,INPUT);
  pinMode(ldrld,INPUT);
  pinMode(ldrrd,INPUT);
  delay(5000);
}

void loop()
{
  for(contador1 = 0; contador1<=10; contador1++)
  {
    for(contador=0; contador<=200; contador++)
    {
       promedio1 = analogRead(ldrlt);
       promedio2 = analogRead(ldrrt);
       promedio3 = analogRead(ldrld);
       promedio4 = analogRead(ldrrd);

       comodin1 = comodin1+promedio1;
       comodin2 = comodin2+promedio2;
       comodin3 = comodin3+promedio3;
       comodin4 = comodin4+promedio4;
       }

       comodin1=comodin1/200;
       comodin2=comodin2/200;
       comodin3=comodin3/200;
       comodin4=comodin4/200;

  //int lt = analogRead(ldrlt); // top left
  //int rt = analogRead(ldrrt); // top right
  //int ld = analogRead(ldrld); // down left
  //int rd = analogRead(ldrrd); // down rigt

     int lt = comodin1; // top left
     int rt = comodin2; // top right
     int ld = comodin3; // down left
     int rd = comodin4; // down rigt

     comodin11 = comodin11+((lt + rt) / 2);
     comodin22 = comodin22+((ld + rd) / 2);
     comodin33 = comodin33+((lt + ld) / 2);
     comodin44 = comodin44+((rt + rd) / 2);
     }
     comodin11=comodin11/10;
     comodin22=comodin22/10;
     comodin33=comodin33/10;
     comodin44=comodin44/10;
     int avt=comodin11;
     int avd=comodin22;
     int avl=comodin33;
     int avr=comodin44;
```

```
// int dtime = analogRead(4)/20; // read potentiometers
// int tol = analogRead(5)/4;
int dtime = 50;
int tol = 15;

//int avt = ((lt + rt) / 2); // average value top
//int avd = ((ld + rd) / 2); // average value down
//int avl = ((lt + ld) / 2); // average value left
//int avr = ((rt + rd) / 2); // average value right

int dvert = avt - avd; // check the diffirence of up and down
int dhoriz = avl - avr;// check the diffirence og left and rigt

Serial.print(avt);
Serial.print(" ");
Serial.print(avd);
Serial.print(" ");
Serial.print(avl);
Serial.print(" ");
Serial.print(avr);
Serial.print("   ");
Serial.print(dtime);
Serial.print("   ");
Serial.print(tol);
Serial.print(" VE: ");
Serial.print(servov);
Serial.print(" HOR: ");
Serial.print(servoh);
Serial.println(" ");

if (-1*tol > dvert || dvert > tol) // check if the diffirence is in the tolerance else change
 vertical angle
{
if (avt > avd)
{
  servov = ++servov;
   if (servov > servovLimitHigh)
   {
    servov = servovLimitHigh;
   }
}
else if (avt < avd)
{
  servov= --servov;
  if (servov < servovLimitLow)
{
  servov = servovLimitLow;
}
}
vertical.write(servov);
}
```

```
 if (-1*tol > dhoriz || dhoriz > tol) // check if the diffirence is in the tolerance else change
  horizontal angle
 {
 if (avl > avr)
 {
   servoh = --servoh;
   if (servoh < servohLimitLow)
   { servoh = servohLimitLow; }
 }
 else if (avl < avr)
 {
   servoh = ++servoh;
    if (servoh > servohLimitHigh)
    {
    servoh = servohLimitHigh;
}
 }
 else if (avl = avr)
{ // nothing  }
 horizontal.write(servoh);
 }
  delay(dtime);}
```