

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INSTRUMENTAL PARA EL MONITOREO DE IRRADIANCIA HORIZONTAL GLOBAL E IRRADIANCIA HORIZONTAL DIFUSA PARA LA ESTIMACIÓN DE IRRADIANCIA NORMAL DIRECTA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y CONTROL**

ROBERTO DANNES PILLAJO CORELLA
roberto.pillajo@epn.edu.ec

DIRECTOR: PHD.EDUARDO FAUSTO ÁVALOS CASCANTE
eduardo.avalos@epn.edu.

Quito, 14 de diciembre de 2021

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Roberto Dannes Pillajo Corella, bajo mi supervisión.

EDUARDO ÁVALOS CASCANTE PhD.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Roberto Dannes Pillajo Corella declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

ROBERTO DANNES PILLAJO CORELLA

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Margarita y Vinicio por ser el pilar fundamental de mi vida, por brindarme su apoyo y amor incondicional.

A Boris por inspirarme a ser mejor cada día, por sumergirme en el hermoso mundo del conocimiento y estar pendiente de mí en todo momento.

A toda mi familia por estar siempre pendientes de mis padres de mi hermano y de mí.

A todos mis abuelitos que son y han sido ejemplos de vida y alegría.

A Ariel y Jeziel por alegrar nuestras vidas.

DANNES

AGRADECIMIENTO

A mis padres, Margarita y Vinicio por brindarme siempre su apoyo, paciencia, esfuerzo y sobre todo su amor incondicional, que me han ayudado a cumplir cada uno de mis sueños y metas. Les agradezco eternamente por inculcar en mí, los valores del esfuerzo, valentía, respeto, dedicación, y lealtad. Gracias por brindarme su aliento siempre que necesité. Esto es por ustedes.

A mi hermano Boris, mi fuente de inspiración. Por brindarme su cariño y apoyo incondicional, por enseñarme prácticamente todo en la vida, a vivirla intensamente, a disfrutar cada segundo y sobre todo a hacer realidad tus sueños.

A mi director de tesis Eduardo Ávalos por su apoyo y conocimiento brindados durante el desarrollo de este trabajo, sin su apoyo esto no hubiera sido posible.

A la Escuela Politécnica Nacional y a los profesores que de alguna manera ayudaron a mi formación y me transmitieron conocimientos durante mi paso por la carrera de Ingeniería en Electrónica y Control.

A Puli, por brindarme su cariño y no permitirme rendir, solo ella sabe cuánto me costó.

Sapillo, Ronald, Joss por acompañarme en los momentos más difíciles de este trabajo.

A Josua, Harold, Leandro, que me apoyaron demasiado en el transcurso de la carrera.

A todo aquel que me brindó su mano en esta travesía, mil veces gracias.

DANNES

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. Tabla de contenido

AVAL.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.2 ALCANCE.....	3
1.3 MARCO TEÓRICO	4
1.3.1 MEDICIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR	4
1.3.2 RECURSO SOLAR EN EL ECUADOR	5
1.3.3 CUANTIFICACIÓN DEL RECURSO SOLAR EN EL ECUADOR	7
1.3.5 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE IRRADIANCIA SOLAR	9
1.3.6 RADÍOMETROS DE BANDA DE SOMBRA ROTATORIA.....	14
1.3.7 RASTREO SOLAR.....	19
2. METODOLOGÍA.....	22
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA RSR	23
2.2 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO	25
2.2.1 PIRANÓMETRO	25
2.2.2 SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS	28
2.2.2.1 SISTEMA EMBEBIDO 1	28
2.2.2.2 ACONDICIONAMIENTO	33
2.2.2.3 CONVERTOR ANÁLOGICO-DIGITAL (ADC).....	35
2.2.2.4 SENSOR DE POSICIÓN INICIAL.....	38
2.2.2.5 MÓDULO GPS	39
2.2.2.6 MOTOR A PASOS.....	41
2.2.2.7 COMUNICACIÓN SERIAL.....	51
2.2.3 SISTEMA DE REGISTRO Y VISUALIZACIÓN DE DATOS (SRVD).....	54
2.2.3.1 SISTEMA EMBEBIDO 2	54

2.2.3.2	SERVIDOR WEB Y BASE DE DATOS.....	58
2.2.3.3	INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA (HMI)	61
2.3	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO.....	64
2.3.1	SOPORTE MECÁNICO DEL PIRANÓMETRO	64
2.3.2	SOPORTE MECÁNICO DEL SISTEMA SOMBRA DE BANDA	67
2.4	BIBLIOTECA PYTHON (PYSOLAR)	70
2.5	ESTACIÓN METEOROLÓGICA COMERCIAL	71
2.5.1	PIRANÓMETRO NIPPON ELECTRIC	72
2.5.2	DATALOGGER CF200	73
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	74
3.1	DIAGRAMA GENERAL DEL PROTOTIPO	74
3.2	DÍAS CONSIDERADOS PARA LA CALIBRACIÓN	78
3.3	VALIDACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS	81
3.3.1	COMPONENTE GLOBAL	81
3.3.2	POSICIÓN SOLAR.....	85
3.3.3	COMPONENTE DIRECTO Y DIFUSO	86
3.3.4	REGISTRO Y VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS.....	93
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
4.1	CONCLUSIONES.....	95
4.2	RECOMENDACIONES	98
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	99
6.	ANEXOS	103

RESUMEN

El Ecuador ocupa una posición privilegiada sobre la línea ecuatorial en donde nuestro país goza de recurso solar abundante y disponible durante todo el año, donde se estima que la radiación incidente media es de 3-4 KWh/m²/día. Entonces, la implementación de centrales de generación fotovoltaica puede resultar muy ventajosa, pero la evaluación del recurso solar para garantizar si un proyecto de esta magnitud es viable o no, es necesaria.

En Ecuador no se cuentan con las suficientes mediciones terrestres de radiación solar, para garantizar si un proyecto fotovoltaico a gran escala es viable o no. Solo se cuenta con mapas solares, que basan sus resultados en mediciones satelitales que no tienen la misma validez.

En este proyecto se diseña y construye un sistema de monitoreo de irradiancia solar basado en un radiómetro RSR que se encarga del monitoreo de los tres componentes de irradiancia GHI, DHI, y DNI. El prototipo está conformado por un piranómetro basado en un fotodiodo, un sistema mecánico tipo RSR y un sistema electrónico conformado por dos sistemas embebidos, que se encargan de la adquisición de datos y el registro de los mismos respectivamente. Se implementa un algoritmo para la corrección del DHI y un algoritmo para hallar la posición relativa del sol, dato importante para el cálculo del DNI.

Los valores de irradiancia son guardados en una base de datos (datos que pueden ser descargados para su posterior análisis) y son mostrados en una página Web y en un HMI desarrollado en LabVIEW 2020.

PALABRAS CLAVE: Rotating Shadowband Radiometer, Irradiancia Horizontal Global, Irradiancia Horizontal Difusa, Irradiancia Normal Directa, irradiancia solar, piranómetro, fotodiodo, seguidor solar, posición solar.

ABSTRACT

Ecuador occupies a privileged position on the equatorial line where our country has abundant solar resources available throughout the year, where it is estimated that the average incident radiation is 3-4 KWh/m²/day. So, the implementation of photovoltaic generation plants can be very advantageous, but the evaluation of the solar resource to guarantee if a project of this magnitude is viable or not, is necessary.

In Ecuador there are not enough terrestrial measurements of solar radiation to guarantee whether a large-scale photovoltaic project is viable or not. There are only solar maps, which base their results on satellite measurements that do not have the same validity.

In this project, a solar irradiance monitoring system is designed and built based on an RSR radiometer that is in charge of monitoring the three irradiance components GHI, DHI, and DNI. The prototype is made up of a pyranometer based on a photodiode, an RSR mechanical system and an electronic system made up of two embedded systems, which are responsible for data acquisition and data recording, respectively. An algorithm is implemented to correct the DHI and an algorithm to find the relative position of the sun, important data for the calculation of the DNI.

The irradiance values are stored in a database (data that can be downloaded for later analysis) and are displayed on a Web page and in an HMI developed in LabVIEW 2020.

KEYWORDS: Rotating Shadowband Radiometer, Global Horizontal Irradiance, Diffuse Horizontal Irradiance, Direct Normal Irradiance, solar irradiance, pyranometer, photodiode, solar tracker, solar position.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la alta demanda energética a nivel mundial en combinación con la problemática del calentamiento global debido a la emisión indiscriminada de gases de invernadero y el inminente agotamiento de las fuentes energéticas tradicionales (combustibles fósiles); han desembocado en la necesidad de un cambio en la matriz energética, cuyos esfuerzos se encaminan a la producción de la denominada energía limpia, destinada a cubrir una gran parte de la demanda energética del planeta. [1]

En el Ecuador, el cambio de la matriz energética que plantea el Plan Nacional de El Buen Vivir señala que nuestro país debe incrementar la participación de las energías renovables en la generación eléctrica, entre las cuales se encuentra la energía solar. Para el desarrollo de proyectos de tecnologías solares es esencial conocer el lugar óptimo para su instalación mediante el uso de bases de datos de irradiación o mapas solares. [2]

La implementación en Ecuador de centrales de generación fotovoltaica puede resultar muy ventajosa debido a los niveles de radiación casi constantes a lo largo del año, por otro lado, la dirección de la radiación solar directa cae casi perpendicular al plano horizontal en zonas cercanas a la línea equinoccial. Estudios determinan que el Ecuador es considerado un área de alto potencial de radiación solar donde se estima que la radiación incidente media es de 3-4 KWh/m²/día. [3]

La investigación y desarrollo de las energías alternativas deben tener una secuencia estratégica en la planificación de estos vectores energéticos; no se puede innovar tecnología sin antes haber evaluado la disponibilidad y calidad del recurso con el que cuenta el país. El primer paso en el cambio para el desarrollo de las energías no convencionales, es la evaluación de los recursos renovables disponibles. [4]

Para el caso particular del Ecuador la falta de estaciones meteorológicas en puntos estratégicos y la no existencia de datos climatológicos (debido especialmente a la gran cantidad de microclimas producidos por la influencia de la cordillera de los Andes y la ubicación geográfica del país sobre la línea equinoccial) hace difícil medir el recurso solar con precisión.

Actualmente se dispone de valores radiación, como los descritos en el “Mapa Solar del Ecuador (2019)”, los cuales se basan en información satelital generada por el “National Renewable Energy Laboratory” (NREL) de los Estados Unidos (2015) [5]; y aquella proporcionada por el INAMHI, del cual Ecuador debido a su solo una de sus estaciones que actualmente monitorea el recurso solar, coincide con la ubicación del área de estudio [6].

Los investigadores no cuentan con las suficientes observaciones de radiación solar medidas en superficie que permitan realizar un dimensionamiento próximo a la realidad, para plantear propuestas de aplicaciones, por lo que se presenta la necesidad de generar información confiable sobre el recurso solar [4] .

Por lo tanto, el presente trabajo propone el desarrollo de un prototipo de un sistema instrumental basado en el radiómetro RSR (Rotating Shadowband Radiometer) como una alternativa económica para la medición de radiación solar, el mismo que se encargará del monitoreo de los tres componentes de irradiancia GHI (Irradiancia Horizontal Global), DNI (Irradiancia Normal Directa), y DHI (Irradiancia Horizontal Difusa), con el objetivo de aportar mediciones terrestres (en el área de estudio) en tiempo real de los tres componentes de irradiancia, con la posibilidad de en un futuro integrar vía comunicación a varios de estos dispositivos centralizando la información adquirida en varios puntos geográficos, estimando así la irradiancia incidente en una amplia zona geográfica y creando una base de datos confiable del recurso solar, que podrá ser usado por la universidad u otros, para realizar los distintos estudios energéticos.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es:

- Diseñar e implementar un sistema instrumental para el monitoreo de irradiancia horizontal global e irradiancia horizontal difusa para la estimación irradiancia normal directa

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Realizar una revisión bibliográfica para entender el funcionamiento y el diseño de sistemas de monitoreo de radiación solar RSR, así como los principales métodos de corrección de errores sistemáticos y los distintos métodos de rastreo solar.
- Diseñar e implementar el software y hardware del prototipo instrumental tipo RSR para el monitoreo de radiación.
- Implementar una estructura mecánica del sistema de monitoreo de radiación, para obtener la mejor respuesta de cada uno de los elementos.
- Diseñar e implementar un interfaz gráfico para poder realizar el monitoreo de radiación en tiempo real.

- Realizar pruebas que permitan validar el funcionamiento del sistema implementado.

1.2 ALCANCE

- Se realizará una recopilación bibliográfica para entender el funcionamiento de los sistemas de monitoreo de radiación RSR comerciales existentes en el mercado, determinando así las semejanzas y diferencias en el diseño mecánico-electrónico de cada uno de los dispositivos.
- Se hará una revisión bibliográfica acerca de los principales errores sistemáticos que presentan los dispositivos RSR, y se analizarán las diferentes técnicas para reducir los mismos.
- Se revisarán las hojas de datos de los diferentes fotodiodos de silicio para extraer sus características principales, tales como rango de longitud de onda a los que trabaja, respuesta ante perturbaciones como la temperatura, inmunidad al ruido, características eléctricas, precisión y exactitud, para seleccionar el que sea más adecuado para esta aplicación.
- Se realizará una revisión bibliográfica acerca de métodos de rastreo solar para la obtención del ángulo cenital solar, comparando los mismos para determinar ventajas y desventajas de cada uno, eligiendo así el método más apropiado para este trabajo.
- Se seleccionará una tarjeta embebida que se adapte mejor a las necesidades para el tratamiento de los datos adquiridos.
- Se diseñará el sistema electrónico necesario para monitorear irradiancia global horizontal (GHI), irradiancia horizontal difusa (DHI) e irradiancia normal directa (DNI).
- Se implementarán algoritmos de rastreo solar, de control para la rotación de la banda de sombra, algoritmos de corrección debido al exceso de sombra generada por la banda y errores debido a la respuesta espectral limitada del sensor de fotodiodo.
- Se hará una revisión acerca de las características mecánicas que tendrá el sistema, así como las dimensiones ideales que debería tener la banda de sombra.

- Se implementará la estructura mecánica para el accionamiento de la banda de sombra, donde también se montarán los elementos electrónicos de tal manera que se pueda obtener la mejor respuesta del sistema instrumental, así como facilidad de conexión y comunicación.
- El sistema mostrará las variables de interés de manera remota desde un computador a través de un interfaz humano máquina (HMI) en donde se almacenarán los datos para su posterior tratamiento.
- Se realizará una validación del prototipo, al comparar sus resultados con los de un sistema de monitoreo de radiación comercial.

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 MEDICIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR

Las mediciones de radiación solar son la base para comprender la fuente de energía primaria de la Tierra. Estudiar el sol y aplicar este conocimiento ha mejorado la vida en la Tierra desde los inicios de la historia. Hoy en día, están en funcionamiento instalaciones de generación solar de 500 MW y se están construyendo instalaciones más grandes. El mercado fotovoltaico mundial alcanzó tasas de crecimiento anual recientes de casi el 50% (IEA PVPS 2017). Para 2016, la instalación de instalaciones con 402000 MW de capacidad máxima de generación solar a nivel mundial tenía la producción de energía anual equivalente a 70 o 80 centrales eléctricas de carbón. (REN21 2018). El mundo se está preparando de manera irregular para la era solar cuando los combustibles fósiles se agotarán y se necesitarán fuentes de energía ambientalmente benignas para satisfacer la de demanda mundial de energía de manera sostenible [7] .

En la actualidad, gran variedad de tecnología solar se está investigando y probando en laboratorios alrededor de todo el mundo. La energía solar es gratuita y se encuentra a disponibilidad de todos, y las tecnologías encargadas de la conversión de la irradiación solar en energía aprovechable están reduciendo los precios conforme aumenta la producción y crece la industria solar. La industria solar tiene un futuro magnífico debido a que se están poniendo en marcha grandes instalaciones de generación de energía sostenible para cubrir la demanda energética de la creciente población mundial, mientras se reducen los efectos del calentamiento global, debido a los llamados gases de invernadero.

Al igual que en las centrales de generación hidroeléctrica se necesitan datos del flujo de corriente para diseñar y operar la instalación, el conocimiento de los datos de irradiancia solar tanto espaciales como temporales son fundamentales para el diseño y operación de las centrales de generación solar eléctrica.

Debido a que alrededor del mundo existen proyectos solares multimillonarios y hasta billonarios, surge la gran necesidad de obtener datos solares de alta calidad a largo plazo, para disminuir los riesgos financieros y sus costos. Los datos solares son

necesarios en la planificación y el diseño de la central solar, así como para su funcionamiento e integración a la red eléctrica.

Además, para reducir los costos es necesario probar e implementar nuevas tecnologías, así como validar y caracterizar las mejoras de diseño, para ello se requieren mediciones de irradiancia solar de la más alta calidad. Esto debido a que mejorar la eficiencia del 1 al 2% de los convertidores estáticos de energía pueden traducirse en una reducción de costos millonaria para el diseño y operación de la central de energía.

Las personas e instituciones involucradas económicamente en el proyecto de generación están interesados en saber si este resulta viable y si la capacidad de la central podrá pagar la inversión incluso en los días más nublados. Una base de datos de calidad sobre el recurso solar refleja estimaciones más precisas del rendimiento del proyecto, lo que disminuye la incertidumbre y el riesgo de los inversionistas, lo que a su vez se traduce en bajas tasas de interés que a su vez se traduce en bajos costos para los clientes y ganancia segura para los propietarios [7].

Además de la industria solar existen otros grupos interesados en la medición del recurso solar. El campo agrícola, ha utilizado los datos solares para estimar las necesidades de riego a lo largo del año. Los meteorólogos también usan datos del recurso solar en sus estudios. En el campo arquitectónico se utiliza la luz solar para reducir la demanda energética en los edificios.

Existe una amplia comunidad de usuarios de datos solares y grupos que proporcionan esta información. Muchos de estos grupos son agencias gubernamentales encargadas de proporcionar estos datos. Los científicos están ejecutando redes de medición solar para estudiar el clima y el tiempo (ARM 2017; Augustine 2000).

La industria está buscando sitios con datos de recursos solares “rentables” para convencer a la comunidad financiera de la viabilidad del proyecto propuesto. Grupos e individuos privados están realizando mediciones para evaluar el desempeño de los sistemas solares. Para satisfacer las necesidades de este amplio grupo de partes interesadas con sus diversos requisitos, se encuentra disponible una amplia variedad de instrumentos solares. El precio y la calidad de estos instrumentos varían ampliamente y el equipo más caro suele proporcionar resultados más precisos.

1.3.2 RECURSO SOLAR EN EL ECUADOR

Debido a la situación geográfica de nuestro país sobre la línea ecuatorial, el recurso solar es casi constante a lo largo del año, con un nivel de radiación promedio de $4574.99 \text{ Wh/m}^2/\text{día}$, según el ATLAS SOLAR DEL ECUADOR elaborado por el Consejo Nacional de Electricidad -CONELEC, como se muestra en la figura 2.1. [8]

A pesar de esta ventaja, la presencia de la cordillera de los Andes crea múltiples microclimas que pueden reducir el potencial en ciertas regiones del país. [5]

Los niveles de radiación solar en el Ecuador son lo suficientemente altos como para implementar tecnologías solares térmicas y fotovoltaicas, según Cevallos-Sierra y

Ramos-Martín sugieren que un valor de $3.8 \text{ KWh}/\text{m}^2/\text{día}$ como un buen compromiso a partir del cual un proyecto fotovoltaico es viable [9].

En “El Mapa Solar del Ecuador” publicado en el año 2019, muestra que aproximadamente el 75% del mapa de irradiancia horizontal global anual del territorio ecuatoriano tienen niveles de irradiancia superiores a este valor.

Hay que prestar atención especialmente a las provincias de Pichincha e Imbabura con niveles de radiación de $(4.5 - 5.7 \text{ KWh}/\text{m}^2/\text{día})$ son importantes ya que buena parte de la industria y la población se asienta en estas regiones. Loja cuenta con el mayor potencial del país continental con niveles de radiación desde 4.2 hasta los $5.7 \text{ KWh}/\text{m}^2/\text{día}$. La industria en esta región no está tan desarrollada, pero la implementación de proyectos solares puede ayudar a diversificar su matriz productiva.

Finalmente tenemos a Galápagos que goza de los máximos niveles de radiación del país alcanzando valores de $4.8-6.3 \text{ KWh}/\text{m}^2/\text{día}$, lo que sugiere una alta viabilidad en la implementación de tecnologías solares en las islas. [5]

Esta oportunidad de fuente primaria de energía establece el desafío de planificar la matriz energética que considere incrementar la capacidad fotovoltaica instalada mediante proyectos de centrales de generación, sistemas conectados a red y/o sistemas aislados, para lo cual es importante medir el recurso solar en distintos puntos del país, para poder evaluar si un proyecto es o no fiable.

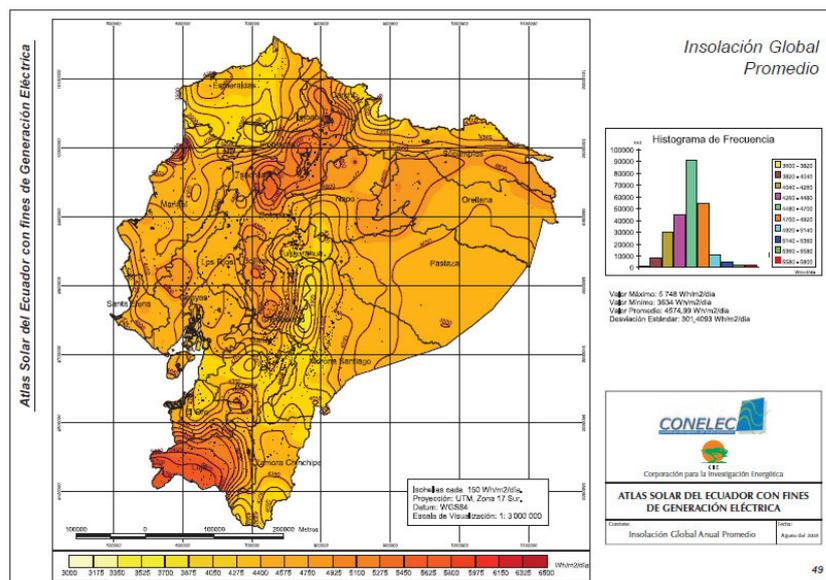


Figura 1.1 Insolación Global Promedio en el Ecuador (CONELEC 2008)

1.3.3 CUANTIFICACIÓN DEL RECURSO SOLAR EN EL ECUADOR

Una de las herramientas disponibles para cuantificar el recurso solar es el “Atlas solar del Ecuador con fines de generación eléctrica”, que fue publicado por el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) en el año 2008. Esta herramienta fue elaborada empleando promedios mensuales y anuales de estimaciones satelitales de irradiación solar tomados de la base de datos de radiación solar del Laboratorio de Energías Renovables (NREL) de Estados Unidos con el modelo CSR (Climatological Solar Radiation Model). Debido a que la malla de estimaciones es muy grande (40x40 km), un algoritmo para interpolar los datos a una malla más pequeña fue desarrollado. En el 2015 NREL afinó sus modelos de estimación espacial de 4x4 Km. La nueva base de datos, al tener una resolución geográfica considerablemente mayor y un modelo matemático mejorado, presenta estimaciones más confiables [5]

En el año 2019, se publica el “Mapa Solar del Ecuador”, En este trabajo se plantea un estudio para validar la nueva base de datos satelitales del NREL utilizando mediciones terrestres de radiación solar para el Ecuador.

Los datos de medición en tierra generalmente muestran precisiones significativamente más altas que los datos de irradiancia derivados de satélites, cuando se respetan las pautas generales con respecto a la selección y preparación del sitio, la selección y mantenimiento del instrumento y el monitoreo de la calidad de los datos [10].

En el territorio ecuatoriano existen estaciones meteorológicas para la medición del recurso solar pertenecientes al INAMHI, la Secretaría del Ambiente del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito e INER. El Instituto Nacional de Metrología e Hidrología (INHAMI) cuenta con 519 estaciones meteorológicas repartidas en todo el territorio ecuatoriano. El Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables cuenta con 27 estaciones solares, 17 de las cuales están en Cuenca y 10 en Chimborazo. Además, la secretaria de Ambiente del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito posee 6 estaciones meteorológicas que miden GHI [5].

Para el desarrollo de proyectos con tecnologías solares es importante conocer el lugar más óptimo para su instalación mediante bases de datos de irradiación o mapas solares. Los investigadores no cuentan con suficientes observaciones de radiación solar medidas en la superficie que permitan realizar un dimensionamiento más cercano a la realidad, por lo que se presenta la necesidad de generar información confiable del recurso solar. [6]

1.3.4 IRRADIANCIA SOLAR

Es la magnitud radiométrica que mide el flujo de energía solar recibida por cada metro cuadrado de superficie, y es un parámetro muy importante para los sistemas de obtención de energía solar. La unidad SI para la irradiancia es el vatio por metro cuadrado $\left(\frac{W}{m^2}\right)$.

La radiación que incide sobre la superficie terrestre se descompone en cuatro tipos de radiación, estos son:

Irradiancia solar total:

La energía solar en todas las longitudes de onda que alcanza la parte superior de la atmósfera de la Tierra se llama irradiancia solar total (TSI).

Irradiancia normal directa:

La irradiancia normal directa (DNI) es la cantidad de energía solar instantánea recibida por unidad de área, en una superficie perpendicular a la dirección actual del sol en el cielo, que no fue dispersada por la atmósfera terrestre.

En el caso del DNI, el ángulo incidente es el ángulo cenital solar.

Irradiancia horizontal difusa:

La irradiancia horizontal difusa (DHI) es la cantidad de energía instantánea que fue dispersada por la atmósfera recibida por una unidad de área, en una superficie horizontal.

Irradiancia horizontal global:

La irradiancia horizontal global (GHI), es la suma geométrica de la irradiancia normal directa y la horizontal difusa, más el albedo, que es la irradiancia reflejada por el entorno propio del lugar.

La ecuación que relaciona los tres componentes de irradiancia y que será de suma importancia en este trabajo es:

$$GHI = DNI * \cos(sza) + DHI \tag{2.1}$$

Donde:

sza: es el ángulo cenital solar

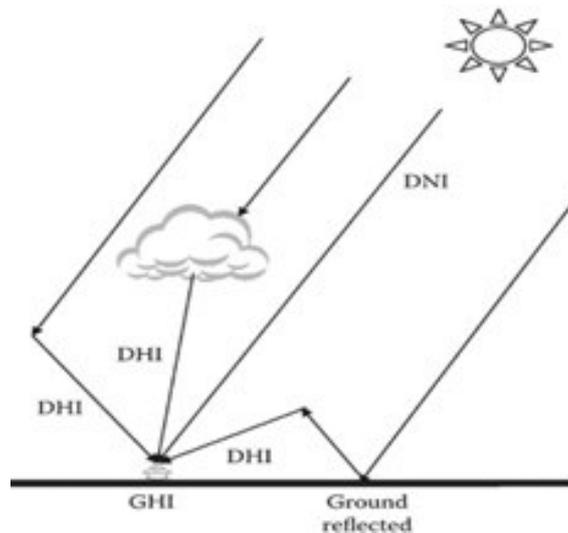


Figura 1.2 Dibujo que muestra las fuentes de DHI a medida que el DNI pasa a través de la atmósfera. El DHI puede provenir de la dispersión de los componentes de la atmósfera, las nubes y una porción de tierra reflejada. Tomado de [7]

1.3.5 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE IRRADIANCIA SOLAR

Para caracterizar completamente el recurso solar, se deben conocer tres componentes de irradiancia horizontal global (GHI), irradiancia normal directa (DNI), e irradiancia horizontal difusa (DHI) que contribuyen a la energía incidente.

1.3.5.1 PIRANÓMETROS

Se usa un piranómetro para medir la irradiancia solar incidente desde cualquier punto del hemisferio hacia la superficie, si se lo coloca sobre un plano fijo paralelo a la superficie terrestre el piranómetro mediría lo que se conoce como irradiancia horizontal global (GHI), y si la radiación del haz directo se encuentra sombreada por un anillo o disco de sombra giratorio el piranómetro mide la irradiancia horizontal difusa (DHI). [11]

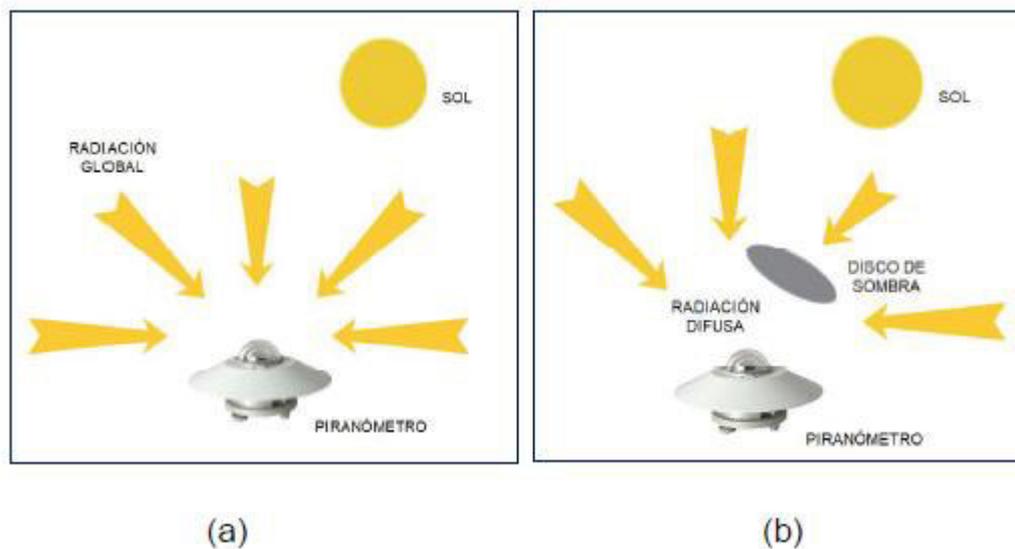


Figura 1.3 (a) Medición de GHI con un piranómetro, (b) Medición de DHI con un piranómetro. Tomado de [12]

La medida de la irradiancia requiere, por definición, que la respuesta del sensor del piranómetro a la radiación varíe con el coseno del ángulo de incidencia respecto de la vertical a la superficie del sensor. Esto es, respuesta máxima cuando la radiación alcanza al sensor perpendicularmente (sol en el cenit), respuesta nula cuando el sol está en el horizonte (ángulo de incidencia de 90°) y respuesta mitad de la máxima cuando la radiación incidente es de 60° . Por tanto, se deduce de la definición que un piranómetro debe tener una respuesta “direccional” o, como se suele denominar, respuesta coseno para enfatizar el hecho de que la respuesta debe ser idealmente análoga a la función coseno. La diferencia entre la respuesta real del piranómetro y la respuesta coseno ideal se denomina error coseno. [13]

Un buen piranómetro debe presentar una respuesta lo más cercana a la respuesta coseno ideal.

Un piranómetro generalmente se encuentra equipados con una doble cúpula de vidrio que protege al sensor de la convección y, por lo general tienen una burbuja de nivel

para mantener horizontal al dispositivo. En la mayoría de los modelos de termopila, están cubiertos por plástico blanco para proteger el dispositivo del sol, evitando así el calentamiento del metal y reduce los reflejos. Además, consta de gránulos de silicio que ayuda a absorber la humedad para que no ingrese al instrumento. La figura muestra la construcción típica de los piranómetros de Kipp & Zonen. [10]

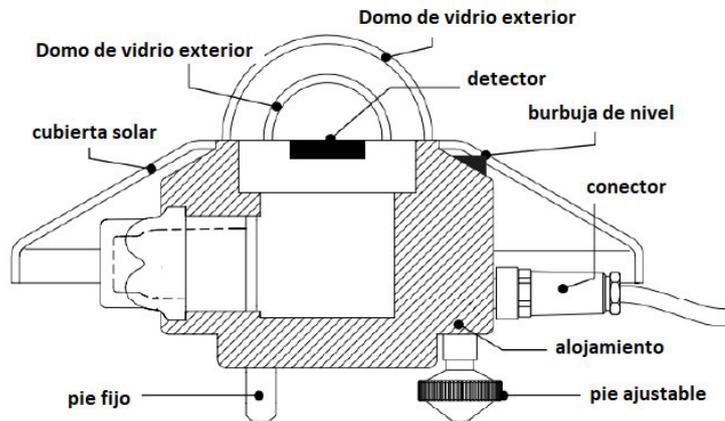


Figura 1.4 (a) Mediación de GHI con un piranómetro, (b) Medición de DHI con un piranómetro. Tomado de [12]

1.3.5.1.1 Piranómetros de termopila

Todos los radiómetros de termopila se basan en el efecto termoeléctrico, es decir el generar voltaje proporcional a partir de las diferencias de temperatura entre dos metales diferentes. El efecto termoeléctrico fue descubierto en 1821 por el físico alemán Thomas Seebeck. [7]

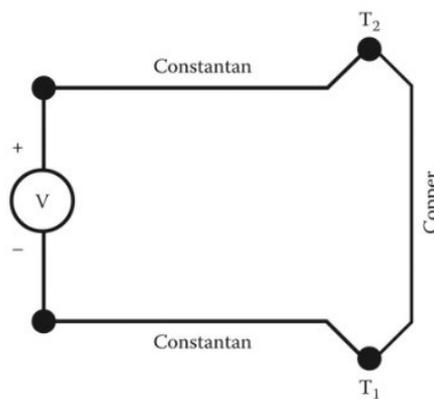


Figura 1.5 Diagrama de circuito que ilustra el termopar donde dos metales diferentes a diferentes temperaturas generan un voltaje eléctrico cuando los electrones fluyen desde la unión caliente T₂ hacia la unión fría T₁

- **Piranómetros de termopila de disco negro:**

Uno de los piranómetros más usados de este tipo, es el Eppley modelo PSP, que consta de dos cúpulas de cristal, que sirven para filtrar la radiación infrarroja procedente de la atmósfera y la radiación de onda corta proveniente del del disco solar, evitando que tengan contacto directo con el receptor. Consta de una termopila, cuya unión caliente está recubierta de una pintura de alta absorptividad. El cuerpo del instrumento está constituido por una pieza cilíndrica de bronce protegida por un disco que aloja la circuitería electrónica y que a su vez sirve de sumidero de calor para la unión fría de la termopila [14]. La señal de voltaje será proporcional a la diferencia de temperaturas entre la unión fría y caliente.



Figura 1.6 Piranómetro SR11 de Hukseflux tomado de [14]

- **Piranómetros de termopila de blanco y negro (B/N):**

Estos instrumentos constan de una termopila pintada de blanco y negro como receptor. Las uniones frías de la termopila están unidas a las partes blancas y las uniones calientes a las partes negras del detector. La señal es proporcional a la diferencia de temperatura entre las uniones frías y las uniones calientes. Con respecto al piranómetro de disco negro completo, el B/N tiene un tiempo de respuesta considerablemente mayor (5 veces mayor), peor respuesta direccional y tiene problemas de degradación debido a las propiedades espectrales de la pintura con el tiempo. [14]

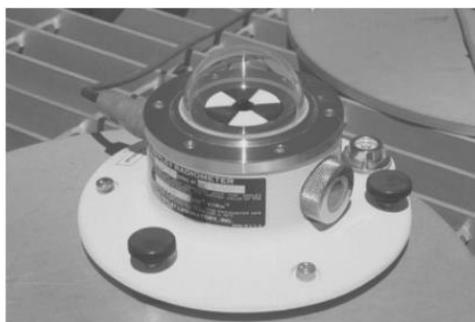


Figura 1.7 Imagen de un piranómetro B/N de Eppley tomado de [7]

1.3.5.1.2 Piranómetros basados en fotodiodos

Debido a su simplicidad de fabricación, muchos radiómetros solares se basan en el fotodiodo de silicio que responde a la radiación utilizando el efecto fotoeléctrico en lugar del efecto termoeléctrico.

Los piranómetros basados en fotodiodos ofrecen una opción de menor costo para medir la radiación solar.

Los fotodiodos miden el flujo incidente monitoreando la corriente a través de una resistencia de carga en serie con la resistencia serie del fotodiodo. La resistencia de derivación (shunt) es del orden de 10 – 1000 mega ohmios y es mucho más grande que la resistencia serie y la resistencia de carga combinadas. Luego se mide el voltaje V_o a través de la resistencia de carga R_l (ver figura 2.7). El voltaje a través de R_l se relaciona con la corriente generada por la radiación incidente que usa la ecuación

$$V_o = [I_s + I_l + I_n] * R_l * R_{sh} * [R_l + R_{sh} + R_s] \quad (2.2)$$

Donde:

I_l es la corriente de fuga

I_n es la corriente de ruido

Tanto I_l como I_n son muy pequeñas. La relación entre V_o e I_s se obtiene a través de calibración

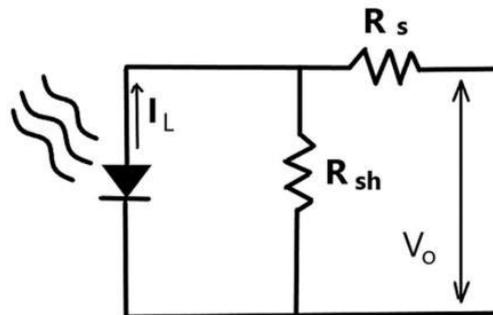


Figura 1.8 Circuito simplificado para medir corriente desde un fotodiodo iluminado. La luz incide en el fotodiodo y genera una corriente I_s que es proporcional a la radiación incidente.

La fotocorriente de un piranómetro de fotodiodo proporciona una medición de la irradiancia incidente de manera directa y precisa. Su precisión se puede mejorar mediante el uso de una óptica anterior (difusor) para mejorar la respuesta angular del instrumento. [7]

Los sensores de silicio, solo responden a un rango espectral limitado de 400 nm a 1100 nm, que no abarca todo el espectro de irradiancia (aproximadamente de 250 nm a 2500 nm). Además, su capacidad de respuesta varía dependiendo de la longitud de onda de la irradiancia recibida. Debido a la influencia de la masa de aire, esto da como resultado una inexactitud significativa durante los ángulos de elevación solar bajos.

Sin embargo, los piranómetros de silicio son utilizados ampliamente debido a sus bajos costos de adquisición, tiempo de respuesta rápido y facilidad de mantenimiento. Los

sensores de silicio tienen una respuesta en el rango de los microsegundos. Las termopilas generalmente necesitan de 1 a 5 segundos para alcanzar el 95% de su valor final. Los instrumentos que utilizan sensores de termopila, es decir, piranómetros y pirheliómetros se ven gravemente afectados por la suciedad incrustada en su cúpula de vidrio o ventana de protección, mientras que el piranómetro comercial de fotodiodo (LI-COR LI-200) debajo de un disco difusor se ve afectado solo levemente [10].

Esto se traduce a una diferencia importante en costos de mantenimiento y es el principal argumento para usar piranómetros de silicio en sitios de medición remotos.

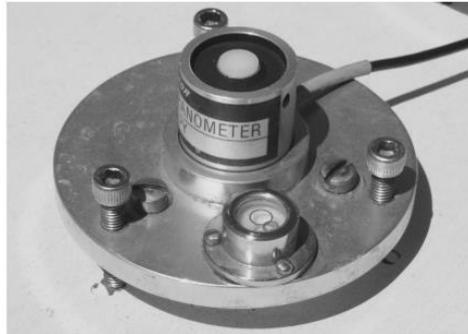


Figura 1.9 Piranómetro basado en un fotodiodo LI-COR modelo LI-200.

1.3.5.2 PIRHELÍOMETROS

El pirheliómetro es un instrumento que utiliza un detector colimado (juego de lentes curvas para orientar los haces de luz en forma paralela hacia un punto específico) para medir la irradiancia solar de una pequeña porción del cielo alrededor del sol con una incidencia normal (DNI). [12]

Un pirheliómetro para medir DNI puede ser menos costoso que un buen piranómetro para medir GHI, pero el pirheliómetro debe apuntar con precisión al sol desde el amanecer hasta el atardecer, entonces se necesita de un seguidor solar. Los buenos seguidores solares automáticos pueden costar entre 5 y 10 veces el precio de un pirheliómetro de tipo termopila. [7]



Figura 1.10 Mediación de DNI con pirheliómetro. [12]

1.3.6 RADIÓMETROS DE BANDA DE SOMBRA ROTATORIA

Los proyectos de plantas solares a gran escala requieren evaluaciones diligentes de los recursos solares. Para concentrar las tecnologías solares, el enfoque de la evaluación de los recursos radica en la irradiancia de haz directo (DNI). Desafortunadamente, los datos de irradiancia de alta precisión apenas están disponibles en regiones que son atractivas para aplicaciones de energía solar. Los datos satelitales solo se pueden usar en combinación con datos terrestres para estimar la variabilidad interanual y los valores medios a largo plazo. Por lo tanto, se deben recolectar nuevas mediciones del terreno para proyectos de plantas solares.

Los pirheliómetros con sensores de termopila como se especifica en [ISO 9060] son los instrumentos estándar para mediciones de campo de irradiancia de haz directo. Sin embargo, durante el despliegue a largo plazo, su precisión comparativamente alta solo puede mantenerse si la ventana a través de la cual el haz directo ingresa al instrumento se limpia con frecuencia, es decir, se ven gravemente afectados por la suciedad por lo que requieren mucho mantenimiento, además requieren dispositivos de soporte caros como seguidores solares y fuentes de alimentación. Por lo tanto, la incertidumbre de la evaluación de recursos con pirheliómetros depende en gran medida del personal de mantenimiento y no se puede determinar con precisión en muchos casos. [10]

Los esfuerzos para proporcionar un enfoque más económico para medir los tres componentes de irradiancia solar han estado en curso desde 1982 cuando se introdujo un radiómetro de banda de sombra giratoria RSR por sus siglas en inglés (Rotating Shadowband Radiometer) (Wesley 1982) [7]. Debido a su baja susceptibilidad a la suciedad, la baja demanda de energía y el costo comparativamente menor, los RSR muestran ventajas significativas sobre los sensores de termopila cuando funcionan bajo las condiciones de medición de estaciones meteorológicas remotas. [15]

Radiómetro banda de sombra giratoria de Wesley

El diseño original de Wesley (figura 2.10) utilizaba un piranómetro LAMBADA colocado debajo de una banda de sombreado motorizada que completaba una rotación aproximadamente cada 4 minutos. La banda tenía 0.9 cm de ancho y 6.0 cm de distancia del difusor de 0.8 cm de diámetro en el piranómetro. Con una velocidad de rotación de la banda de sombra de aproximadamente 0.25 revoluciones por minuto (rpm), el detector del piranómetro se sombreado durante aproximadamente 0.7 segundos. Este intervalo de sombreado fue suficiente para que los registradores de diagramas de tiras del día respondieran y mostraran una señal mínima del detector de fotodiodo de respuesta rápida utilizado en el piranómetro. Los datos de irradiancia difusa y global se basaron en las señales del piranómetro mínimo (sombreado) y máximo (sin sombra), respectivamente. [7]



Figura 1.11 Diseño RSR original de Wesley para medir irradiaciones difusas y globales para poder estimar la irradiancia normal directa.

Las innovaciones incluyeron lo siguiente:

- No tiene ajuste mecánico al dispositivo de sombreado.
- Disposición de montaje compacta y liviana
- Piranómetro disponible comercialmente usando un fotodiodo de silicio montado debajo del difusor de corrección del coseno.
- Conjunto integrado, adecuado para aplicaciones de campo en áreas remotas.

Principio de funcionamiento de los RSR:

Un RSR de rotación continua consta de un piranómetro montado horizontalmente en combinación con una banda de sombra. La banda de sombra se monta debajo del sensor con cierto ángulo de inclinación y gira continuamente aproximadamente una vez por minuto alrededor del sensor (ver Figura 2.11). De esta manera, se garantiza que durante la rotación la banda genere una sombra en el sensor, bloqueando el sol por un breve momento.



Figura 1.12 Radiómetro de sombra de banda (RSR) en posición normal (izquierda) y durante la rotación (derecha) [15]

Al comienzo de cada ciclo de rotación, la banda de sombra está debajo del piranómetro en su posición de reposo. La rotación se realiza con velocidad angular constante y dura aproximadamente 1 segundo. Durante la rotación, la irradiancia se mide con una frecuencia de muestreo alta y constante (aproximadamente 1 kHz). Esta medida se llama explosión o barrido. Al comienzo de la rotación, el piranómetro mide GHI. En el momento en que el centro de la sombra cae sobre el centro del sensor, y detecta aproximadamente DHI; sin

embargo, la banda de sombra cubre una parte del cielo, por lo que el valor mínimo del barrido es en realidad menor que el DHI. Por lo tanto, los llamados valores de hombro están determinados por algoritmos de análisis de curvas. Dichos algoritmos generalmente se implementan en el programa de registro de datos y utilizan el máximo del valor absoluto de la pendiente de la ráfaga para encontrar la posición de los "valores de hombro". La diferencia entre GHI y el promedio de los dos valores de hombro se agrega al mínimo de la curva para obtener el DHI "real". Posteriormente, el registrador de datos calcula el DNI utilizando GHI, DHI y el ángulo cenital solar calculado por el tiempo conocido y las coordenadas de la ubicación del dispositivo. [16]

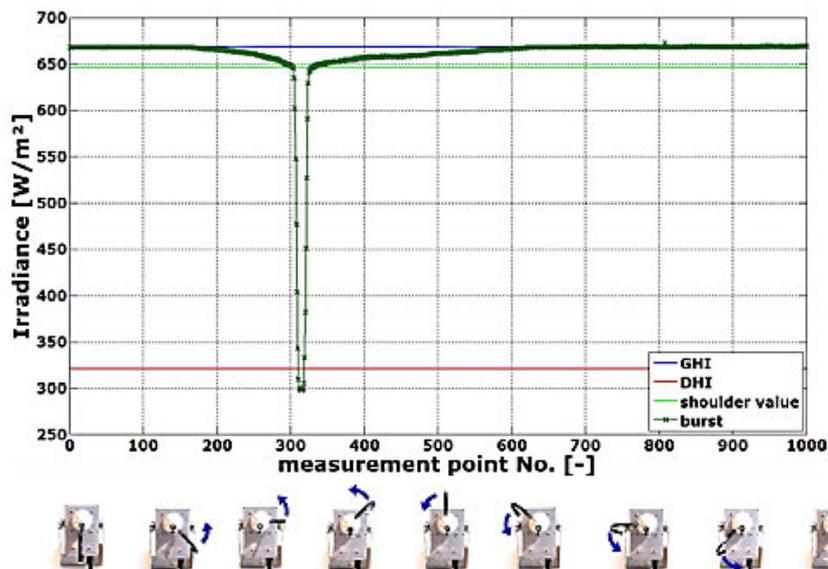


Figura 2.13 Señal de irradiancia registrada durante una rotación de la banda de sombra y las irradiancias derivadas. [Wilbert, 2014]

Una versión de dicho algoritmo para la corrección del DHI: define la distancia (en puntos de medición) entre las posiciones del mínimo (p_{min}) y el máximo del valor absoluto de la pendiente de barrido, como la mitad del ancho de pozo (w_{well}). La posición del valor del hombro izquierdo ($p_{shoulder,L}$) se define entonces como la mitad del ancho del pozo a la izquierda de p_{min} :

$$p_{shoulder,L} = p_{min} - w_{well}/2 \quad (2.3)$$

El valor del hombro derecho se encuentra de igual manera. El valor del hombro es el promedio del valor del hombro izquierdo y derecho. La diferencia entre el GHI y el valor del hombro se agrega al mínimo de la curva para obtener el DHI. (ver ecuación 2.4)

Finalmente, el DNI se calcula usando GHI, DHI y el ángulo cenital solar medido en radianes, usando la ecuación (2.1).

$$DHI = V_{min} + (GHI - V_{hombro}) \quad (2.4)$$

Donde:

DHI : Irradiancia Horizontal Difusa corregida.

V_{min} : El valor mínimo de toda la ráfaga de datos, durante el giro de la banda.

V_{hombro} : El promedio de los valores de hombro izquierdo y derecho.

GHI : Irradiancia Horizontal Global

DHI y DNI solo se determinan aproximadamente una o dos veces por minuto, pero las mediciones de GHI se pueden muestrear en una frecuencia más alta sin la rotación de la banda de sombra, p. Ej. cada segundo. La variación del GHI también contiene información sobre el cambio de DNI. Se utilizan diferentes algoritmos para determinar el promedio minucioso de DHI y DNI de la ráfaga y la medición de GHI más frecuente. [15]

Radiómetro de sombra de banda de rotación discontinua:

En 1986 Michalsky y colaboradores construyeron una versión de RSR controlada por microprocesador que registró solo cuatro mediciones del piranómetro de fotodiodo para cada rotación de la banda accionada por motor paso a paso. Las mediciones se realizaron con la banda en la posición nadir para medir la irradiancia horizontal global sin obstrucciones, y luego bloqueando el Sol para medir DHI, luego con la banda desplazada simétricamente un poco antes y luego un poco después de la posición de bloqueo del sol para estimar el exceso de radiación difusa del cielo bloqueada por la banda durante la medición bloqueada por el sol. La posición bloqueada por el sol de la banda evita que el sol directo llegue al receptor, pero también bloquea una "skylight" difusa considerable. Una estimación de esta corrección de banda es calculada usando las dos medidas de banda laterales. [7]

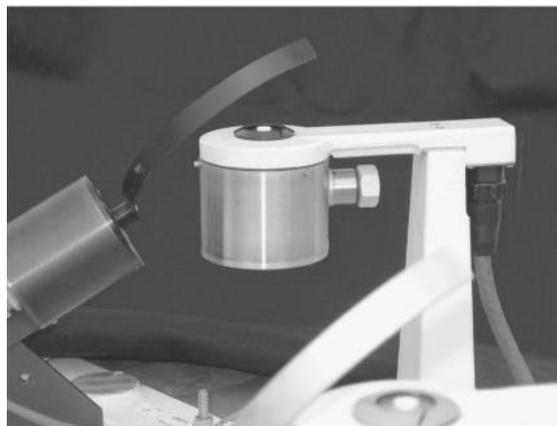


Figura 1.14 Radiómetro de Sombra de Banda de Rotación Continua

Configuración Mecánica

En el año 1986 se publica "A MICROPROCESSOR-BASED ROTATING SHADOWBAND RADIOMETER" [17] en las que se consideraron varias configuraciones mecánicas

alternativas para la sombra de banda giratoria controlada. Se consideró que la banda debería tener las siguientes características.

Debería subtender el mismo ángulo para todas las posiciones de la banda de sombra; el instrumento debería funcionar en todas las latitudes; la construcción debe ser simple; la banda de sombra debe moverse completamente del campo de visión para la medición horizontal global; y el cálculo de la posición de la banda de sombra debería ser sencillo.

No se encontró una configuración que pudiera satisfacer todas estas condiciones. Pero sugiere la siguiente configuración.

La configuración mecánica que se ilustra en la Figura 2.14. El sensor usado puede ser cualquiera de los varios sensores de radiación basados en celdas de silicio. La banda de sombra giratoria está unida a un motor cuyo eje pasa por el centro del difusor del piranómetro, paralelo al eje polar de la Tierra. La banda de sombra tiene 6° de ancho y tiene un arco cuyo centro es el difusor. El motor está montado sobre un riel que forma un arco circular centrado en el difusor. Este permite el ajuste del instrumento a cualquier latitud entre 0° a 65° . Solo 53° del arco de la banda de sombra necesita subtender 6° en el centro del difusor. El resto puede ser más estrecho, ya que solo sirve para soportar la parte sombreada de la banda. Estos 53° son el rango total de la declinación del sol, más un margen, para un campo de visión de 6° en los extremos.

Esta disposición permite un cálculo muy simple para posicionar la banda de sombra. Si el componente vertical que contiene la pista de ajuste de latitud y la base están orientados de norte a sur, y, por lo tanto, el piranómetro horizontal, y el ajuste de latitud se realiza para orientar el eje del motor paralelo al eje de rotación de la tierra, entonces la banda de sombra se mueve en sentido horario.

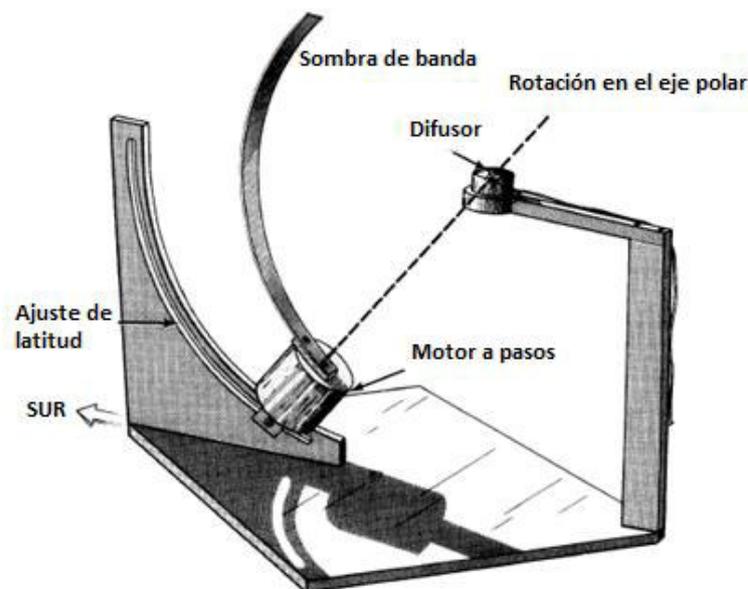


Figura 1.15 Disposición mecánica de un radiómetro de sombra de banda [17]

1.3.7 RASTREO SOLAR

Una de las cuestiones más importantes para este trabajo, es encontrar el ángulo cenital del sol, respecto al lugar donde se encuentre ubicado el dispositivo, debido a que este nos ayudará a estimar el DNI (Irradiancia Normal Directa), tal como se observa en la ecuación (2.1). Por lo que es necesario implementar un algoritmo de seguimiento solar, para lo cual debemos familiarizarnos con los siguientes términos.

Vector posición solar:

El vector de posición solar se describe a través de los ángulos

- **Ángulo Acimutal:** medido respecto al Norte del horizonte hacia el Este hasta la proyección del vector posición sobre el plano horizontal)
- **Ángulo de Elevación o Altitud:** medido desde el horizonte del observador hacia el vector posición solar partiendo de su proyección. Este último es el complemento del ángulo cenit.
- **Ángulo Cenit:** El ángulo cenital es similar al ángulo de elevación, con la diferencia de que se mide desde la vertical en lugar de desde la horizontal. Por lo que el ángulo cenital = $90^\circ - \text{Elevación}$.

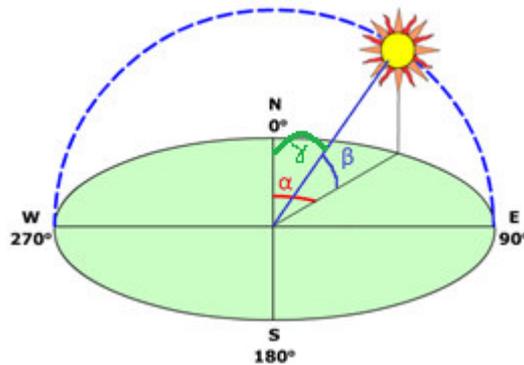


Figura 1.16 Vector posición solar donde α representa el ángulo acimutal, β representa la elevación solar y γ representa el ángulo cenital.

1.3.7.1 ALGORITMO DE MICHALSKY

Para calcular el ángulo acimutal se implementó el algoritmo de Michalsky que según su autor tiene una incertidumbre del 0.01% y tiene validez en un período de 1950 hasta el año 2050. [18]

Escala de tiempo:

Este algoritmo usa la escala de tiempo universal (UT), el cual se basa en cada rotación de la Tierra, su cuenta empieza a la media noche como hora cero y su unidad es el medio día solar.

La posición solar se calcula usando el día juliano (JD), que fue establecido al medio día del 1 de enero de 4713 ac, pero este algoritmo utiliza el día juliano respecto al 1 de

enero del 2000 al medio día en UT, que viene a ser el día juliano número 2451545. El día juliano se lo puede obtener de la ecuación (2.5). [19]

$$jd = 2432916.5 + \text{delta} * 365 + \text{leap} + \text{day} + \frac{\text{hour}}{24} \quad (2.5)$$

Donde:

day: día de interés

hour: hora de interés

delta = *year* – 1949

leap = parte entera de (*delta*/4)

Coordenadas elípticas:

El algoritmo usa como sistema de referencia las coordenadas elípticas, que determinan la posición de un objeto celeste respecto a la órbita terrestre en función de latitud y longitud celeste, teniendo como origen el centro del planeta tierra.

Las coordenadas elípticas son calculadas en función del tiempo siguiendo los siguientes pasos.

$$n = jd - 2451545.0 \quad (2.6)$$

$$L = 280.460 + 0.9856474 * n \quad (0 \leq L < 360^\circ) \quad (2.7)$$

$$g = 357.528 + 0.9856003 * n \quad (0 \leq g < 360^\circ) \quad (2.8)$$

$$l = L + 1.915 * \sin(g) + 0.020 * \sin(2 * g) \quad (0 \leq l < 360^\circ) \quad (2.9)$$

$$ep = 23.439 - 0.0000004 * n \quad (\text{en grados}) \quad (2.10)$$

Donde:

L: longitud media

g: anomalía media

l: longitud elíptica

ep: oblicuidad elíptica

Coordenadas Celestes:

Para calcular la ascensión recta y la declinación solar usamos las siguientes ecuaciones.

$$\tan(ra) = \cos(ep) * \sin(l) / \cos(l) \quad (2.11)$$

$$\sin(dec) = \sin(ep) * \sin(l) \quad (2.12)$$

Donde:

ra: es la ascensión recta.

dec: es la declinación solar.

Coordenadas Locales:

Para encontrar el ángulo acimutal, necesitamos conocer la declinación y el ángulo hora, y para calcular el ángulo hora necesitamos conocer el tiempo sideral de Greenwich central (*gmst* por sus siglas en inglés). Que se calcula con la ecuación 2.13.

$$gmst = 6.697375 + 0.0657098242 * n + hour(UT) \quad (0 \leq gmst < 24 h) \quad (2.13)$$

Ahora procedemos a calcular el tiempo local sideral de longitud media (*lmst* por sus siglas en inglés). La longitud este del sitio en cuestión se agrega al *gmst* para especificar el *lmst*. Como la longitud generalmente está expresada en grados, la longitud debe ser dividida para 15 para convertirla a horas. La longitud este es considerada positiva. Entonces:

$$lmst = gmst + (long\ este) / 15 \quad (0 \leq lmst < 24 h) \quad (2.14)$$

Y el ángulo hora (*ha*) está dado por:

$$ha = lmst - ra \quad (-12 \leq ha < 12 h) \quad (2.15)$$

Elevación solar y ángulo acimutal:

Finalmente podemos calcular las variables con las que se puede definir el vector posición solar.

$$\sin(el) = \sin(dec) * \sin(lat) + \cos(dec) * \cos(lat) * \cos(ha) \quad (en\ grados) \quad (2.16)$$

$$\sin(az) = -\cos(dec) * \sin(ha) / \cos(el) \quad (0 \leq az < 360^\circ) \quad (2.17)$$

Donde:

el: ángulo de elevación solar

az: ángulo acimutal solar

lat: latitud local

Es necesario hacer un ajuste al cálculo del ángulo acimutal, debido a cuestiones trigonométricas. Para que se cumpla que el mayor ángulo de elevación se dé cuando al ángulo acimutal sea igual a 90°.

Walraven [18] demostró que en un acimut de 90 ° la elevación crítica (*elc*) se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\sin(elc) = \sin(dec) / \sin(lat) \quad (2.18)$$

Y el valor correcto del ángulo acimutal se calcula por medio de (2.19) y (2.20)

$$\text{si } el \geq elc \quad \text{entonces: } az = 180^\circ - az \quad (2.19)$$

$$\text{si } el \leq elc \quad \text{entonces: } az = 360^\circ + az \quad (2.20)$$

Ángulo cenital solar:

Para el cálculo del ángulo cenital solar solo basta calcular el complemento de la elevación solar.

$$sza = 90 - el \quad (2.21)$$

Donde:

sza: es el ángulo cenital solar

2. METODOLOGÍA

En esta sección se describe el diseño e implementación del hardware y software del sistema. Se expone la selección y dimensionamiento de cada uno de los dispositivos electrónicos, actuadores electromecánicos utilizados y se describe el diseño de la estructura mecánica para el soporte y correcto funcionamiento del dispositivo.

Además, se especifican como se realiza la adquisición y registro de los datos de irradiancia generados por el mismo dispositivo en una base de datos, y la comunicación con un interfaz hombre máquina (HMI).

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA RSR

El prototipo del sistema RSR se puede dividir en 2 subsistemas que son el sistema electrónico y el sistema mecánico.

El sistema electrónico a su vez se subdivide en:

- Piranómetro.
- Sistema de adquisición y tratamiento de datos (SATD).
- Sistema de registro y visualización de datos (SRVD).

El sistema mecánico se subdivide en:

- Soporte del piranómetro.
- Soporte general del sistema RSR.

A continuación, se puede observar el diagrama de bloques de todo el sistema.

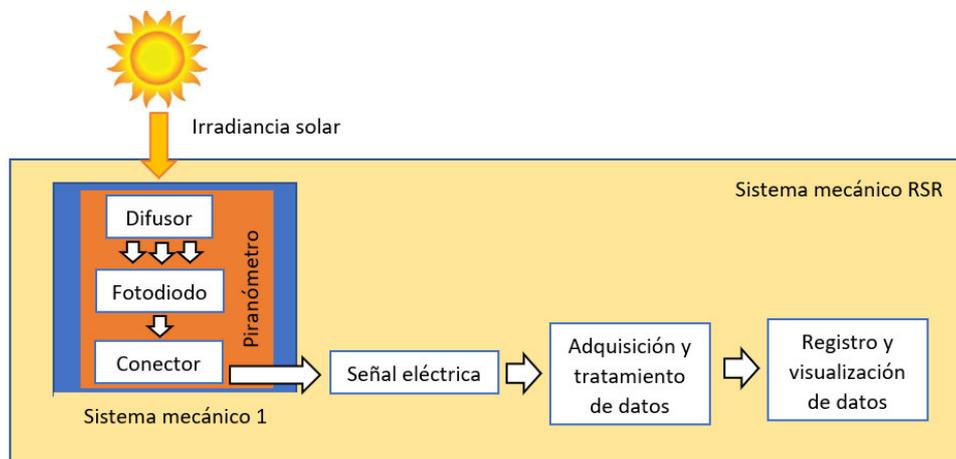


Figura 2.17 Diagrama de bloques de sistema tipo RSR.

A continuación, se hace una descripción general del sistema completo, para posteriormente analizar más a detalle cada uno de ellos.

El piranómetro está conformado por un fotodiodo de silicio como elemento sensor, con su respectivo difusor, utilizado para mejorar la respuesta del instrumento. Consta de un conector BNC para obtener de manera sencilla la señal de corriente que es proporcional a la irradiancia que llega al sensor.

El sistema electrónico de adquisición de datos está controlado por un primer sistema embebido. Los datos analógicos de voltaje entregados por el piranómetro, son convertidos

en datos digitales usando un módulo conversor analógico-digital de alta resolución. Estos datos digitales son leídos y procesados por el sistema embebido mediante comunicación SPI. Aquí se obtienen los datos más importantes del proyecto como son el valor mínimo de la ráfaga de barrido, los valores de hombro, los mismos que son importantes para el cálculo de los componentes de irradiancia GHI y DHI. Esta tarjeta también se encarga de obtener y procesar los datos entregados por un módulo GPS, para obtener la latitud y longitud del lugar donde se encuentre ubicado el dispositivo, datos importantes para el posterior cálculo del ángulo cenital solar y por tanto del DNI. Aquí también se controla el movimiento periódico del motor a pasos el cual a su vez está encargado de mover la sombra de banda, la misma que generará sombra durante un breve momento en el sensor del piranómetro, para poder calcular por software los tres componentes de irradiancia, además, se usa un sensor magnético que ayuda a obtener la posición inicial de la banda de sombra. Finalmente se encarga de realizar una comunicación serial con la segunda tarjeta embebida, para entregar a esta los datos procesados más relevantes.

El sistema electrónico de registro y visualización de datos está comandado por el segundo sistema embebido que recibe los datos procesados por el primero mediante comunicación serial, los organiza y los prepara para ser enviarlos a un Servidor Web, para posteriormente usando lenguaje PHP hacer llegar los datos a una base de datos MySQL. También con los datos de latitud y longitud y usando la hora del sistema se procede a calcular mediante software el ángulo cenital solar y por tanto el componente normal DNI.

Se usa una comunicación inalámbrica SSH y/o una comunicación TCP el cual hace posible la comunicación entre el segundo sistema embebido y un Interfaz Hombre Máquina (HMI). También los datos son guardados en una base de datos, que también pueden ser observados en un servidor Web.

Por último, el sistema mecánico tiene la función de dar soporte y protección a todos los componentes electrónicos. Aquí está incluido la banda de sombra, el ajuste de latitud, el soporte para el motor a pasos, el soporte para el piranómetro, el difusor del piranómetro y el soporte para todo el sistema en general.

A continuación, se detallan los diseños e implementaciones de cada una de las etapas de este proyecto, así como se mencionan elementos indispensables para el funcionamiento del sistema completo.

2.2 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO

2.2.1 PIRANÓMETRO

Los principales elementos del piranómetro desarrollado se muestran en la figura 2.17. En donde se puede apreciar el elemento sensor colocado sobre una base plástica, que a su vez se encuentra cubierto por un difusor de teflón. Todo el sistema está ubicado en un soporte mecánico, el cual consta de tornillos para sujetar el piranómetro, un conector para poder obtener la señal del sensor. También cuenta con una burbuja de nivel para garantizar la horizontalidad del dispositivo.

El piranómetro desarrollado entrega una señal eléctrica de corriente proporcional a la irradiancia recibida. La cual posteriormente es convertida en una señal de voltaje.

Si bien gran parte del piranómetro está relacionado con la parte mecánica, dentro de la parte electrónica se puede destacar, el elemento sensor y el conector para adquirir la señal.

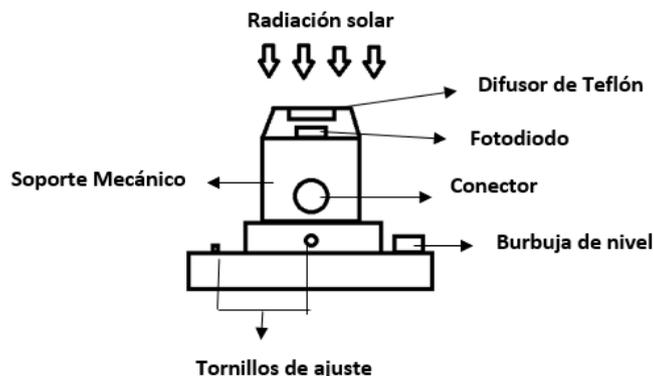


Figura 2.18 Esquemático del piranómetro

Sensor

El elemento que caracteriza al piranómetro es el sensor que utiliza, que puede ser de tipo termopila o de tipo fotodiodo. Como se explicó en el capítulo anterior, la ventaja principal que presentan los sensores de fotodiodo además del precio en comparación a los sensores de termopila es su velocidad de respuesta. Por lo que para esta aplicación se seleccionó un sensor de fotodiodo de silicio, debido a que se necesita una respuesta rápida, para poder registrar las variaciones de corriente que ocurren cuando la banda cubre al fotodiodo.

La selección del fotodiodo ha necesitado una amplia investigación de los dispositivos comerciales disponibles, ya que es uno de los elementos más importantes en el desarrollo de este proyecto.

Se requiere de un fotodiodo que tenga una respuesta espectral dentro del rango de 400 nm a 1100 nm, y lo más lineal posible. Para ello se seleccionó el fotodiodo PDB-C139 cuyas especificaciones técnicas se detallan en las tablas 2.1 y 2.2, y su respuesta espectral se puede observar en la figura 2.20.



Figura 2.19 Fotodiodo de silicio PDB-C139 [20]

Tabla 2.1. Rangos absolutos máximos [20]

Símbolo	Parámetro	Mínimo	Máximo	Unidad
V_{BR}	Voltaje Inverso		100	V
T_{STG}	Temperatura de almacenamiento	-40	100	°C
T_o	Temperatura de Operación	-40	80	°C

Tabla 2.2 Rango de características electro-ópticas [20]

Símbolo	Característica	Mínimo	Típico	Máximo	Unidades
I_{sc}	Corriente de corto circuito	45	67	-	μA
I_D	Corriente oscura	-	5	30	nA
R_{SH}	Resistencia Shunt	100	500	-	$M\Omega$
C_j	Capacitancia de conjunción	-	18	25	pF
λ_{range}	Rango espectral de aplicación	400	-	1100	nm
V_{BR}	Voltaje de cortocircuito	50	100	-	V
NEP	Potencia equivalente al ruido	-	$2 * 10^{-14}$	-	W/\sqrt{Hz}
t_r	Tiempo de respuesta	-	50	-	ns

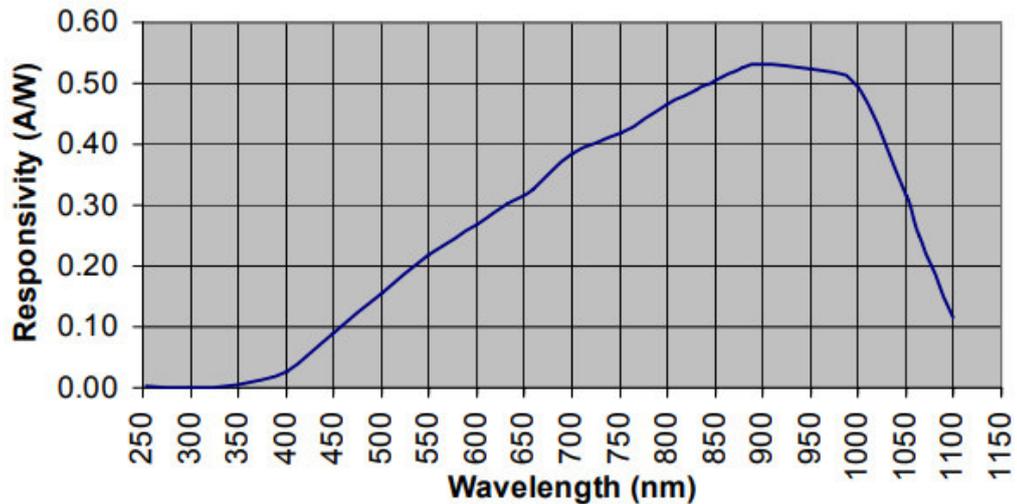


Figura 2.20 Respuesta espectral del fotodiodo de silicio PDB-C139 [20]

Conector BNC hembra

Para brindar facilidad de conexión, se dotó el sistema de un conector BNC (figura 2.21) el cual lleva la señal de corriente que entrega el fotodiodo hacia la siguiente etapa de adquisición de datos. Para sensores con conector BNC, el cuerpo del conector transmite una señal positiva y está conectado al blindaje del cable, mientras que el conductor central es negativo. Esta disposición reduce la interferencia electrónica.



Figura 2.21 Conector BNC hembra.

A este cable se conectará un cable coaxial, ya que es una excelente opción cuando se necesita enviar señales de corriente a lo largo de largas distancias de una manera segura.

Cabe destacar que en esta etapa no se realiza ningún tipo de acondicionamiento. Esto es debido a que, aunque algunos fotodiodos pueden utilizar un amplificador de transimpedancia para generar señales de corriente o un voltaje inverso, la mayoría de los piranómetros comerciales de fotodiodos no utilizan técnicas de acondicionamiento porque se requieren de fuentes de alimentación [7].

2.2.2 SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS

Este sistema hace referencia al desarrollo de los circuitos de control implementados para obtener y tratar los datos analógicos que entrega el piranómetro, aquí también se obtienen los datos entregados por un módulo GPS, se obtiene la posición inicial del motor a pasos usando un sensor digital, se controla la rotación periódica del motor, que a su vez mueve la sombra de banda. Los datos obtenidos en esta etapa son tratados por un sistema embebido que se encarga de preparar dichos datos para posteriormente enviar al siguiente subsistema. En la figura 2.22 se muestra el diagrama de bloques de todo este sistema.

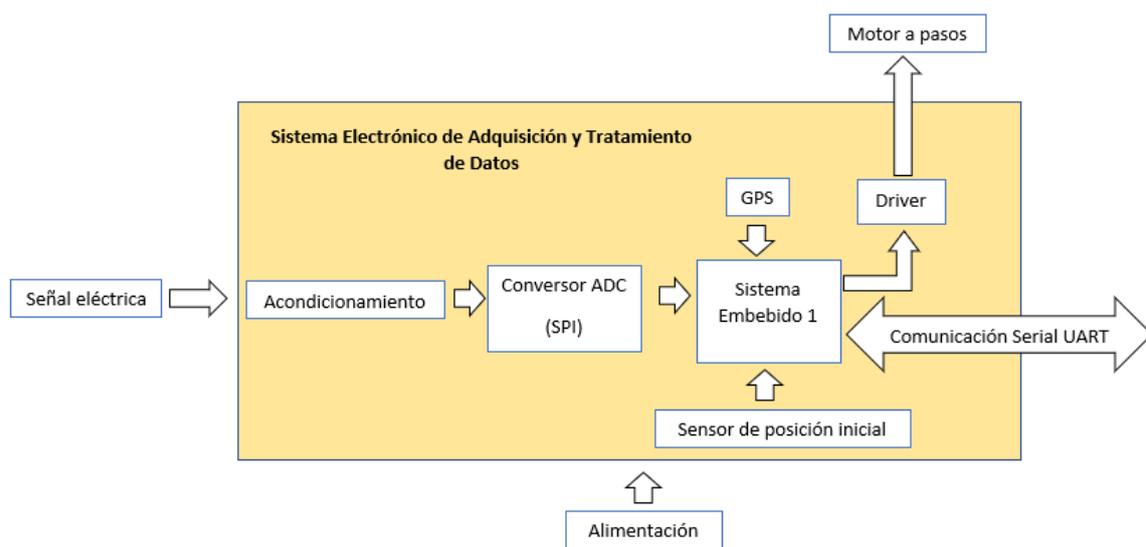


Figura 2.22 Diagrama de bloques del Sistema de Adquisición y Tratamiento de Datos (SATD)

2.2.2.1 SISTEMA EMBEBIDO 1

Se conoce como sistema embebido a un circuito electrónico computarizado que está diseñado para cumplir una labor específica en el producto. Es distinto a un computador normal o laptop, ya que estos sistemas solucionan un problema específico. La programación embebida, va siempre orientada a aplicaciones portables y/o compactas, alimentadas por batería o fuentes de poder de bajo consumo, que tiene como objetivo desarrollar una aplicación de tamaño reducido y de bajo costo, pero con gran robustez. [21]

Esta programación generalmente se las puede realizar en lenguaje ensamblador, o usando otros compiladores como C++ o C.

La inteligencia artificial, secuencias y algoritmos de un sistema embebido, se alojan en la memoria de un microcontrolador. También consta de periféricos de entrada y salida, memorias, buses de datos, direcciones y control. [21]

Para seleccionar el sistema embebido, se realizó un análisis de recursos necesarios mediante un análisis de Entrada/Salida (figura 2.23).



Figura 2.23 Diagrama de E/S del Sistema Embebido 1.

En la tabla 2.3 se describen los recursos necesarios para escoger el sistema embebido.

Tabla 2.3 Descripción del diagrama de E/S

	Característica	Descripción
Entradas	ADC_MISO	Pin MISO, para realizar comunicación SPI con el conversor análogo digital
	GPS_RX	Pin que recibe datos del GPS vía comunicación serial
	UART RX	Pin que recibe los datos del segundo sistema embebido vía comunicación serial
	Sensor magnético	Pin digital que recibe la señal del sensor infrarrojo
Salidas	TX_GPS	Pin que envía los datos al GPS vía comunicación serial
	UART_TX	Pin que envía datos del segundo sistema embebido vía comunicación serial
	EN DRIVER	Pin que habilita el driver que mueve el motor a pasos
	DIR_DRIVER	Pin que selecciona la dirección de giro del motor a pasos
	PUL_DRIVER	Pin que da los pulsos para mover el motor a pasos
	ADC_MOSI	Pin MOSI para realizar comunicación SPI con el conversor análogo digital

	ADC_SCLK	Pin SCLK para realizar comunicación SPI con el conversor análogo digital
	ADC_SS	Pin SS para realizar comunicación SPI con el conversor análogo digital

A partir de la tabla 2.3 se puede deducir el número de pines digitales y analógicos de entrada y salida que debe tener el sistema embebido. Esto se puede visualizar en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Entradas y salidas necesarias del sistema embebido.

Entradas		Salidas	
Digitales	Analógicas	Digitales	Analógicas
4	0	8	0

Arduino Nano:

Basándonos en la tabla 2.4 procedemos a escoger el sistema embebido comercial Arduino Nano que es muestra en la figura 2.24, ya que cumple con todos los requerimientos que demanda el sistema, además que es compacto y liviano.

Cabe recalcar que no usamos las entradas analógicas de Arduino debido a que dispone de un conversor A/D de solo 10 bits y el prototipo RSR necesita un conversor A/D de al menos 16 bits de resolución, para poder detectar las pequeñas variaciones analógicas que entrega el piranómetro.

Arduino Nano, que se lanzó por primera vez en 2008 y sigue siendo una de las placas Arduino más populares disponibles. La Nano es una placa compatible con protoboard, basada en el microcontrolador ATmega328 de 8 bits de Atmel (Tecnología Microchip). [22]



Figura 2.24 Arduino Nano

En la tabla 2.5 se mencionan las especificaciones más importantes del sistema

Tabla 2.5 Sistema Embebido Arduino Nano [22].

Características	Descripción
Microcontrolador	ATmega328
Voltaje de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (Vin)	6-20 V
Consumo de energía	19 mA
Memoria flash	32 KB de los cuales 2KB son utilizados en el gestor de arranque
SRAM	5KB
Velocidad de reloj	16 MHz
EEPROM	1KB
Corriente DC por pin E/S	40 mA (recomendado 20 mA)
Pines de E/S digitales	22
Salidas PWM	6 (D3, D5, D6, D9, D10, D11)
Pines de entrada analógica	8 (ADC de 10 bits)
I2C	A4 (SDA), A5 (SCL)
SPI	D10 (SS), D11(MOSI), D12 (MISO), D13 (SCK)
Dimensiones	18*45 mm

Tabla 2.6 Distribución de pines Arduino Nano. [23]

Pin No.	Nombre	Tipo	Descripción
1-2,5-16	D0-D13	I/O	E/S digital puertos 0 al 13
3,28	RESET	Input	Reset
4,29	GND	PWR	CNG
17	3V3	Output	3.3 V
18	AREF	Input	Referencia ADC
19-26	A0-A7	Input	Canal de entrada analógica del 0 al 7
27	+5V	I/O	Salida de 5V o entrada de fuente de 5V
30	VIN	PWR	Suministro de voltaje

En la figura 2.25 y 2.26, se muestra la lógica de programación que se usó en este sistema embebido mediante un diagrama de flujo

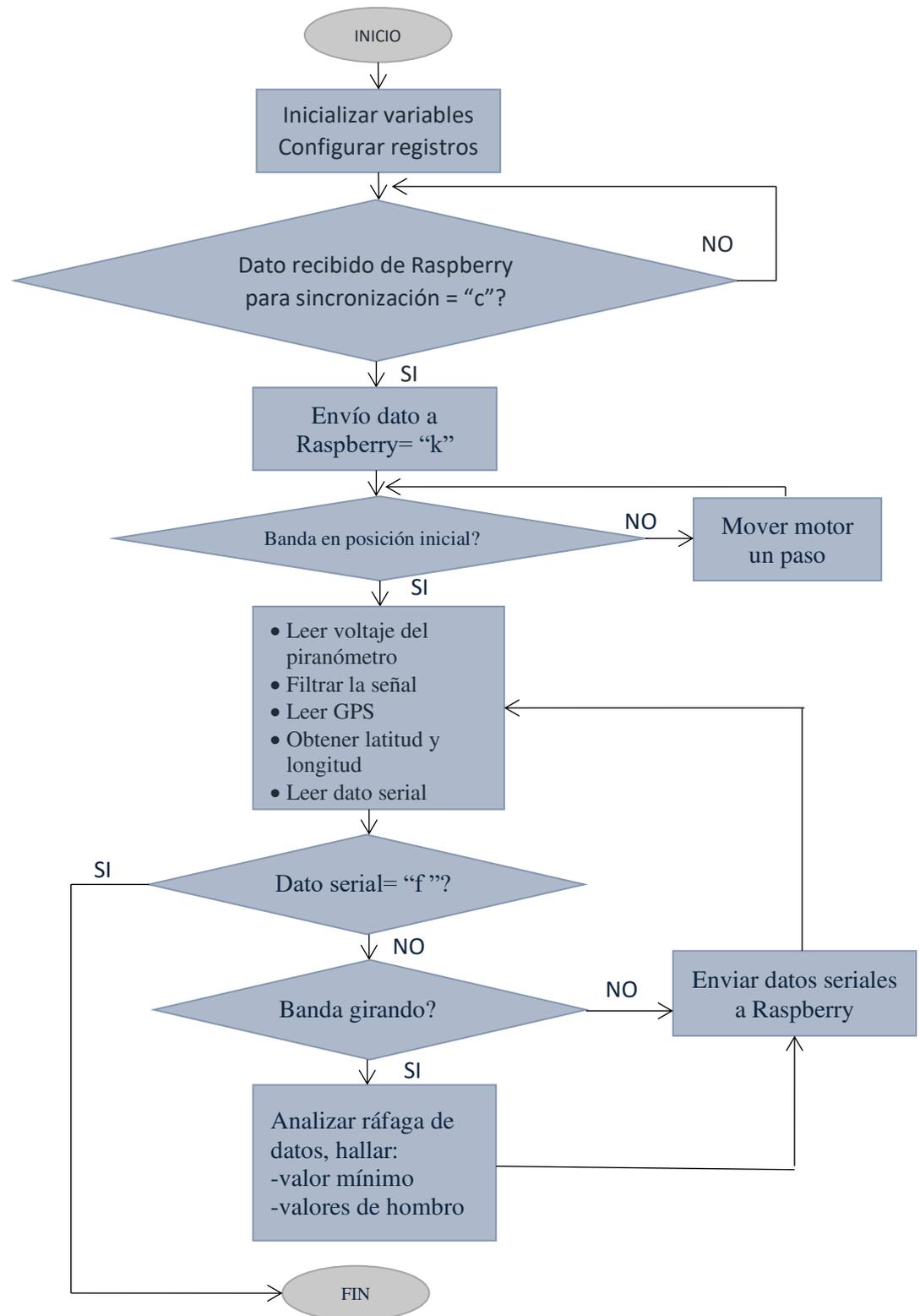


Figura 2.25 Diagrama de flujo del programa principal de Arduino.

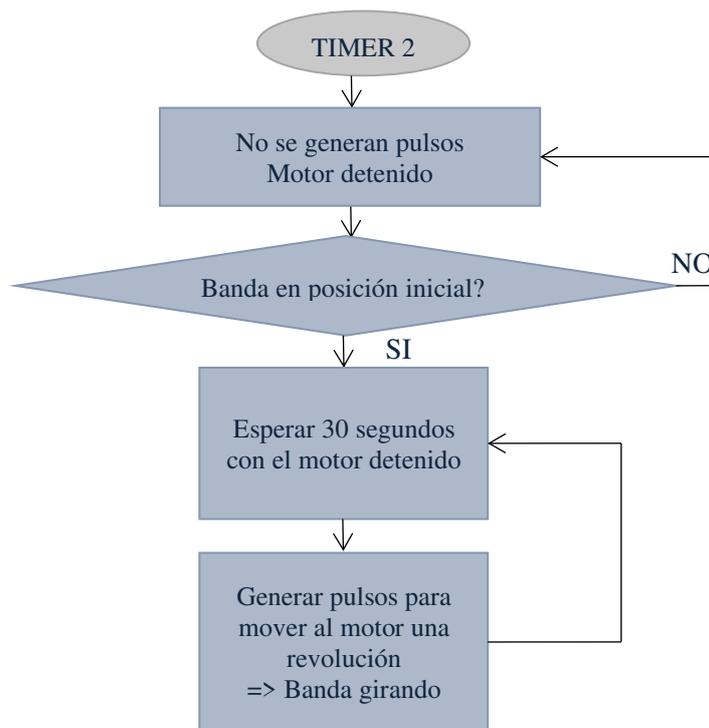


Figura 2.26 Diagrama de flujo de programación del timer 2 de Arduino.

2.2.2.2 ACONDICIONAMIENTO

El piranómetro y específicamente el fotodiodo de silicio es el sensor principal de todo el sistema RSR, este genera una señal de corriente proporcional a la irradiancia recibida.

Ya que los conversores analógicos necesitan señales de voltaje, es necesario convertir la señal de corriente que entrega el piranómetro en una señal de voltaje. Para esto se usó una resistencia de carga.

Resistencia de carga

Si se expone un fotodiodo de silicio a la luz solar y se mide el voltaje entre sus terminales, producirán un voltaje aproximadamente de 0,5 V incluso con luz muy tenue. Sin embargo, este es el voltaje de "circuito abierto" para el cual fluye solo una pequeña cantidad de electrones, además este voltaje no es proporcional a la cantidad de luz solar que cae sobre el detector. Lo que se necesita medir no es este voltaje de circuito abierto, sino un flujo de electrones, que es proporcional a la luz solar que incide sobre el detector. Aunque es posible medir esta corriente directamente, es mucho más fácil forzar al detector a hacer "trabajo" a través de una resistencia de carga, lo que producirá una señal de voltaje utilizable que es proporcional a la corriente [24], siguiendo la ley de Ohm:

$$V = I * R \quad (2.22)$$

Donde:

V= Voltaje

I=Corriente

R=Resistencia

Se deduce de la ecuación 2.22 que el voltaje obtenido será R veces proporcional a la corriente entregada por el piranómetro.

Existe una compensación entre el deseo de aumentar el voltaje de salida (aumentando la resistencia) y la necesidad de asegurarse de que la salida del piranómetro permanezca linealmente proporcional a la luz solar incidente.

Si la potencia requerida para mantener un voltaje V a través de una resistencia R excede la capacidad del fotodiodo para proporcionar los electrones requeridos, entonces el voltaje a través de la resistencia ya no será proporcional a la radiación solar que cae sobre la celda [25].

Con una resistencia de aproximadamente 500 ohmios, se puede esperar que un dispositivo de este tipo produzca una respuesta lineal aproximadamente de 0,1V a 0,2 V a plena luz del sol. [24].

Para este prototipo se seleccionó una resistencia de 470 ohmios, como se muestra en la figura 2.27.

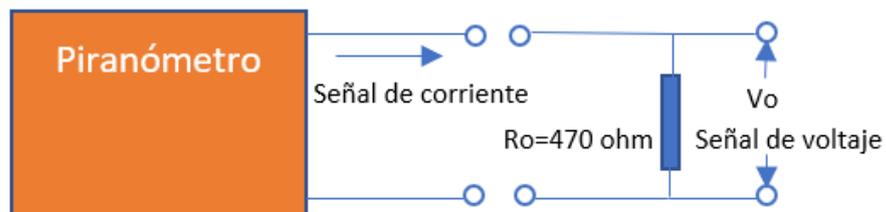


Figura 2.27 Acondicionamiento del sistema usando una resistencia de carga.

2.2.2.3 CONVERSOR ANÁLOGICO-DIGITAL (ADC)

J.J Michalsky y sus colaboradores sugieren utilizar un conversor analógico de alta resolución de al menos 12 bits, esto debido a que, aunque la señal de voltaje a pleno sol tiene una precisión que puede acercarse a un 0.5 % de precisión, la radiación difusa, que representa solo del 10 al 20% de la radiación global en un día despejado, se mide con mucha menos precisión. [17]

Mientras mayor sea la resolución de conversor ADC mejores serán los resultados al calcular el componente difuso.

Por tanto, la señal de voltaje que se ha obtenido en la etapa anterior, no se la podría ingresar directamente al Arduino Nano debido a que solo dispone de conversores ADC con una resolución de 10 bits. Por tanto, se seleccionó un conversor ADC de mayor resolución.

ADS1118

El conversor ADC seleccionado para este proyecto es el conversor ADS1118. (figura 2.28)



Figura 2.28 Módulo ADS 1118

El ADS 1118 es un conversor análogo a digital (ADC) de precisión de 16 bits, de bajo consumo, que provee todas las funciones necesarias para medir las señales de sensor más comunes en un paquete X2QFN-10 muy pequeño. El ADS1118 integra un amplificador de ganancia programable (PGA), referencia de voltaje, oscilador y sensor de temperatura de alta precisión. Estas características, hacen que el ADS1118 sea ideal para aplicaciones de medición de sensores con limitaciones de espacio y energía.

El ADS1118 puede realizar conversiones a velocidades de datos de hasta 860 muestras por segundo (SPS). El PGA ofrece rangos de entrada de ± 256 mV a $\pm 6,144$ V, lo que permite medir señales grandes y pequeñas con alta resolución. Un multiplexor de entrada (MUX) permite medir dos entradas diferenciales o cuatro de un solo extremo.

El ADS1118 funciona en modo de conversión continua o en modo de disparo único que se apaga automáticamente después de una conversión. El modo de disparo único reduce significativamente el consumo de corriente durante los períodos de inactividad. Los datos se transfieren a través de una interfaz periférica en serie (SPI TM).

En la tabla 2.7 se mencionan las principales características de este módulo y en la tabla 2.18 las especificaciones técnicas del mismo.

Tabla 2.7 Distribución de pines del módulo ADS1118. [26]

PIN		Tipo	Descripción
No.	Nombre		
1	SCLK	Entrada digital	Señal de reloj serial
2	CS	Entrada digital	Chip Select; activo en bajo. Conectar a tierra si no es usado
3	GND	Alimentación	Tierra
4	AIN0	Entrada Análoga	Entrada analógica 0.
5	AIN1	Entrada Análoga	Entrada analógica 1.
6	AIN2	Entrada Análoga	Entrada analógica 2.
7	AIN3	Entrada Análoga	Entrada analógica 3.
8	VDD	Alimentación	Fuente de alimentación. Conecte un condensador de desacoplamiento de la fuente de alimentación de 100 nF a GND
9	DOUT/DRDY	Salida digital	Salida de datos en serie combinada con datos listos; activa en bajo
10	DIN	Salida digital	Entrada de datos serial

Tabla 2.8 Especificaciones del módulo ADS1118. [26]

Descripción	Pines	Mínimo	Máximo	Unidad
Fuente de alimentación de voltaje	VDD a GND	-0.3	7	V
Entrada de voltaje analógico	AIN0, AIN1, AIN2, AIN3	GND-0.3	VDD+0.3	V
Entrada de voltaje digital	DIN, OUT/SCLK, CS	GND-0.3	VDD+0.3	V
Entrada de corriente continua	Cualquier pin excepto los pines de alimentación	-10	10	mA
Temperatura	Juntura, TJ	-40	150	°C
	Storage, TS	-60	150	

Este módulo tiene implementado un amplificador de ganancia programable y se puede establecer en $\pm 6.144 \text{ V}$, $\pm 4.096 \text{ V}$, $\pm 2.048 \text{ V}$, $\pm 1.024 \text{ V}$, $\pm 0.512 \text{ V}$, $\pm 0.256 \text{ V}$.

En la etapa de acondicionamiento se mencionó que los valores esperados de voltaje esperados están en el rango de los 0.2 V , por lo que se puede calcular la resolución se puede obtener con este módulo programando la ganancia en $\pm 0.256 \text{ V}$.

$$resolución = \frac{0.256 \text{ V}}{2^{16} \text{ bits}} = \frac{0.256 \text{ V}}{65536 \text{ bits}} = 3.90625 \left[\frac{\mu\text{V}}{\text{bit}} \right] \quad (2.23)$$

Comunicación SPI

La comunicación SPI por sus siglas en inglés (Serial Peripheral Interface) consiste en un bus de tres líneas, sobre el cual se transmiten paquetes de información de 8 bits. Cada una de estas líneas transmite información entre dispositivos conectados al bus. Cada uno de los dispositivos conectados al bus puede actuar como transmisor y receptor al mismo tiempo, por lo que esta comunicación es de tipo full dúplex.

Los dispositivos conectados al bus pueden ser configurados como maestros o esclavos. El maestro es el encargado de iniciar la comunicación y genera las señales de reloj y control.

El dispositivo esclavo es controlado por el maestro. Cada esclavo es controlado sobre el bus a través de una línea selectora llamada Chip Select (CS), entonces el esclavo es activado solo cuando esta línea es seleccionada.

Durante un tiempo T , en el bus solo puede existir un maestro en el bus. Los esclavos que no se encuentren seleccionados deben ser puestos en alta impedancia o deshabilitados a través de la línea Chip Select.

El bus SPI emplea solo un registro de desplazamiento para transmitir la información y todas las líneas del bus transmiten la información sobre una sola dirección.

Especificaciones del bus:

SCLK: Es la señal de reloj que es generada por el maestro y sincroniza la transferencia de datos.

MOSI (Master Out Slave In): Transporta los datos del maestro hacia el esclavo

MISO (Master In Slave Out): Transporta los datos del esclavo hacia el maestro

CS (Chip Select): Cada esclavo es seleccionado por un nivel lógico bajo a través de esta línea.

En la figura 2.29 se observa la configuración para la comunicación SPI.

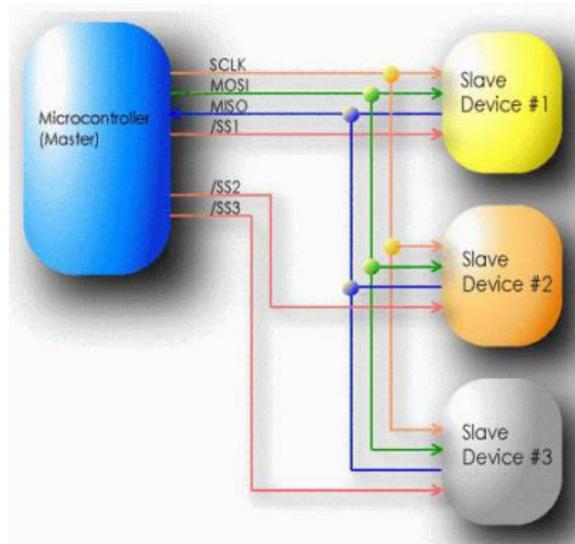


Figura 2.29 Configuración para la comunicación SPI (Serial Peripheral Interface)

[27]

2.2.2.4 SENSOR DE POSICIÓN INICIAL

Se requiere una línea digital de entrada para detectar si la banda de sombra está en su posición inicial (posición nadir), para ello se usó un interruptor magnético que detecta un imán que se encuentra colocado en la sombra de banda. En un principio se usó un sensor óptico, pero no se obtuvieron buenos resultados debido a la gran variación de luz que llega al sensor.

Módulo KY-024:

Este módulo (figura 2.30) es un sensor lineal de campo magnético de Efecto Hall el cual puede ser usado fácilmente con microcontroladores. Este sensor se activa cuando detecta un campo magnético proveniente de un imán o de algún material ferromagnético, sus principales partes son un potenciómetro para ajustar la sensibilidad y un sensor de Efecto Hall lineal. Puede entregar una salida digital o analógica.

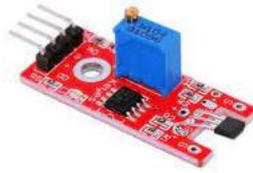


Figura 2.30 Módulo Sensor Magnético KY-024 [28]

Está compuesto por un circuito integrado 49E, un comparador de voltaje LM393, dos leds, seis resistencias y un conector de 4 pines.

En la tabla 2.9 se especifican las características técnicas de este módulo

Tabla 2.9 Especificaciones del módulo KY-024. [28]

Característica	Descripción
Voltaje de alimentación:	3.3 a 5 V
Comparador de salida de corriente	16 mA
Tipo de salida	Digital y analógica
Temperatura de operación	-40°C a 85°C
Dimensiones	40 mm x 26 mm x 32 mm
Peso	4g

2.2.2.5 MÓDULO GPS

Debido a que la incidencia del sol es distinta dependiendo del lugar donde se ubique el prototipo, es necesario un sistema de posicionamiento global para poder calcular el componente normal de irradiancia (DNI) que está en función del ángulo cenital solar.

Los receptores GPS en realidad calculan que tan lejos están respecto a varios satélites. Se encuentra programados para saber dónde están los satélites GPS en un momento dado.

Los satélites envían información hacia la tierra, sobre su posición y hora actual mediante señales de radio. Estas señales llegan al módulo GPS que se encarga de calcular que tan lejos se encuentra cada satélite, calculado el tiempo que ha tardado en llegar la señal. Cuando ya se tiene la información de la distancia a la que se encuentran al menos tres satélites y donde están en el espacio, se puede indicar su ubicación en la Tierra.

Módulo GPS Ublox NEO-6M

Para este proyecto se ha seleccionado el módulo GPS Ublox NEO-6M (figura 2.31). Este módulo incluye un chip GPS NEO-6M de u-blox como componente principal. Puede

rastrear hasta 22 satélites en 50 canales y alcanza el nivel más alto de la industria, es decir, seguimiento de -161 dB, mientras consume solo 45 mA de corriente de suministro. A diferencia de otros módulos realiza 5 actualizaciones de ubicación por segundo con una precisión horizontal de 2.5 m. Ofrece el modo de ahorro de energía (PSM), que permite reducir el consumo de energía del sistema la encender y apagar de manera selectiva partes del receptor, lo que reduce el consumo de energía a 11 mA.

Se puede comunicar con otros dispositivos como microcontroladores mediante comunicación serial UART. Admite una velocidad en baudios de 4800 bps a 230400 bps con una velocidad de transmisión predeterminada en 9600.

Los datos que se obtienen por medio del puerto serial son sentencias NMEA (National Marine Electronics Association), que es el formato estándar para los dispositivos GPS, que son básicamente líneas de datos llamadas oraciones. [29]



Figura 2.31 Módulo GPS Ublox NEO-6M

En las tablas 2.10 y 2.11 se especifican las características principales de este módulo.

Tabla 2.10 Especificaciones del módulo GPS Ublox NEO-6M. [29]

Tipo de receptor	50 canales, GPSL1 (1575.42 Mhz)
Precisión de posición horizontal	2.5 m
Tasa de actualización de navegación	1 Hz (5 Hz máximo)
Tiempo de captura	Inicio normal: 27 s Inicio rápido 1 s
Sensibilidad de navegación	-161 dBm
Protocolo de navegación	NMEA, UBX binario, RTCM
Velocidad de transmisión en serie	4800-230400 (9600 por defecto)
Temperatura de funcionamiento	-40°C a 85° C
Voltaje de funcionamiento	2.7 V a 3.6 V

Corriente de funcionamiento	45 mA
Impedancia TXD/RXD	510 ohmios

Tabla 2.11 Pines del módulo GPS Ublox NEO-6M. [29]

PIN	Característica
GND	Pin de tierra
TxD	Pin de transmisión en comunicación serie
RxD	Pin de recepción en comunicación serie
VCC	Pin de alimentación

2.2.2.6 MOTOR A PASOS

El actuador principal de todo el sistema es un motor a pasos, y es el encargado de mover la sombra de banda para cubrir el difusor periódicamente.

Un motor a pasos es un convertidor electromecánico que permite la conversión de una señal eléctrica, en energía mecánica. Es capaz de convertir pulsos eléctricos (información digital) en movimiento rotacional mecánico. El eje del motor gira un determinado ángulo por cada impulso de entrada. Puede girar en sentido horario y antihorario un número exacto de grados, con incrementos mínimos dados por el diseño.

Parámetros del motor a pasos:

- **Características mecánicas**

Toque mecánico o de trabajo: es el momento máximo que el motor es capaz de responder a un pulso de excitación del estator sin perder ningún paso. Generalmente depende de la carga, y el fabricante ofrece curvas denominadas de arranque sin fallo relacionando el torque vs el número de pasos.

Torque de mantenimiento: Torque requerido para detener el rotor cuando la posición anterior es estable; es mayor que el torque dinámico y actúa como freno para mantener el rotor en una posición estable dada.

Torque de detención: Es un torque de freno que es tienen los motores de imán permanente, es debido a la acción del rotor cuando los devanados estáticos no se encuentran excitados.

Momento de inercia del rotor: Es el momento de inercia asociado al rotor cuyas unidades están dadas en gramos por centímetro cuadrado.

Ángulo de paso: Es el ángulo medido en grados de avance que da el motor a pasos cada vez que recibe un pulso de excitación. Es un parámetro muy importante a la hora de seleccionar un motor a pasos, pues depende del uso que se le va a dar. Existen varios motores comerciales que tienen diferentes grados de precisión como se muestra en la tabla 2.12

Tabla 2.12 Número de pasos que debe dar un motor a pasos comercial para completar una revolución.

Grados que gira por pulso de excitación	Número de pasos para girar una revolución (360°)
0.72°	500
1.8°	200
3.75°	96
7.5°	48
15°	24
90°	40

Número de pasos por vuelta: Es el número de pasos que debe dar el rotor para girar una vuelta completa. Se puede calcular mediante la ecuación 2.24

$$\text{Número de pasos} = \frac{360^\circ}{\alpha} \quad (2.24)$$

Donde:

α : es el ángulo de paso del motor a pasos

Velocidad máxima de paso: es el número máximo de pasos por segundo que puede dar el motor. Es inversamente proporcional a la masa del rotor. Cuando la masa y por tanto la inercia aumentan la velocidad máxima de paso decrece.

Frecuencia máxima de paso: es el máximo número de pasos por segundo que puede efectuar el motor comandado por pulsos de control.

Voltaje: el valor del voltaje de operación se especifica en las hojas de datos del fabricante, o pueden estar impresos en sus carcazas.

Resistencia eléctrica: Es la resistencia eléctrica que hay en cada bobinado, esta resistencia determina la corriente que consumirá el motor, y su valor está relacionado con la curva de torque del motor y su velocidad máxima de operación.

- **Tipos de motores a paso:**

Los motores a paso se dividen en dos categorías principales: de imán permanente y de reluctancia variable. También existe una combinación de ambos conocidos como híbridos.

Motor a pasos de imán permanente:

Estos motores se caracterizan por utilizar un imán permanente en el rotor. Este imán está magnetizado radialmente es una serie de polos. El estator es construido por láminas de material ferromagnético bobinado con el mismo número de polos que el rotor.

El ángulo de paso de estos motores depende del número de polos del estator y el rotor. El número de polos es limitado debido a las características del material magnético usado al construir el rotor, por lo que solo es posible obtener ángulos de paso grandes.

En un intento de reducir el ángulo de paso se puede incrementar el diámetro del imán del rotor, para aumentar en número de polos, pero con esto se aumenta el momento de inercia de este, lo que reduce de una manera importante el torque de arranque por lo que se descarta esta opción. Otra solución es construir el motor con más de un estator, con lo que se pueden dar pasos con un ángulo inferior a 3.75°

La figura representa un motor de imán permanente básico solo con un bobinado y dos polos. En la figura 2.32 (a) la alimentación del bobinado genera un flujo magnético en sentido horario, este se cierra sobre los polos del estator haciendo mover al rotor hasta conseguir el equilibrio en la orientación de los campos magnéticos, estado de reposo. La figura 2.32 (b) cambia el sentido de la corriente, por lo que se invierte el flujo magnético, por lo tanto, los polos antes en equilibrio ahora se repelen, produciendo el movimiento del rotor, buscando una nueva posición de equilibrio.

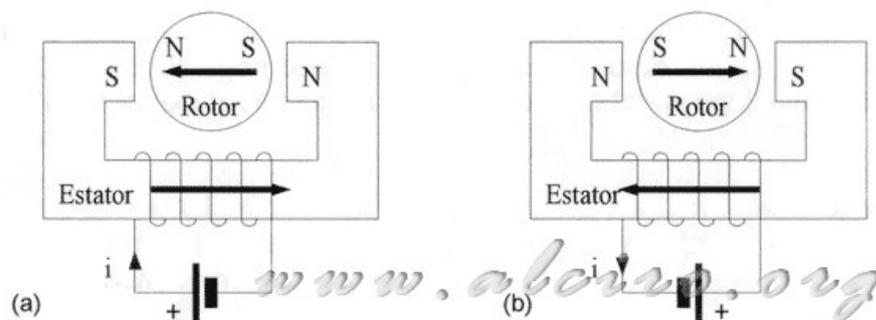


Figura 2.32 Motor de dos polos y una fase [30]

Un ejemplo de un sistema con mayor número de polos es el que se presenta en la figura 2.33. Un bobinado por fase con seis polos tanto para el rotor como para el estator. Todos los polos se encuentran ubicados de manera equidistante formando un círculo.

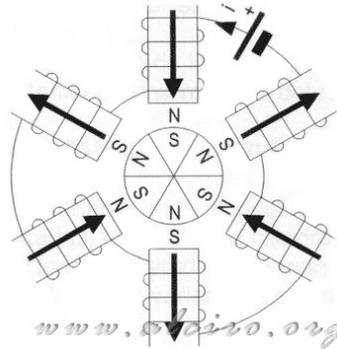
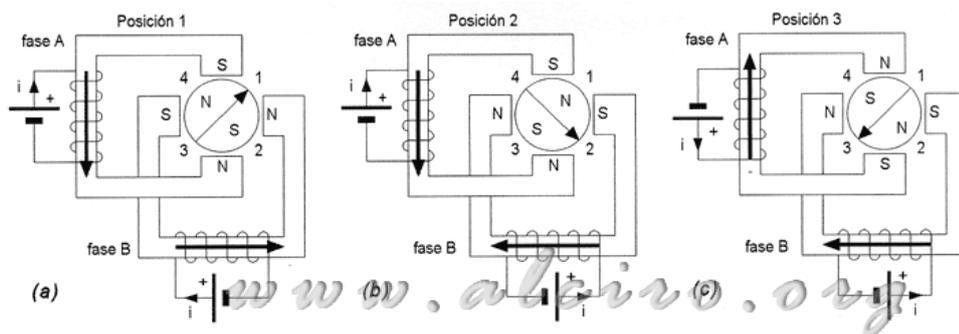


Figura 2.33 Ejemplo de un devanado de seis polos. [30]

Un motor constituido por una sola fase no tendría sentido, debido a que no se puede determinar la dirección de arranque del motor y realizar un cambio de giro sería imposible. Por tanto, el número mínimo de fases es dos.

Al construir un motor con dos fases y dos polos por fase, se puede controlar el sentido de giro. La figura 2.34 (a) se observa el estado inicial, con las dos fases excitadas formando un campo magnético que ubica al rotor en posición de equilibrio. La figura 2.34 (b) se invierte la dirección de la corriente de la fase B. lo que cambia el sentido del campo magnético, al mismo tiempo el rotor se desplaza con el mismo sentido, igualmente, buscando el equilibrio. La figura 2.34 (c) se invierte nuevamente la dirección de la corriente de la fase A, produciendo un paso de 90° en sentido horario.

Si la inversión de corriente se hace en diferente orden, se obtiene el cambio de sentido de giro del rotor.



- a) Posición inicial.
- b) Posición después del primer paso.
- c) Posición después del segundo paso.

Figura 2.34 Motor a pasos de dos polos y dos fases [30]

Motor a pasos de reluctancia variable:

Su rotor está construido con de láminas ferromagnéticas no imantadas que forman un cilindro como eje, que se encuentra ranurado de manera longitudinal, formando dientes que sirven como polos del rotor. Estas ranuras se traducen en variación de reluctancia a medida que cambia su posición angular. (ver figura 2.35)

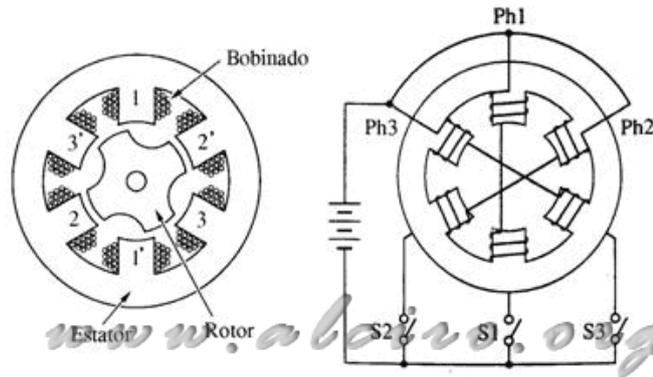


Figura 2.35 Motor de reluctancia variable de tres fases [30]

El estator al igual que el rotor, está construido por láminas de material ferromagnético no imantado, y con ranuras longitudinales en donde se encuentran los bobinados de fases, y forman a su vez los polos del estator.

Otro material que se suele usar para la construcción del rotor y el estator es un material conocido como hierro dulce.

En la construcción del motor el número de dientes del rotor es menor a los del estator, de tal manera que solo un par de polos del estator puede estar alineado con un par del rotor en cada fase. La figura 2.36 (a) muestra un estator con seis polos y cuatro en el rotor, en su estado de equilibrio

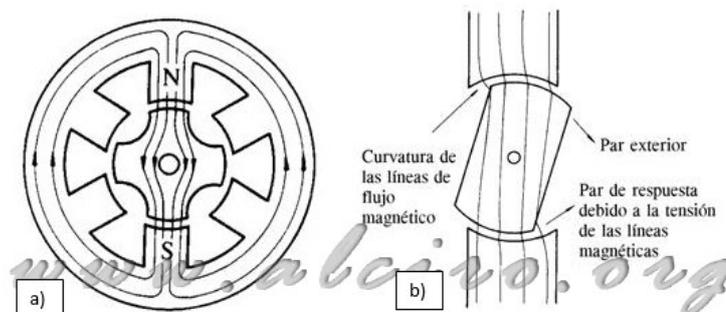


Figura 2.36 Motor de reluctancia variable de 4 polo. (a) Posición de equilibrio con una fase excitada. (b) Curvatura de las líneas de flujo magnético que crean el giro [30]

Mediante interruptores de potencia se puede suministrar energía a cada fase. Si S1 está en estado ON, la corriente fluye por la fase 1 y 1', generando un flujo magnético que recorre por el estator y cierra en los polos correspondientes a la fase 1 sobre los polos del rotor. Cuando los polos del rotor y el estator son alineados, tenemos el flujo máximo, con la menor reluctancia.

Cuando el rotor sale de su estado de equilibrio, debido a un torque externo aplicado, este responde con un torque en sentido contrario que se opone al movimiento; esto genera la curvatura que sufren las líneas de flujo magnético entre los polos de rotor y estator. Esto se puede observar en la figura 2.36 (b).

Partiendo de la posición de equilibrio con la fase 1 activada (figura 2.37 (a)). Un paso se obtiene poniendo la fase 1 en estado OFF y la fase 2 en estado ON; en este instante los polos del rotor más próximos a los polos de fase del estator, son atraídos en el intento de circular las líneas de flujo (figura 2.37 (b)), produciendo un movimiento de rotación hasta quedar alineados. (figura 2.37 (c)) obteniendo así un paso del rotor.

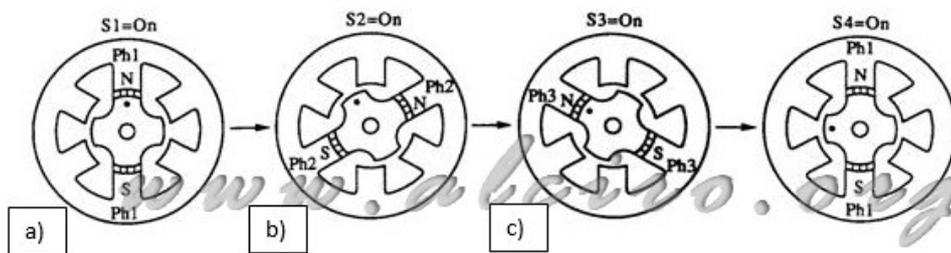


Figura 2.37 Forma de los pasos y secuencia de conmutación de un motor de reluctancia variable de tres fases. [30]

Motores a pasos híbridos:

En estos motores se combinan las mejores características de los de reluctancia variable y de imán permanente. Son construidos con estatores que tienen muchos dientes y un rotor de imán permanente. Combinados se obtienen ángulos de pasos pequeños y con alto torque, y en un tamaño reducido.

Las características y forma del estator son muy parecidas a los motores a pasos de imán permanente y reluctancia variable. La diferencia se encuentra en la construcción del rotor, constituido por un disco cilíndrico imantado en posición longitudinal al eje (figura 2.38). Las líneas magnéticas del imán permanente son guiadas por dos cilindros acoplados a los extremos de cada uno de sus polos (norte y sur). El material ferromagnético es normalmente utilizado para su construcción.

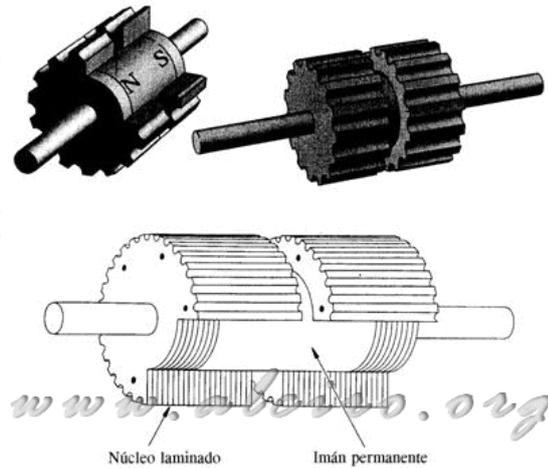


Figura 2.38 Estructura del rotor de un motor a pasos híbrido [30]

El motor híbrido produce un torque por fuerza de reluctancia, igual que el motor de reluctancia variable. La diferencia es que son excitados de manera diferente. En el motor de reluctancia variable solo se energiza una bobina, y en motores híbridos la excitación está dada por la bobina y por el imán.

En la figura 2.39 se observa un esquema de un motor a pasos de reluctancia variable de 90° . Para obtener ángulos de pasos más pequeños, hay que incrementar el número de polos del rotor y el estator. Las posibilidades del número de pasos se limitan por el número de polos que pueden alcanzar en el estator y el número de dientes de cada uno.

La mayoría de motores híbridos poseen 200 dientes en el rotor y su ángulo de paso es de 1.8° .

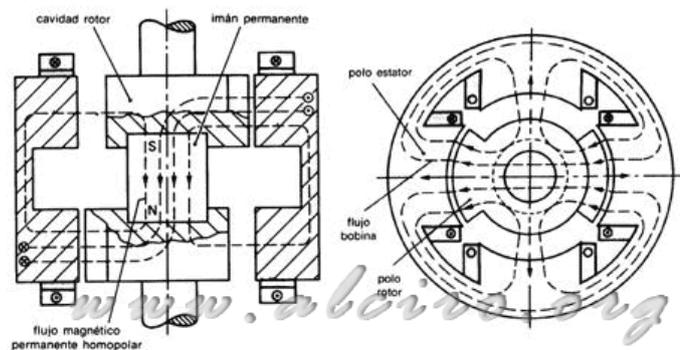


Figura 2.39 Sección transversal y longitudinal de un motor híbrido de 90° , que muestra el recorrido de las líneas de flujo magnético producidas por la excitación de un bobinado. [30]

Motor paso a paso NEMA17:

A la hora de seleccionar el motor y driver adecuado, es importante tener en cuenta dos factores:

- Escoger motores con un torque suficiente para la aplicación. El primer objetivo es mover la sombra de banda con la suficiente fuerza y velocidad.
- Que los drivers puedan aportar la suficiente corriente para que el motor ejerza el torque suficiente. Además, el driver deber ser compatible electrónicamente con el resto de los circuitos de control

Para este trabajo se ha escogido un motor paso a paso híbrido NEMA 17 17HS4401 que se muestra en la figura 2.40, que corresponde a las siglas de un estándar industrial que establece algunos parámetros mecánicos. No importa el fabricante del motor mientras esté construido bajo las normas que establece NEMA entonces será compatible con motores de otros fabricantes. Dentro de sus principales características está su ángulo de paso de 1.8°.



Figura 2.40 Motor bipolar NEMA17 17HS4401 [31]

Tabla 2.12 Especificaciones eléctricas del motor a pasos. [31]

Modelo	17HS4401
Ángulo de paso (deg)	1.8°
Longitud del motor (mm)	40
Rango de corriente (A)	1.7
Resistencia de fase (ohm)	1.5
Inductancia de fase (mH)	2.8
Torque de retención (N.cm Min)	40
Torque de detención (N.cm. Max)	2.2
Inercia del rotor (g. cm ²)	54

Cable conductor (No.)	4
Peso del motor (280 g)	280
Corriente sin carga (A)	1.7
Voltaje de alimentación máximo	20 V

Driver A4988:

Par poder comandar el movimiento del motor a pasos se requieren circuitos de control y de potencia complejos. Pero afortunadamente existen en el mercado drivers con circuitos integrados que reducen la complejidad del control.

Para este proyecto se ha seleccionado del driver A4988 (figura 2.41) que simplifica mucho la tarea de control ya que se encarga de generar todas las señales necesarias para mover el motor y además cuenta con protecciones necesarias de temperatura y corriente. Otra ventaja importante es que solo se necesita un par de pines de Arduino para controlar todo, dejando puertos disponibles para el resto de funciones.



Figura 2.41 Driver A4988 para controlar motor a pasos [32]

A continuación, se muestran algunas de las principales características del controlador. [33]

- Interfaz de control de paso y dirección simple
- 6 resoluciones de pasos diferentes: Paso completo, $\frac{1}{2}$ paso, $\frac{1}{4}$ de paso, $\frac{1}{8}$ de paso, $\frac{1}{16}$ paso y $\frac{1}{32}$ paso.
- Control de corte inteligente que selecciona automáticamente el modo correcto de caída de corriente.
- Desconexión térmica, bloqueo de bajo voltaje y protección contra cortocircuitos y carga en cortocircuito.

- El control de corriente se puede ajustar permitiendo configurar la salida de corriente máxima con un potenciómetro, que permite usar voltajes por encima del voltaje nominal del motor a pasos para lograr tasas de pasos más altos.

Tabla 2.13 Rangos máximos absolutos del driver A4988 [34]

Características	Rango	Unidades
Voltaje de alimentación	35	V
Corriente de salida	+/-2	A
Entrada de voltaje lógica	-0.3 a 5.5	V
Fuente de voltaje lógica	-0.3 a 5.5	V
VBBx a OUTx	35	V
Voltaje sensado	0.5	V
Voltaje de referencia	5.5	V
Temperatura ambiente de operación	-20 a 85	°C
Juntura máxima	150	°C
Temperatura storage	-55 a 150	°C

Tabla 2.14 Distribución de pines del driver A4988 [34]

PIN	Característica
ENABLE	Habilitación del driver
MS1	Configuración de pasos
MS2	Configuración de pasos
MS3	Configuración de pasos
RESET	Reset
SLEEP	Bajo consumo
STEP	Pasos
DIR	Dirección de giro del motor (horario o antihorario)
VMOTOR	Alimentación del motor
GND	Alimentación del motor
2B	Bobinas del motor
2A	Bobinas del motor

1B	Bobinas del motor
1A	Bobinas del motor
VDD	Alimentación del módulo
GND	Alimentación del módulo

Tabla 2.15 Tabla de verdad de resolución del micropaso. [34]

MS1	MS2	MS3	Resolución de micropaso
L	L	L	Paso completo
H	L	L	Medio paso
L	H	L	Cuarto de paso
H	H	L	Octavo de paso
H	H	H	Dieciseisavo de paso

2.2.2.7 COMUNICACIÓN SERIAL

En esta etapa se realiza la transferencia de datos del Sistema de Adquisición y Tratamiento de Datos, al siguiente subsistema. Para esto se utiliza el puerto serial con el que cuenta Arduino Nano.

El puerto serial es un módulo de comunicación digital que utilizan los sistemas embebidos. Permite comunicar dos dispositivos digitales. Necesita tres conexiones, RX, TX, y GND (figura 2.42) por lo que se puede deducir que se puede hacer comunicación Full-duplex, Duplex y Simplex. Su principal ventaja es la sencillez con la que se maneja su protocolo de comunicación. Y su desventaja es que solo puede comunicar dos dispositivos a la vez.

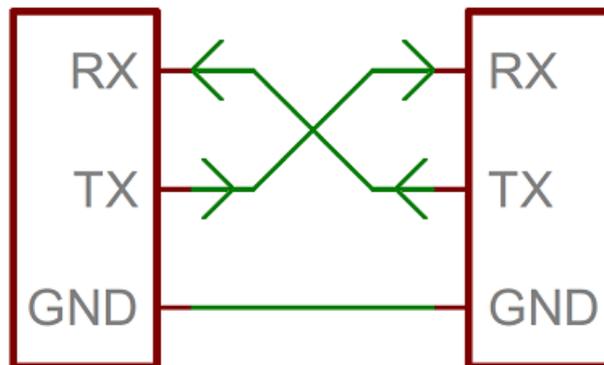


Figura 2.42 Diagrama de conexión de una comunicación serial. [35]

Existen tres tipos de comunicación serial:

Full duplex: Puede transmitir y recibir información digital al mismo tiempo

Duplex o Half-duplex: Solo puede transmitir o recibir información, solo una a la vez.

Simplex: Cuando solo se puede recibir o transmitir.

La función principal de un puerto serial, es la de empacar y desempacar los paquetes de datos binarios. Es decir, convierte un byte a un conjunto de pulsos seriales que pueden ser recibidos y enviados por una línea de transmisión. Básicamente funciona mediante tres instrucciones básicas como son el inicio de transmisión, paridad y fin de transmisión. Estas son sincronizadas usando un oscilador interno.

En sistemas embebidos generalmente se refiere a los puertos seriales como UART (Universally Asynchronous Receiver/Transmitter) que es una unidad que nos indica la conversión de los datos a una secuencia de bits donde posteriormente son transmitidos o recibidos a una velocidad determinada.

Esta comunicación se la realiza haciendo variaciones de voltaje, donde los dispositivos TTL (transistor transistor logic) realizan la comunicación mediante variaciones de señal entre 0V y 5V o entre 0V y 3.3 V.

Tramas de comunicación Serial:

El protocolo serial se refiere a la forma o la cantidad de bits que forma un paquete de datos. En este caso el dato es la información que queremos transmitir por el puerto serial. Como resultado, la trama de datos o bits digitales necesarios para transmitir un byte de información pueden variar. Básicamente se tiene que agregar tres tipos de bits al byte de información. Un bit de inicio, un bit de paridad, y uno o dos bits de parada.

Si se configura el puerto serial a una velocidad de 9600 Baudios, 1 bit de inicio, 8 bits de datos, 1 bit de parada y sin bit de paridad. Esta configuración enviaría 10 bits por cada 8 que se quieren transmitir. Si la velocidad es 9600 bits/s, se tiene una tasa real de transmisión de 960 bytes por segundo, debido a que cada byte tiene agregados dos bits debido al protocolo serial.

La figura 2.43 muestra una trama que consta de 11 bits con una velocidad de transmisión de 9600 bits/s. Entonces, a cada bit le toma $1/9600$ s en transmitirse para cada flanco de subida del generador de BAUD, con una tasa de transmisión de $9600/11 = 872.72$ bytes/segundo.

I	Bit de INICIO	P	Bit de PARIDAD
P	Bit de PARADA	D	Bit de DATOS

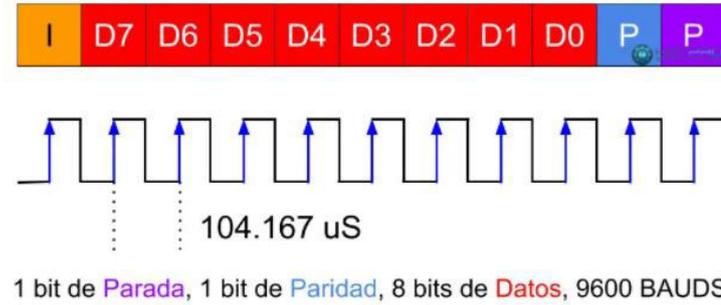


Figura 2.43 Trama de comunicación serial con la configuración: 1 bit de parada, 1 bit de inicio, 8 bits de datos y un bit de paridad a 9600 baudios. [36]

En la figura 2.44 se muestra una trama que no tiene bit de paridad y tiene una mayor velocidad, para esta trama la tasa de transferencia es de 11520 bytes/segundo.

I	Bit de INICIO	P	Bit de PARIDAD
P	Bit de PARADA	D	Bit de DATOS

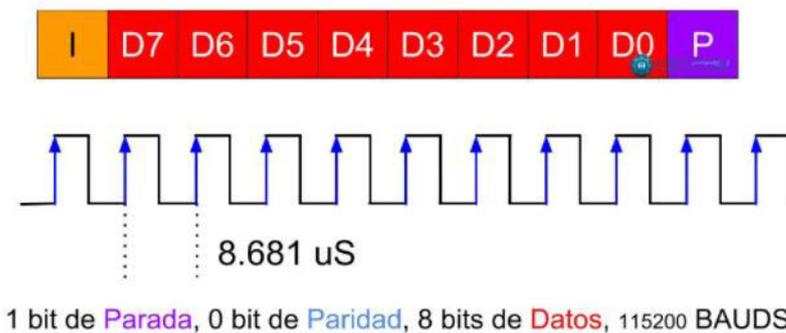


Figura 2.44 Trama de comunicación serial con la configuración: 1 bit de parada, 1 bit de inicio, 8 bits de dato, no se configuró bit de paridad a 115200 baudios. [36]

2.2.3 SISTEMA DE REGISTRO Y VISUALIZACIÓN DE DATOS (SRVD)

Este sistema es comandado por un segundo sistema embebido, el cual se encarga del recibir los datos que entrega el primer sistema embebido vía comunicación serial. Los datos que recibe son los valores de voltaje y los datos del GPS. Los datos de voltaje son convertidos en valores de irradiancia mediante calibración y luego son preparados y enviados a una base de datos, para posteriormente graficar todos los valores en un Interfaz Hombre Máquina (HMI) por sus siglas en inglés. Usando la base de datos también se puede mostrar los valores de interés en una página Web.

Los datos de longitud y latitud que entrega el GPS son procesados y utilizados para calcular el ángulo cenital solar, usando el algoritmo de Michalsky y posteriormente calcular el componente normal DNI.

En la figura 2.45 se muestra el diagrama de bloques de este sistema.

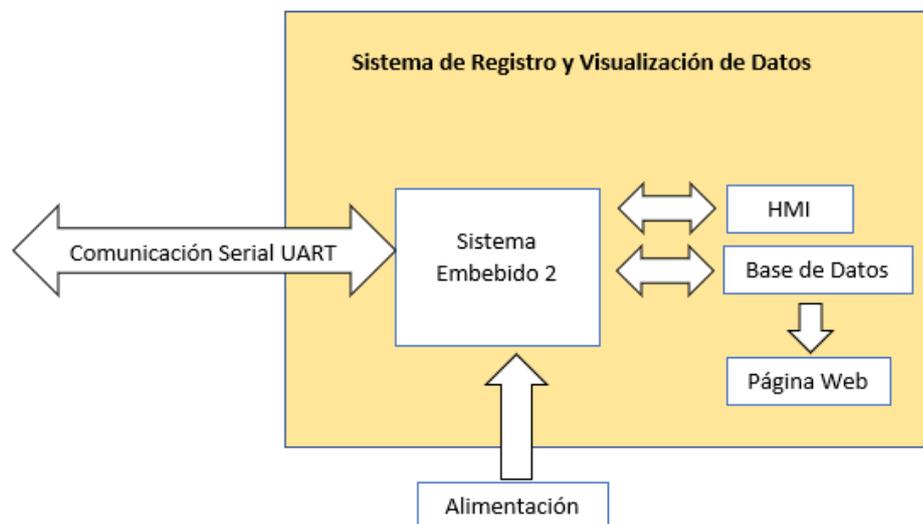


Figura 2.45 Diagrama de bloques del Sistema de Registro y Visualización de Datos.

2.2.3.1 SISTEMA EMBEBIDO 2

Para escoger la tarjeta embebida que controle todo el SRVD, se ha pensado en los elementos mínimos que debería tener.

- Comunicación serial UART para comunicar con Arduino Nano.
- Buena capacidad de procesamiento.
- Facilidad de conectividad inalámbrica. Específicamente debe tener acceso a Internet.

- Facilidad para crear bases de datos en la nube y servidores web.
- Debe ser liviano, compacto y de bajo consumo.

Raspberry Pi 3B+:

Como tarjeta embebida principal se ha escogido Raspberry Pi 3B+. Que cumple con todas las características mencionadas anteriormente.

Raspberry Pi 3B+ es un ordenador de placa reducida o placa única de bajo costo y con gran capacidad de procesamiento. Entre sus características principales destaca la versatilidad y conectividad. Fue desarrollado en el Reino Unido como parte de un proyecto por la Fundación Raspberry Pi.

A diferencia de la mayoría de computadores y laptops disponibles en la actualidad que funcionan con sistemas operativos de código cerrado, Raspberry Pi está diseñada para ejecutar el sistema operativo GNU/Linux que es de código abierto. En la figura 2.46 se muestra una imagen comercial del dispositivo.



Figura 2.46 Tarjeta Embebida Raspberry Pi 3 B+

Tabla 2.16 Especificaciones técnicas del sistema embebido Raspberry Pi 3B+ [37]

Procesador	<ul style="list-style-type: none"> • Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 64-bit SoC @ 1.4 GHz
Memoria	<ul style="list-style-type: none"> • 1GB LPDDR2 SDRAM
Conectividad	<ul style="list-style-type: none"> • 2.4 GHz and 5 GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac Wireless LAN, Bluetooth 4.2, BLE

	<ul style="list-style-type: none"> • Gigabit Ethernet sobre USB 2.0 (rendimiento máximo de 300 Mbps) • 4 x Puertos USB 2.0 • Comunicación Serial UART, SPI, I2C
Acceso	<ul style="list-style-type: none"> • Cabecera GPIO de 40 pines
Video y Sonido	<ul style="list-style-type: none"> • 1 x HDMI • Puerto de pantalla DSI • MIPI CSI para módulo de cámara. • Salida de audio estéreo y puerto de video compuesto
Multimedia	<ul style="list-style-type: none"> • H.264, decodificación MPEG-4 (1080p30); Codificación H.264 (1080p30); OpenGL ES 1.1, gráficos 2.0
Soporte para tarjeta SD	<ul style="list-style-type: none"> • Formato MicroSD, para cargar el sistema operativo y el almacenamiento de datos.
Entrada de alimentación	<ul style="list-style-type: none"> • 5 V / 2A DC a través de conector micro USB • 5 V DC a través de cabecera GPIO • Alimentación a través de Ethernet (PoE): habilitada (requiere PoE HAT por separado)
Temperatura Operativa	<ul style="list-style-type: none"> • 0 – 50 ° C

Esta tarjeta utiliza el sistema operativo Raspbian (basado en Linux) que es compatible con el lenguaje de programación Python 3, lenguaje en el que se realizó toda la programación. A continuación, se detalla lo que se ha programado en esta tarjeta.

- Recibir vía comunicación serial UART los datos que entrega Arduino Nano de voltaje, de latitud y longitud del lugar donde se encuentra ubicado el dispositivo.
- Convertir estos datos de voltaje en datos de irradiancia solar.
- En base a la latitud y longitud, se calcula mediante programación el ángulo cenital solar para posteriormente calcular el componente normal de irradiancia DNI.
- Cargar y actualizar los datos de los tres componentes de irradiancia en la base de datos Web.
- Enviar vía comunicación TCP-IP los datos de relevantes para proceder a graficarlos en tiempo real en un HMI.

El algoritmo de programación implementado en esta tarjeta embebida se puede observar en la figura 2.47.

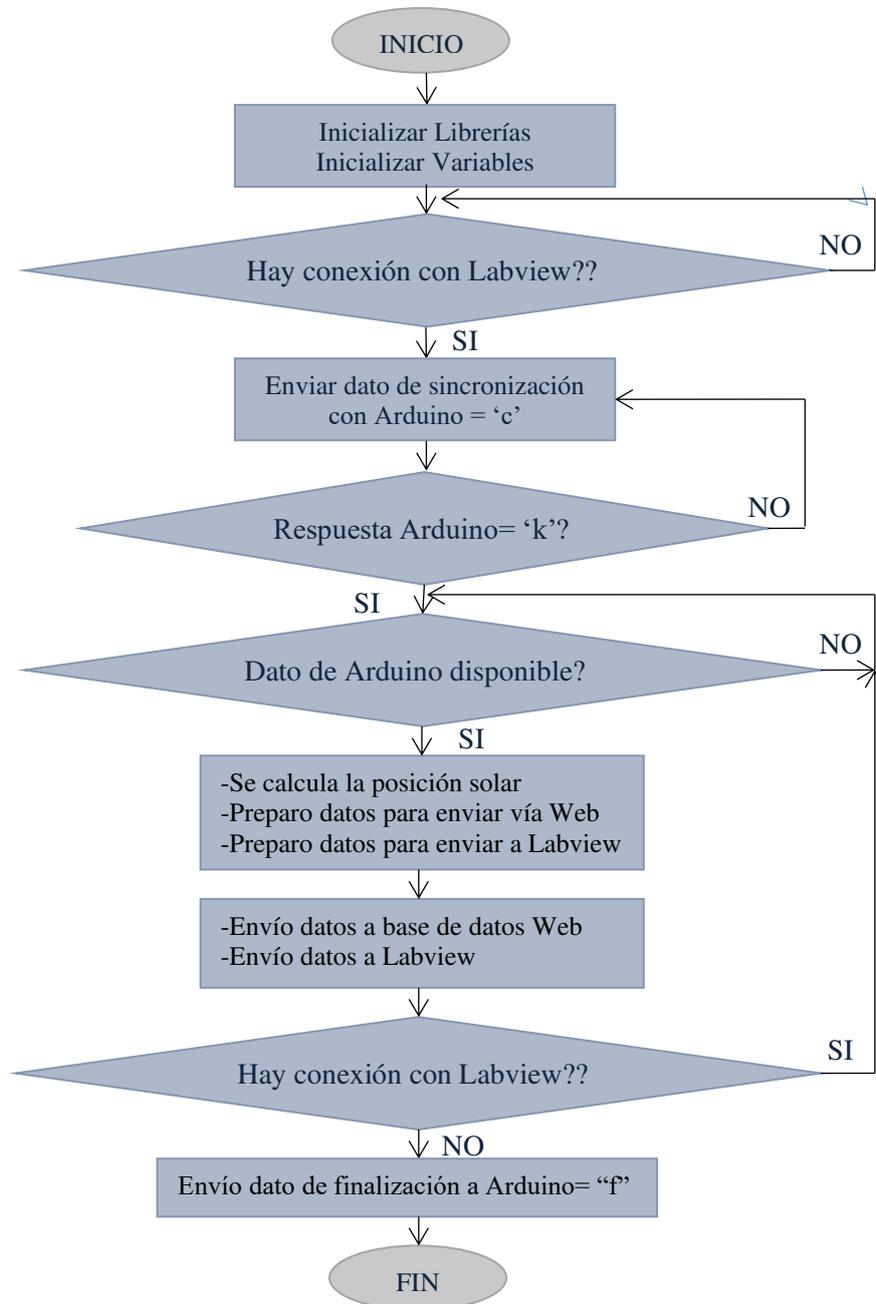


Figura 2.47 Diagrama de flujo del programa implementado en Raspberry

2.2.3.2 SERVIDOR WEB Y BASE DE DATOS

Una de las partes fundamentales de este proyecto es que todo el sistema funcione como una estación remota para el monitoreo de irradiancia, por lo que es necesario que los datos obtenidos sean almacenados en una base de datos en el Internet para poder ser visualizados y tratados por el usuario en cualquier momento y desde cualquier lugar. Para esto se necesita un servidor web.

Servidor Web:

Un servidor web es un dispositivo virtual que brinda espacio y estructura a los sitios web para que almacenen sus datos y manejen sus páginas. Es un computador físico de gran potencia que se encarga de “prestar servicio” para transmitir la información que piden sus clientes y que trabaja sin interrupciones las 24 horas del día los 365 días del año.

Los servidores web tiene como principal función almacenar, mediante un hosting, todos los archivos de una página web como son imágenes, video, texto, etc. Y los transmite a los clientes a través de los diferentes navegadores usando el protocolo HTTP por sus siglas en inglés (Hypertext Transfer Protocol).

Entonces, la función principal de un servidor web es almacenar y transmitir el contenido solicitado de un sitio web, al navegador del usuario. [38]

MySQL:

Es un sistema de gestión de bases de datos relacionales (RDBMS) por sus siglas en inglés, de código abierto respaldado por Oracle y basado en el lenguaje de consulta estructurado (SQL). MySQL está asociado más a menudo con las aplicaciones web y la publicación en línea. [39]

HTML:

Por sus siglas en inglés (HyperText Markup Language) es el lenguaje que se utiliza en Internet para definir las páginas del World Wide Web. Es muy sencillo ya que permite describir hipertexto, es decir, texto presentado de forma estructurada y agradable, con enlaces (hyperlinks) que llevan a otros documentos o fuentes de información relacionadas, y con inserciones multimedia (gráficos, sonido ...). Se trata de especificar en el texto una estructura lógica del contenido (títulos, párrafos, enumeraciones, definiciones, citas, etc.) así como los efectos y aspecto que se quiere dar (cursiva, negrita o algún gráfico) y dejar que la presentación final sea interpretada por un programa especializado. [40]

PHP:

Es un lenguaje de código abierto muy popular, muy utilizado en el desarrollo web y que puede ser incrustado en HTML. Es muy popular porque muchas páginas web han sido creadas en PHP. Incrustado en HTML significa que en un mismo archivo se puede combinar código PHP con código HTML, siguiendo ciertas reglas.

Se usa PHP para generar páginas web dinámicas, que quiere decir que el contenido de una página web puede cambiar en base a cambios que haya en una base de datos. [41]

El esquema es:

1. Se hace una petición desde una página web al servidor
2. El servidor recibe la petición, reúne la información necesaria consultando a bases de datos u otras páginas web, otros servidores, etc
3. El servidor responde enviando una página web estática pero cuya creación ha sido dinámica.

Hosting:

Un hosting es un servicio en línea que te permite publicar un sitio o una aplicación en Internet. Cuando se registra en un servicio de alojamiento, básicamente se alquila un espacio en un servidor donde se puede almacenar los archivos y datos necesarios para un sitio web. [42]

Hostinger:

Es un servidor de hosting que se ha utilizado en este trabajo, que nos proporciona espacio en un servidor y brinda las facilidades para crear una base de datos. Estos datos posteriormente pueden ser mostrados en un sitio Web.

Este proveedor de hosting almacena todos los archivos, medios, y bases de datos en el servidor. Cada vez que alguien escribe el nombre del dominio en la barra de direcciones de un navegador, el servidor transfiere los datos necesarios para atender la solicitud. Dentro de Hostinger podemos crear bases de datos MySQL que podemos administrar usando PHPMyAdmin. [42]

A continuación, en la figura 2.48 se muestra un diagrama de bloques, que muestra todos los componentes de esta etapa.

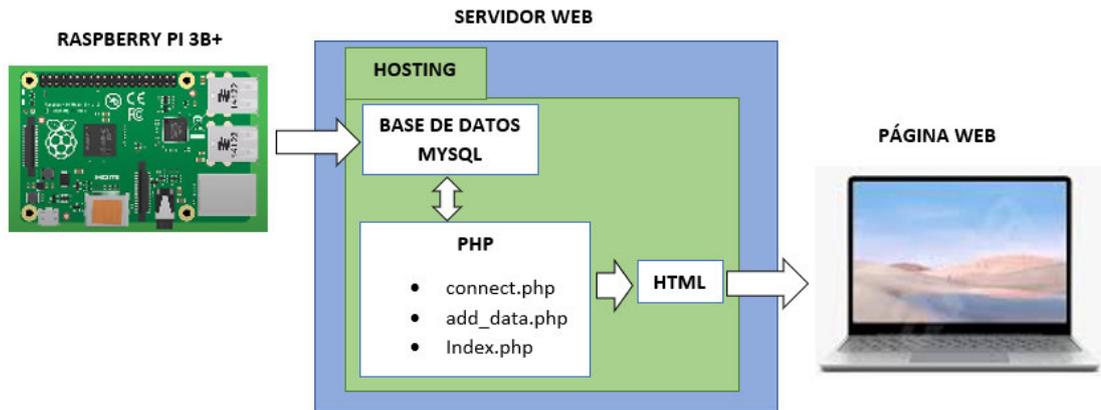


Figura 2.48 Diagrama de bloques, del servidor web y base de datos para el almacenamiento de datos de irradiación.

A continuación, se describe todo lo que se ha realizado en esta etapa:

La Raspberry Pi envía sus datos cada 10 segundos, vía WiFi a un servidor web remoto que almacena sus datos en una base de datos MySQL. De esta manera se puede observar los datos en cualquier parte del mundo, simplemente visitando una página Web que muestra todos los datos de interés en una tabla sencilla.

Para este proyecto se crearon tres scripts PHP. Además, se creó una base de datos en MySQL que se encargará de almacenar los datos. En la base de datos se creó una tabla llamada "irradiación" que tienen un arreglo de filas y columnas, el id de cada entrada, la fecha y hora de obtención de los datos, el GHI, DHI, DNI, el voltaje en crudo, el ángulo cenital solar y la temperatura.

El archivo connect.php es básicamente el responsable de conectarse a la base de datos. Por lo tanto, es importante ingresar correctamente el nombre de usuario, la contraseña de la base de datos y el nombre del host.

La Raspberry Pi envía los datos a un script PHP simple llamado add_data.php. Este script se conecta con la base de datos MySQL (mediante el script connect.php) y guarda los datos en la base de datos.

Para visualizar los datos de la base de datos, hay que acudir al tercer archivo PHP llamado index.php que se conectará a la base de datos nuevamente usando el script connect.php y le pedirá a la base de datos que devuelva todos los datos almacenados. Luego, mostrará todos los datos en una página web mediante una tabla HTML.

2.2.3.3 INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA (HMI)

Para la parte de visualización se usa los beneficios de la tarjeta embebida Raspberry Pi 3B+ que presenta facilidad para la comunicación inalámbrica vía Internet para conectar con un Interfaz Hombre Máquina (HMI).

Protocolo SSH:

Por sus siglas en inglés Secure SHell es un protocolo que permite crear conexiones remotas seguras entre dos ordenadores. Usando SSH, la máquina del cliente inicia una conexión con la máquina del servidor mediante una sesión cifrada, imposibilitando que alguien pueda obtener una contraseña o cualquier otro tipo de información que se envíe por la red.

- Una conexión SSH se la realiza en tres pasos: Se crea una capa de transporte segura para que el cliente sepa que se está comunicando con el servidor correcto. Luego se cifra la comunicación entre el cliente y el servidor por medio de un código simétrico.
- Autenticación del cliente ante el servidor, sin preocuparse que la información de autenticación pueda ponerse en riesgo.
- Uso de la conexión establecida por los servicios que requieran una conexión segura, como pueden ser un intérprete de comandos, una aplicación o un túnel TCP/IP.

La parte principal sucede en la capa de transporte, que es ejecutada de forma normal sobre TCP/IP, que se encarga de facilitar la comunicación segura entre los dos ordenadores. [43]

LabVIEW:

(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un sistema de desarrollo basado en programación gráfica orientado a desarrollar aplicaciones para instrumentación que integra algunas posibilidades para comunicación entre varios dispositivos electrónicos como GPIB, RSR232 o RS485 con tarjetas de adquisición de datos, sistemas embebidos, comunicaciones con redes TCP/IP, UDP y muchos más. [44]

Los programas realizados en este entorno son llamados instrumentos virtuales “Vis”, debido a que tienen parecido a instrumentos reales, pero que tienen analogía con funciones provenientes de lenguajes de programación tradicionales.

Los Vis contienen una interfaz interactiva con el usuario, conocido como panel frontal, y simula el panel de un instrumento físico. Este panel permite la interacción entre el usuario

y los dispositivos de campo, de tal forma que se pueden observar las variables de campo y comandar también dichos dispositivos. Este panel también es conocido como Interfaz Hombre Máquina (HMI). [44]

Los Vis reciben instrucciones de un diagrama de bloques basado en lenguaje G que suministra una solución gráfica a un problema de programación. Este diagrama de bloques se conoce como el código fuente de un VI.

Cada VI de LabVIEW cuenta con dos interfaces: panel frontal (figura 2.49) y diagrama de bloques (figura 2.50). Cuentan con paletas que contienen herramientas necesarias para implementar y desarrollar tareas.

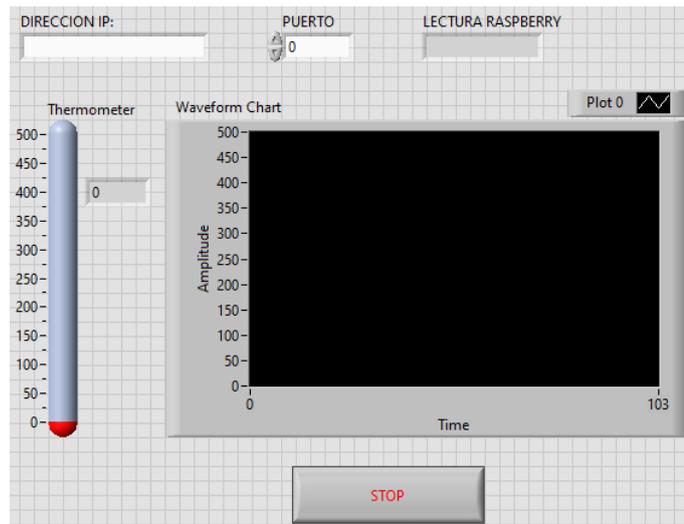


Figura 2.49 Panel Frontal de LabVIEW.

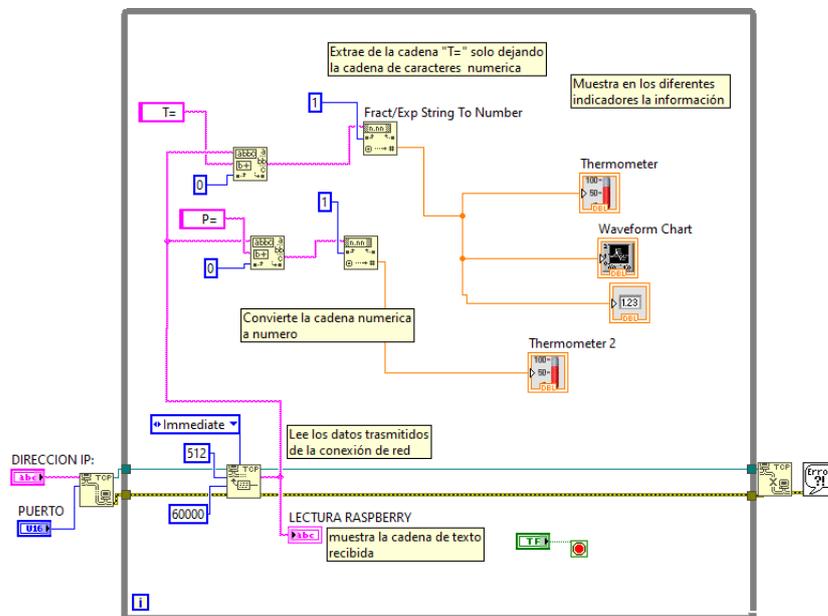


Figura 2.50 Diagrama de bloques y código fuente de LabVIEW.

Remote.it:

Es una aplicación gratuita que proporciona los servicios necesarios para poder conectar remotamente a través de la nube de internet con la Raspberry Pi. Incluso se pueden gestionar varias de estas tarjetas que estén asociados a esta cuenta. Y se pueden monitorear datos remotos y/o establecer comunicación SSH, VNC, TCP/IP, con lo cual se pueden realizar varios proyectos interesantes como en este caso enlazar Raspberry con LabVIEW a través de internet. Además, mediante el protocolo SSH se pudo controlar y programar la tarjeta Raspberry desde casa mientras se hacía las pruebas de este proyecto.



Figura 2.51 Diagrama de bloques aplicación Remote.it

A continuación, se describe todo el proceso que se ha realizado en esta etapa:

La configuración para la sincronización entre Raspberry (servidor) y el HMI (cliente) se realiza en el panel frontal de LabVIEW. En el panel frontal se procede a ingresar la dirección IP del cliente, así como su puerto que ha sido asignado mediante programación en el servidor. Una vez insertada esta información, se inicia la comunicación. Raspberry prepara y envía los datos vía protocolo TCP/IP hacia LabVIEW, y este mediante programación gráfica procede a mostrar todas las variables de interés.

Cuando el cliente y el servidor se encuentran conectados a la misma red LAN, la comunicación se la puede realizar directamente simplemente asignando en el panel frontal la dirección IP y el puerto del cliente, sin necesidad de ninguna otra aplicación.

Pero cuando el servidor y el cliente no están en la misma red LAN, la manera más sencilla por la que se optó es una aplicación gratuita llamada Remote.it la cual realiza una conexión TCP entre cliente y servidor. Remote asigna una dirección de internet y un puerto público para la Raspberry. Estos datos hay que escribir en el panel frontal de LabVIEW y ejecutar el programa. Remote básicamente redirige los datos que envía Raspberry hacia el cliente

en LabVIEW a través de internet. De esta manera se puede monitorear los datos que entrega todo el sistema en tiempo real y desde cualquier lugar.

En la figura 2.52 se pueden observar todos los componentes electrónicos del sistema RSR.

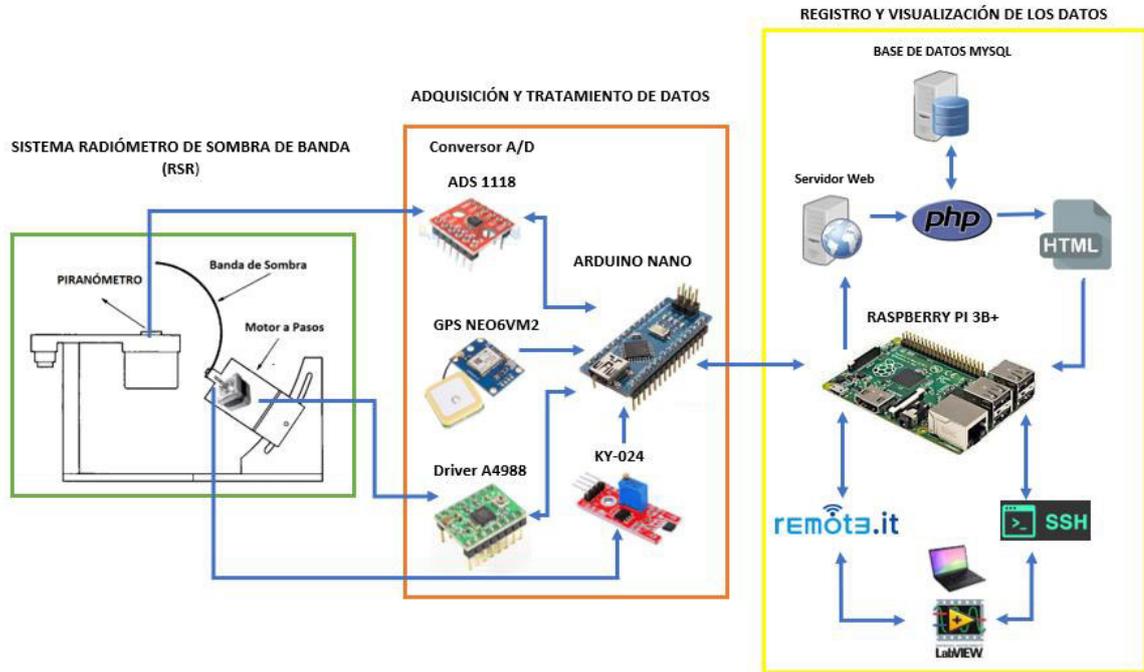


Figura 2.52 Diagrama de bloques de todo el Sistema Electrónico

2.3 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO

La función principal del sistema mecánico es dar soporte a los diferentes componentes que por los que se encuentra constituido el sistema RSR. Para la implementación y dimensionamiento de cada pieza se usó el software SolidWorks.

El sistema mecánico puede ser dividido en dos partes importantes: El piranómetro y el sistema sombra de banda.

2.3.1 SOPORTE MECÁNICO DEL PIRANÓMETRO

Este sistema es el encargado de sujetar el fotodiodo, el difusor que ayuda a mejorar la respuesta angular, y obtener esta señal de corriente que entrega el fotodiodo de una manera sencilla. Además, cuenta con un soporte para colocar una burbuja de nivel para mantener todo el sistema ubicado de manera horizontal. Todas las partes se acoplan mediante tornillos, ofreciendo facilidad para cambiar el fotodiodo o algún otro componente de manera sencilla, de ser necesario. En la figura 2.53 se muestran los principales componentes mecánicos del piranómetro, cuya función es descrita en la tabla 2.17.

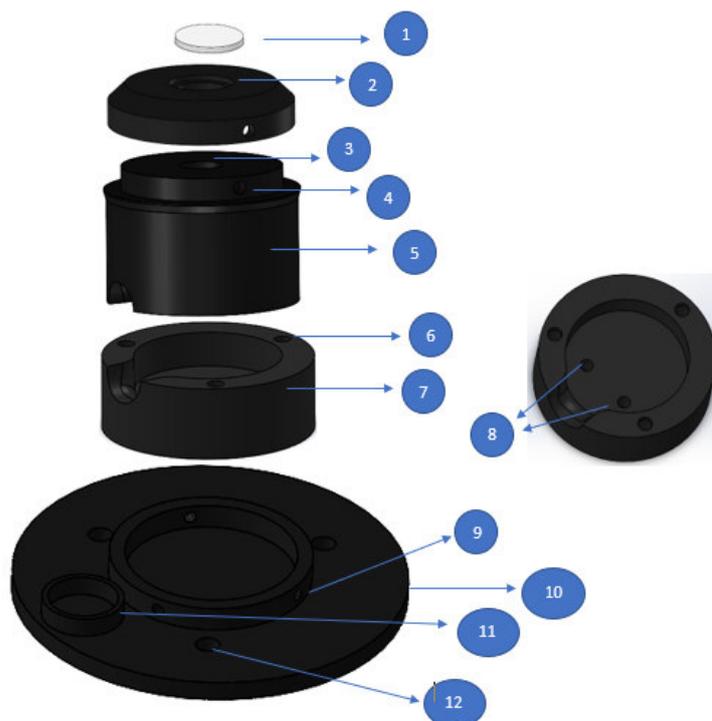


Figura 2.53 Modelo 3D del piranómetro implementado en SolidWorks y sus principales componentes

Tabla 2.17 Elementos que conforman el sistema mecánico del piranómetro y su función principal

N°	Nombre	Función
1	Difusor de teflón	Protege el fotodiodo y ayuda a mejorar la respuesta angular del piranómetro
2	Tapa del piranómetro	Funciona como tapa para todo el piranómetro y aquí reposa el difusor que ingresa a presión.
3	Espacio para el fotodiodo	En este lugar se coloca el fotodiodo, el cual ingresa a presión
4	Tornillos de ajuste superior	Estos tornillos unen la tapa con el cuerpo superior del piranómetro
5	Cuerpo superior del piranómetro	Sirve para proteger y sostener el fotodiodo y tiene espacio para colocar un conector BNC
6	Tornillos de ajuste inferior	Estos tornillos unen el cuerpo superior con el inferior del piranómetro
7	Cuerpo inferior del piranómetro	Sirve para proteger el fotodiodo, y tiene espacio para colocar un conector BNC

8	Tornillos de ajuste para conector BNC	Sujetan la placa electrónica que conecta el fotodiodo con el conector BNC
9	Espacio para el piranómetro	Aquí reposa todo el piranómetro, que ingresa a presión y además es sujetado por tornillos
10	Base	La base sirve para sostener el piranómetro y para unir el sistema del piranómetro con el sistema mecánico RSR
11	Burbuja de nivel	Aquí se coloca a presión una burbuja de nivel comercial, que ayuda a mantener al piranómetro lo más horizontal posible
12	Tornillos de ajuste de la base	Acoplan y sujetan todo el sistema piranómetro con el sistema RSR.

En la figura 2.54 se puede observar todas las piezas acopladas del sistema mecánico del piranómetro.

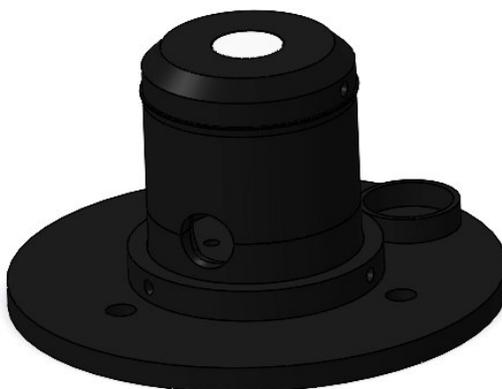


Figura 2.54 Modelo 3D del todo el sistema mecánico del piranómetro implementado en SolidWorks

Difusor:

Uno de los componentes mecánicos más importantes de este proyecto es la selección del difusor, el material y sus dimensiones.

Idealmente, los detectores de piranómetro deberían responder a la luz solar directa en proporción al coseno del ángulo cenital del sol. Cuando el sol está directamente arriba, hay que definir la respuesta "normalizada" como 1. A medida que aumenta el ángulo cenital, la respuesta normalizada del detector a la luz solar directa debe disminuir como el coseno del ángulo cenital. Los detectores reales no tienen una respuesta de coseno perfecta. Para mejorar su respuesta, se puede colocar algún tipo de difusor de luz solar sobre el detector [45].

Generalmente los piranómetros comerciales utilizan caros domos de cristal para proteger al piranómetro, pero son afectados por la radiación y atrapa más la suciedad por lo que tienen que ser cambiados cada cierto tiempo, para asegurar la precisión del dispositivo [13].

El teflón es un material que se utiliza a menudo, ya que tiene buenas propiedades de transmisión espectral, es muy estable, y no se ve tan afectado por la suciedad, además que es resistente a la exposición de radiaciones Ultra Violeta (UV). Por lo que es ideal para esta aplicación [13], [45].

Se fabricó un difusor de teflón plano y redondo de 11 milímetros de diámetro y de 1 milímetro de espesor, el cual se encuentra ubicado encima del fotodiodo a una distancia de 3 milímetros justo en la tapa del piranómetro.

2.3.2 SOPORTE MECÁNICO DEL SISTEMA SOMBRA DE BANDA

La configuración del sistema mecánico RSR consta básicamente de la sombra de banda, el ajuste de latitud del motor, el soporte para el motor, un soporte para colocar el piranómetro, y un soporte general para todos estos componentes.

Soporte del Motor a pasos

Es el encargado de sujetar, y proteger firmemente el motor a pasos. En la figura 2.55 se muestran los componentes principales y en la tabla 2.18 se explica la función de cada uno de ellos.

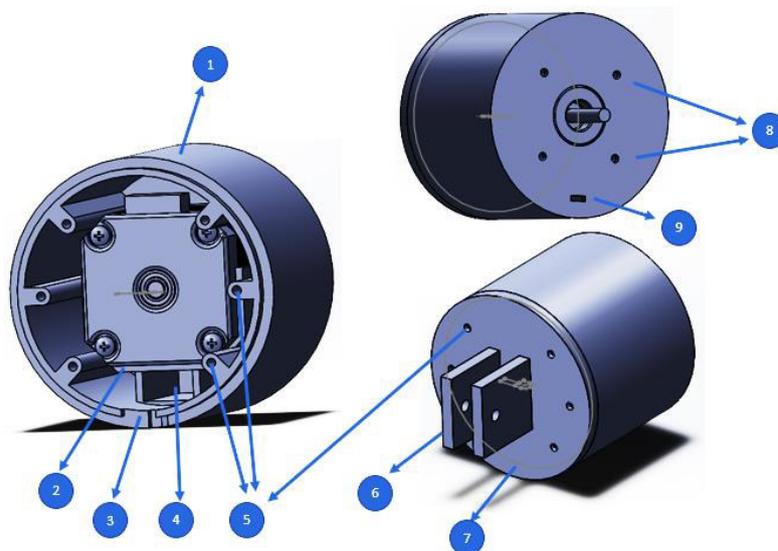


Figura 2.55 Modelo 3D del soporte mecánico del motor a pasos implementado en SolidWorks

Tabla 2.18 Elementos que conforman el soporte del motor a pasos y su función principal.

N°	Nombre	Función
1	Carcasa del motor	Protege y da soporte al motor a pasos y al sensor magnético
2	Soporte del motor a pasos	Aquí reposa el motor a pasos y es colocado a presión
3	Espacio para conectores electrónicos	Por aquí pasan las conexiones eléctricas para el motor y para el sensor magnético.
4	Soporte para el sensor magnético	Aquí reposa el sensor magnético.
5	Tornillos de ajuste	Sirve para acoplar y sujetar la carcasa del motor con la tapa.
6	Piezas de ajuste de latitud	Estas piezas sobresalen de la tapa para poder acoplar el motor a pasos al ajuste de latitud mediante un tornillo
7	Tapa del motor	Cubre al motor, y a su vez contiene las piezas de ajuste de latitud.
8	Tornillos de ajuste del motor	Sujetan el motor a pasos a la carcasa del motor
9	Orificio del sensor magnético	Aquí sobresale el sensor magnético para poder detectar la posición inicial de la banda de sombra de mejor manera

Resto de componentes del soporte mecánico del sistema sombra de banda:

Conformados por la sombra de banda, el ajuste de latitud, soporte del piranómetro, y un soporte general. En la figura 2.56 se muestran los componentes principales y en la tabla 2.19 se detallan sus funciones principales.

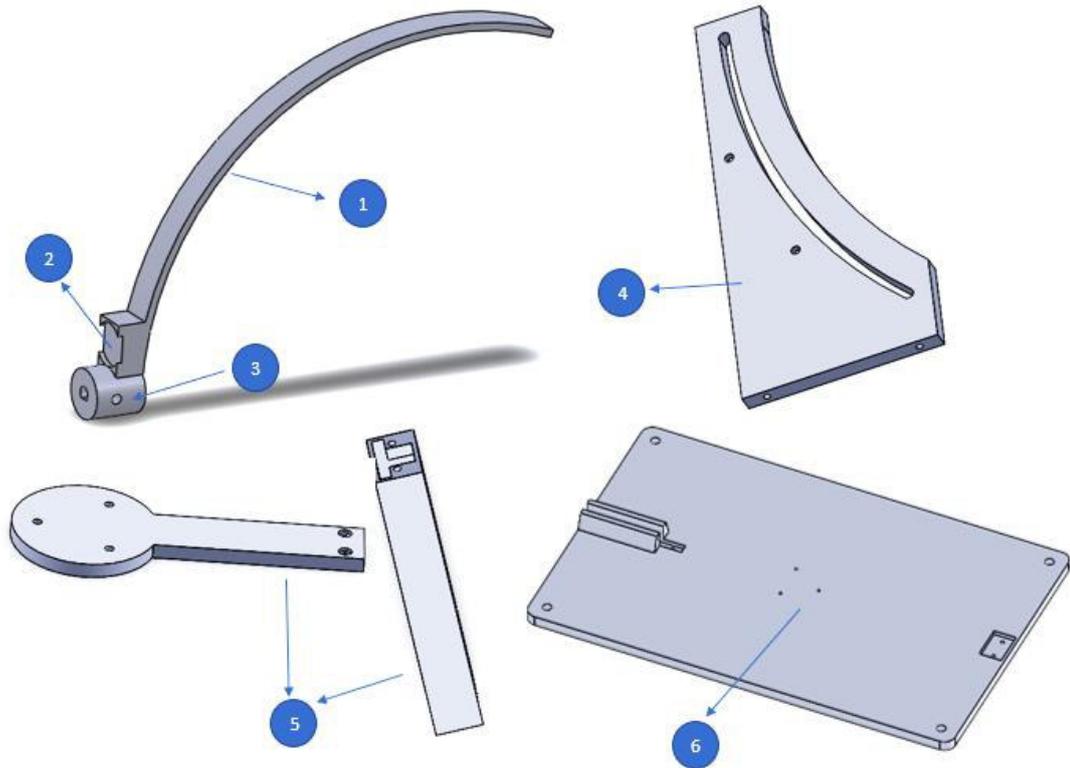


Figura 2.56 Modelo 3D del soporte mecánico del resto de componentes del sistema implementado en SolidWorks

Tabla 2.19 Elementos que conforman el resto de componentes del soporte mecánico y su función principal

N°	Nombre	Función
1	Sombra de banda	Es la encargada de cubrir el difusor del piranómetro periódicamente. Es accionada por el motor a pasos, por tanto, va acoplada al eje del motor mediante tornillos.
2	Imán	Aquí se coloca un imán para poder conocer la posición inicial de la banda de sombra, usando el sensor magnético.
3	Ajuste del eje del motor	Aquí se acopla el eje del motor a pasos con la banda de sombra mediante tornillos.
4	Ajuste de Latitud	Sirve para ajustar el ángulo de latitud al que se encuentra el dispositivo. Con el fin de orientar el eje del motor paralelo al eje de rotación de la tierra. Es acoplado al soporte general mediante tornillos.

5	Soporte del piranómetro	Es el soporte donde reposará horizontalmente el piranómetro, de tal manera que su difusor se encuentre en el centro del eje de rotación de la sombra de banda. Es acoplado al soporte general mediante tornillos.
6	Soporte General	Sirve como soporte para el resto de componentes.

En la figura 2.57 se puede observar toda la disposición de los elementos que conforman el sistema mecánico.

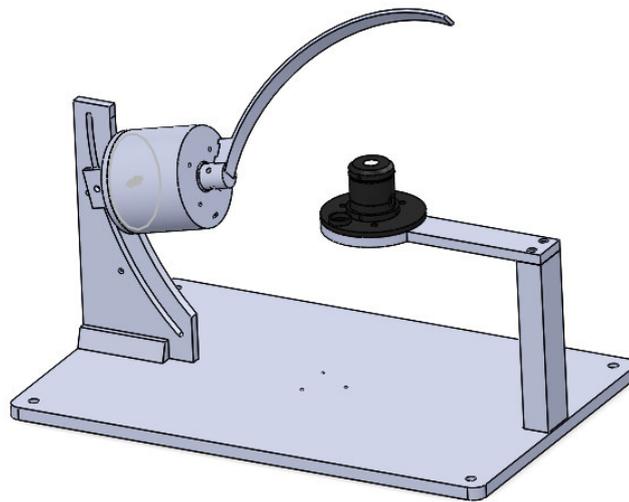


Figura 2.57 Disposición de todos los componentes que conforman el sistema mecánico de este proyecto.

2.4 BIBLIOTECA PYTHON (PYSOLAR)

Para la validación del algoritmo de seguimiento solar, se usó una biblioteca disponible en Python 3 llamada Pysolar. La cual es una colección de bibliotecas para simular la irradiancia solar de cualquier punto de la tierra. Incluye también código para calcular la ubicación del sol.

Esta biblioteca recibe como entrada la hora, la latitud y la longitud, del punto respecto al cual se quiere obtener la posición solar, y puede devolver los valores de altitud solar y acimut solar.

Incluso, esta biblioteca puede estimar la irradiancia normal directa (DNI) en cielo despejado y devuelve un valor en vatios por metro cuadrado. Toma en cuenta la dispersión de la luz debido a la atmósfera, y utiliza un modelo atmosférico que está basado en datos tomados en Estados Unidos.

Esta biblioteca, ha sido validada con un código de efemérides similar desarrollado por el Observatorio Naval de los Estados Unidos (USNO). Las estimaciones de Píscitar de acimut y de altitud coincidieron con las del observatorio en menos de 0.1 grados en promedio. [46]

En la tabla 2.20 se muestran los errores típicos que presenta esta biblioteca.

Tabla 2.20 Valores de error típicos que presenta la biblioteca Pysolar [46]

	Acimut	Altitud
Error medio	0.00463 °	0.0379 °
Desviación estándar del error	0.00550 °	0.0795 °
Error mínimo	6.10*10e-6 °	1.04*10e-6 °
Error máximo	0.176 °	0.604 °

2.5 ESTACIÓN METEOROLÓGICA COMERCIAL

Para la calibración del equipo se utilizó los datos entregados por la “Estación Meteorológica Remota 1” sistema que consta de un anemómetro, un panel solar para su energización autónoma, un piranómetro comercial que entrega mediciones de GHI. Este equipo se encuentra ubicado en la terraza del edificio de Química/Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional.

La figura 2.58 muestra algunos de los componentes que forman parte de esta instalación.

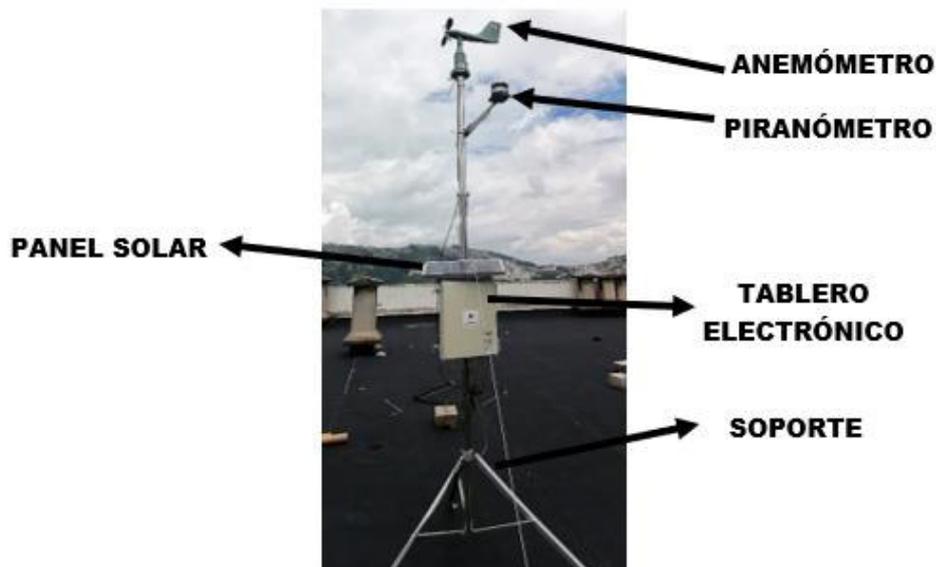


Figura 2.58 Componentes que forman parte de la Estación Meteorológica Remota

1.

Dentro del tablero electrónico se encuentran los componentes que se muestran en la figura 2.59.

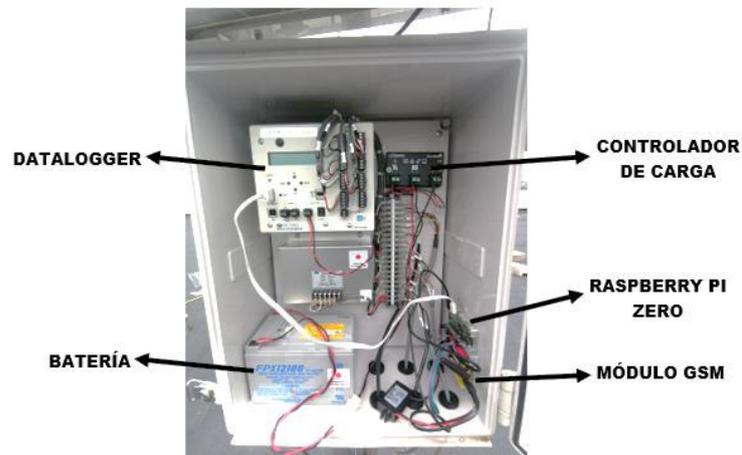


Figura 2.59 Componentes que forman parte de la Estación Meteorológica Remota dentro del tablero electrónico.

2.5.1 PIRANÓMETRO NIPPON ELECTRIC

Este sistema comercial consta de un piranómetro Nippon Electric (figura 2.60) que según la norma ISO 9060 es de segunda clase y está colocado horizontalmente para medir irradiancia global horizontal GHI.

Sus características de placa son:

- Tipo N-70-030E
- Impedancia: 500 ohm
- Sensibilidad: $7 \text{ mV} / \text{kWm}^{-2}$
- Marca: Nippon Electric Instrument, Inc



Figura 2.60 Piranómetro Nippon Electric Instrument

2.5.2 DATALOGGER CF200

Se encarga de almacenar los datos de los sensores meteorológicos temporalmente. Este datalogger (figura 2.61) consta de un teclado, una pantalla, en donde se pueden hacer distintas configuraciones para el muestreo y la descarga de datos. A los datos de este registrador de datos se puede acceder usando una memoria flash. Pero se han realizado trabajos previos para que el datalogger envíe datos al finalizar cada día hacia una tarjeta Raspberry Zero, la cual se comunica vía serial con un módulo GSM, el cual se encarga de enviar los datos a una base de datos de una página Web.

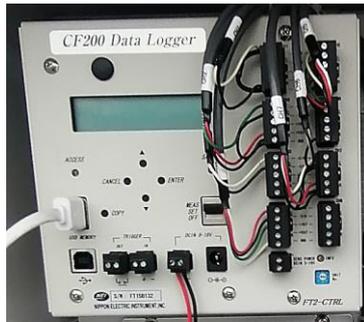


Figura 2.61 Datalogger CF200

Esta estación toma datos de GHI cada 5 minutos durante todo el día, y sube los mismos a una base de datos al final de cada día. Afortunadamente estos datos pueden ser descargados en la página web de Scinergy Meteorología [47] (figura 2.62) Datos que se usaron para la calibración de nuestro equipo instrumental.



Figura 2.62 Página Web Scinergy Meteorología, donde se descargaron los datos para la calibración de nuestro equipo. [47]

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados más importantes obtenidos por nuestro prototipo que ha sido denominado “RSR EPN V1” (figura 3.1). El esquema de todo el sistema se presenta en la figura 3.1 en donde se observa el prototipo implementado, el mismo que está compuesto por un sistema electrónico y mecánico. Además, consta de un sistema electrónico de adquisición y visualización de datos, que son guardados en una base de datos en la red.

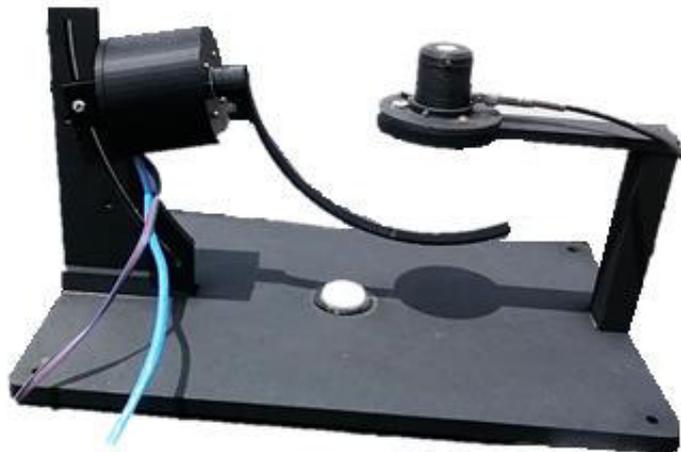


Figura 3.1 Prototipo implementado “RSR EPN V1”

A continuación, se muestran los resultados más importantes con relación a la construcción, pruebas, calibración y validación de resultados del prototipo.

3.1 DIAGRAMA GENERAL DEL PROTOTIPO

Piranómetro:

Para la implementación de los componentes mecánicos del piranómetro, se usó impresión 3D, cada pieza fue impresa en un material conocido como PLA. Se escogió el color negro porque es el color que menos refleja los rayos solares, por tanto, no afectaría las mediciones de irradiancia.



Figura 3.2 Partes constitutivas del piranómetro implementado

En la figura 3.2, se muestra el montaje de cada una de las piezas

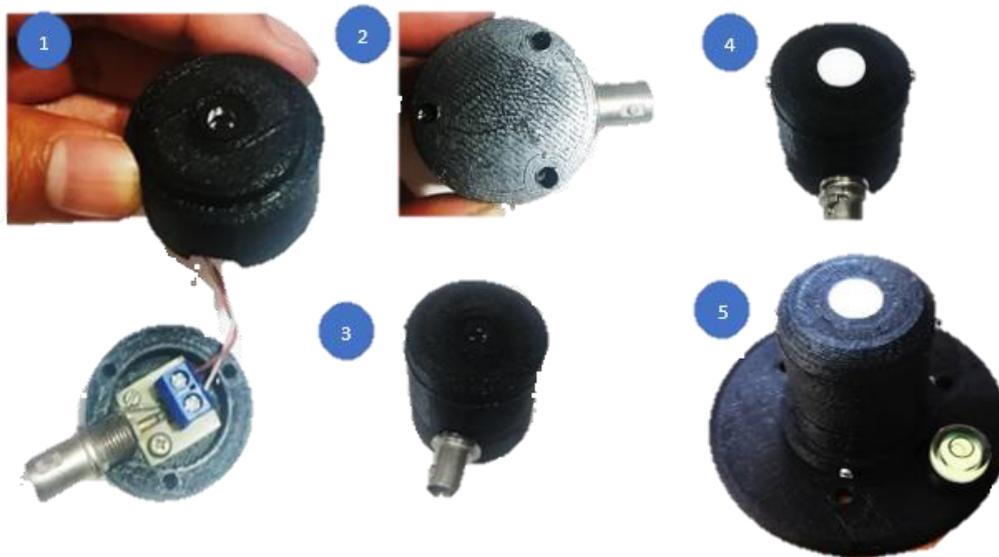


Figura 3.2 Procedimiento del montaje del piranómetro

En la Tabla 3.3 se comenta el procedimiento de montaje que hay que seguir.

Tabla 3.3 Procedimiento de montaje del piranómetro. (ver figura 3.2)

Paso	Comentario
1	<ul style="list-style-type: none"> • Se coloca el fotodiodo a presión en el cuerpo superior del piranómetro • Se ajusta la placa electrónica del conector BNC al cuerpo inferior del piranómetro • Se conectan los terminales del fotodiodo a la bornera disponible.
2	<ul style="list-style-type: none"> • Se une mediante tornillos, el cuerpo superior con el inferior del piranómetro. Los tornillos ingresan desde la parte de abajo del cuerpo inferior del piranómetro
3	<ul style="list-style-type: none"> • Se coloca la tapa del piranómetro. Se ajusta mediante tornillos al cuerpo superior del piranómetro
4	<ul style="list-style-type: none"> • Se coloca el difusor en la tapa del piranómetro. (ingresa a presión)
5	<ul style="list-style-type: none"> • Se monta todo el piranómetro a la base. El piranómetro entra a presión y también es ajustado con tornillos.

Sistema RSR

Para la implementación del sistema RSR, solo la banda de sombra y la carcasa del motor se lo realizó en impresión 3D en el material PLA negro. El resto de componentes se los mandó a fabricar en nylon, debido a que se necesitaba un material más robusto que de soporte al resto de componentes. En la figura 3.4 se observan diferentes vistas de la carcasa del motor y la sombra de banda, y en la figura 3.5 se observan todos los elementos constitutivos del sistema RSR.



Figura 3.4 Vista de la carcasa del motor y la sombra de banda del sistema RSR

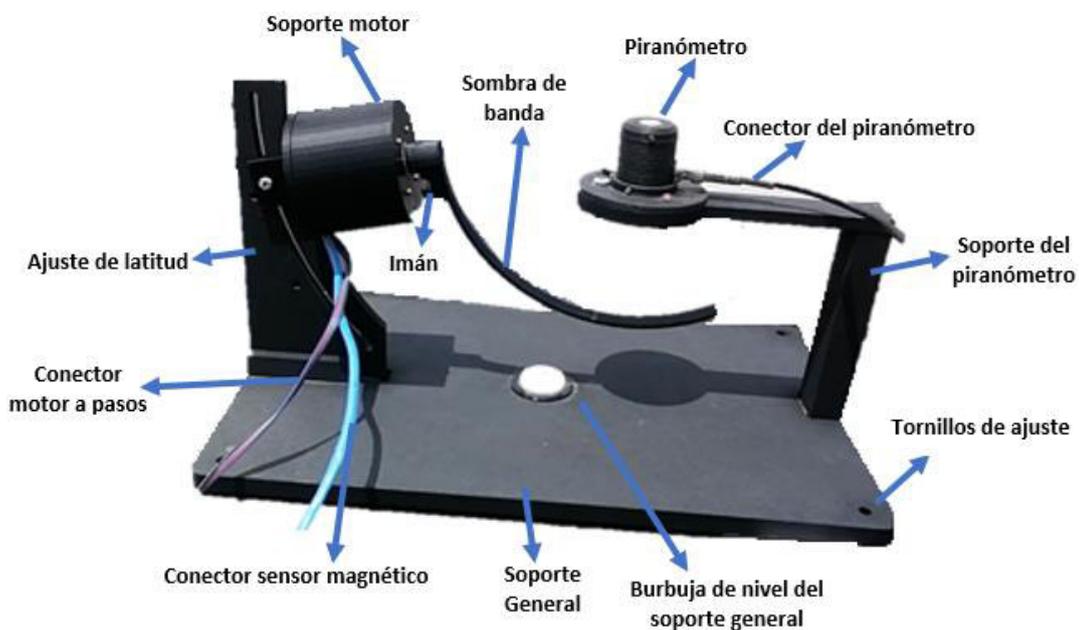


Figura 3.5 Elementos constitutivos de todo el sistema RSR

Circuito electrónico de control:

El sistema electrónico consta de la placa electrónica (figura 3.6), en la que están incluidos todos los componentes mencionados en la metodología, además, se incluyeron conectores de alimentación para el motor, conectores de alimentación para el resto de componentes, borneras para la conexión de las bobinas del motor, borneras para la conexión del sensor magnético, borneras para la señal de corriente que llega del piranómetro. Dentro de esta

placa se encuentra incluida la resistencia de carga, la que se encarga de convertir la señal de corriente en una señal de voltaje.

El conector serial de la placa Arduino es conectado directamente a un puerto USB de la tarjeta Raspberry Pi 3B+.

Esta placa ha sido diseñada para ser colocada en un tablero electrónico, junto a la tarjeta Raspberry, solo necesita dos fuentes de alimentación: una de 12 V a 2 A para el motor a pasos y una de 5V a 3A para Raspberry y el resto de componentes.

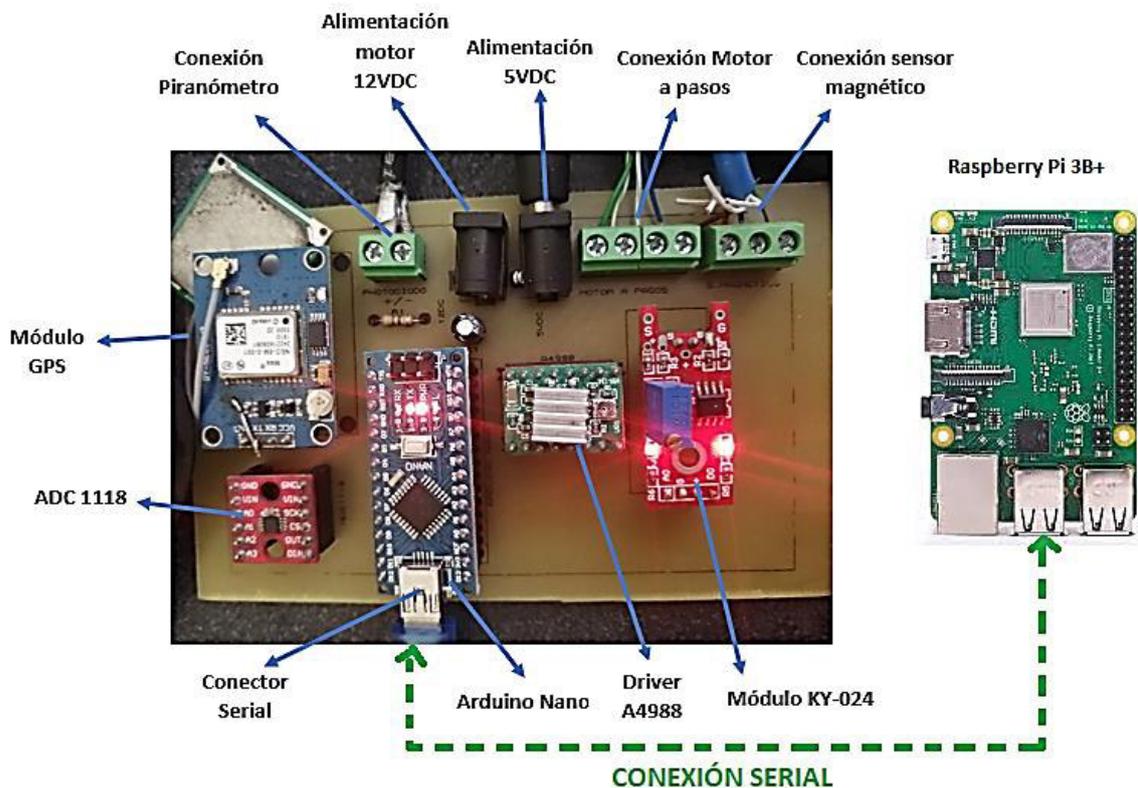


Figura 3.6 Elementos constitutivos del circuito de control

3.2 DÍAS CONSIDERADOS PARA LA CALIBRACIÓN

Para la calibración de este equipo hemos montado nuestro equipo en la terraza del edificio de química eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. Para la calibración del piranómetro se ha seguido el procedimiento especificado en la norma ISO 9847 en la que se habla de la calibración de piranómetros de campo por comparación con un piranómetro de referencia. Esta norma se puede aplicar a la mayoría de piranómetros independientemente del tipo del sensor utilizado. [48]

Para nuestro caso se escogió la calibración horizontal y en exteriores (tipo la según la norma ISO 9847). Que sugiere colocar el piranómetro de calibración a una distancia inferior a 30 metros del piranómetro de referencia, de lo contrario, es posible que ambos radiómetros no sean afectados de manera similar por la radiación solar. Por lo tanto, se ubicó el sistema RSR y el piranómetro a una distancia de 15 metros del piranómetro de referencia (figura 3.7).



Figura 3.7 Ubicación del piranómetro de referencia y del piranómetro en calibración, ubicados a una distancia de 15 metros.

Los días en los que se buscó el factor de calibración del piranómetro se muestran en la tabla 3.2 en donde se muestran las condiciones climáticas que estos presentaron.

Nuevamente basándonos en la norma ISO 9847 y en la tabla 3.2 en donde se observa que las condiciones climáticas de los días de calibración en su mayoría fueron días nublados. La norma sugiere que se debe tomar lecturas simultáneas integradas en intervalos de 1 hora en ambos instrumentos. Todos estos, durante un mínimo de 10 días a diferentes

ángulos de elevación solar y diferentes tipos de nubosidad, si la media horaria de la irradiancia global es superior a $100 \frac{W}{m^2}$. [48]

Para encontrar el factor de calibración de igual manera se ha seguido del procedimiento que especifica la norma, donde se aplica la fórmula (3.1), en donde i representa una lectura instantánea dentro de una serie de mediciones j . $F_R(j)$ es el factor de calibración, dado en vatios por metro cuadrado por milivoltio, que se ajusta mejor a las condiciones de calibración (por ejemplo, temperatura media) y que da el valor más preciso de irradiancia $E(ij)$. [48]

$$F_R(j) * V_R(ij) = E(ij) \quad (3.1)$$

Donde:

$F_R(j)$: Factor de calibración de la serie de mediciones j .

$V_R(ij)$: Medición número i del voltaje del piranómetro, en una serie j

$E(ij)$: Medición de irradiancia número i , en una serie j

Finalmente, el factor de calibración final del piranómetro de campo de un número total m de series de medición se obtiene de la fórmula (3.2)

$$F = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m F(ij) \quad (3.2)$$

Debido a que, el piranómetro de referencia comercial está configurado para entregar datos de Irradiancia Global Horizontal (GHI) en intervalos de 5 minutos, se decidió registrar en nuestra base de datos las mediciones de voltaje de nuestro piranómetro cada 5 minutos desde las 6 horas en la mañana hasta las 18 horas en la tarde por lo que, cada serie consta de 145 mediciones que al final del día se comparan con los datos del piranómetro comercial.

Para cada serie de datos se ha asignado un factor de calibración que haga que la mayoría de datos se encuentren dentro del 5% de desviación respecto de la medida de GHI del piranómetro comercial.

En el ANEXO III se muestran los datos de uno de los días de calibración con el respectivo factor de calibración que mejor respuesta entregó. En la tabla 3.2 se observa la corrección de desplazamiento o error de offset debido al conversor ADC, y el factor de calibración o multiplicación utilizado en cada serie de medición (cada día).

Tabla 3.2 Días utilizados para encontrar el factor calibración del piranómetro construido.

Día	Fecha	Clima	Error de Offset [mV]	Factor de multiplicación $\left[\frac{W}{m^2 * mV}\right]$
Día 1	19 de agosto de 2021	Nublado	3	9
Día 2	20 de agosto de 2021	Soleado	2.9	9.1
Día 3	23 de agosto de 2021	Nublado	2.5	8.9
Día 4	24 de agosto de 2021	Soleado	3	9.14
Día 5	25 de agosto de 2021	Nublado	2.3	9
Día 6	26 de agosto de 2021	Nublado	2.5	9.145
Día 7	27 de agosto de 2021	Nublado	2	9.142
Día 8	28 de agosto de 2021	Nublado	2	9.15
Día 9	29 de agosto de 2021	Nublado	2.5	9.3
Día 10	4 de septiembre de 2021	Nublado	2.4	9.14
PROMEDIO			2.5	9.1017

Como se puede observar en la tabla 2.4 se ha obtenido el factor de calibración promedio de todas las series de datos en donde se obtiene un error de desplazamiento positivo de 2.5 mV y un factor de multiplicación de $9.1017 \frac{W}{m^2 * mV}$. Estos factores se procedieron a programar en Raspberry, como se muestra en la ecuación 3.3.

$$Irr = (Vin + 2.5) [mV] * 9.1017 \left[\frac{W}{m^2 * mV} \right] \quad (3.3)$$

Donde:

Vin: Es el voltaje en milivoltios entregado por el piranómetro en calibración.

Irr: Es la irradiancia medida por el piranómetro en calibración.

3.3 VALIDACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS

La validación de nuestros datos se los ha realizado al comparar las mediciones de GHI del piranómetro construido y las del piranómetro comercial de referencia.

3.3.1 COMPONENTE GLOBAL

La validación del componente global o GHI se lo realizó desde el 11 de septiembre hasta el 19 de septiembre de 2021, en donde se tuvieron días soleados, pero con muchas nubes.

En la tabla 3.3 se muestra el promedio del error obtenido y la desviación estándar de cada día, para poder establecer la dispersión de las mediciones de nuestro piranómetro respecto del piranómetro comercial.

En el ANEXO IV se pueden observar los datos de uno de los días de validación con su respectivo error. Se han tomado en cuenta los valores mayores a 10 mV para este análisis, esto debido a que para los valores menores a estos voltajes una variación pequeña entre los valores de irradiancia de nuestro piranómetro y los del comercial producía un error demasiado grande, generando una desviación igualmente demasiado grande. Esto sucede generalmente cuando el sol está saliendo en la mañana y en la tarde cuando el sol se está ocultando.

Tabla 3.3 Días utilizados para la validación del piranómetro construido.

Día	Fecha	Clima	%Promedio del Error	Desviación Estándar
Día 1	11 de septiembre de 2021	Nublado	4.53	5.61
Día 2	12 de septiembre de 2021	Soleado	3.97	1.3
Día 3	13 de septiembre de 2021	Nublado	3.57	5.04
Día 4	14 de septiembre de 2021	Soleado	2.814	3.5
Día 5	15 de septiembre de 2021	Nublado	3.44	4.26
Día 6	16 de septiembre de 2021	Nublado	4.31	5.01
Día 7	17 de septiembre de 2021	Nublado	2.11	2.56
Día 8	18 de septiembre de 2021	Nublado	3.49	2.82
Día 9	19 de septiembre de 2021	Nublado	3.1	2.68
PROMEDIO			3.48	3.64

De la tabla 3.3 se deduce que el error promedio, respecto del piranómetro de referencia es del 3.48 % y con una desviación estándar del mismo 3.64%. Por lo tanto, el error promedio podría desviarse +- 3.64%, dando un rango del error de la medición entre 0% y 7.12%.

A continuación, con el fin de mostrar el comportamiento del piranómetro en distintos escenarios meteorológicos (días totalmente nublados, días parcialmente nublados, y días totalmente despejados), se muestran las siguientes gráficas.

En la figura 3.8 se muestra las mediciones de GHI del día 28 de agosto de 2021, en donde se tuvo un día nublado en su mayoría. De color naranja, se observa el GHI del piranómetro que construimos, y en azul se observa el GHI que entrega el piranómetro comercial de referencia.

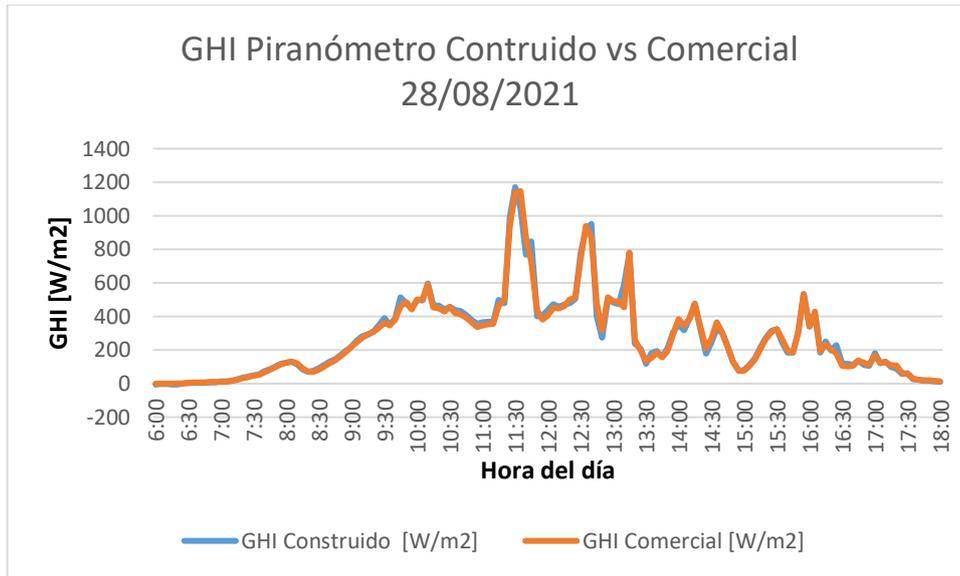


Figura 3.8 Mediciones de GHI del piranómetro construido y el piranómetro comercial el 28 de agosto de 2021.

En la figura 3.9 se observan las mediciones de ambos piranómetros, y se puede observar que el día empieza totalmente despejado desde las 6 de la mañana hasta aproximadamente las 11 y media de la mañana. Por la tarde nuevamente se tiene un día soleado, pero con alta nubosidad.

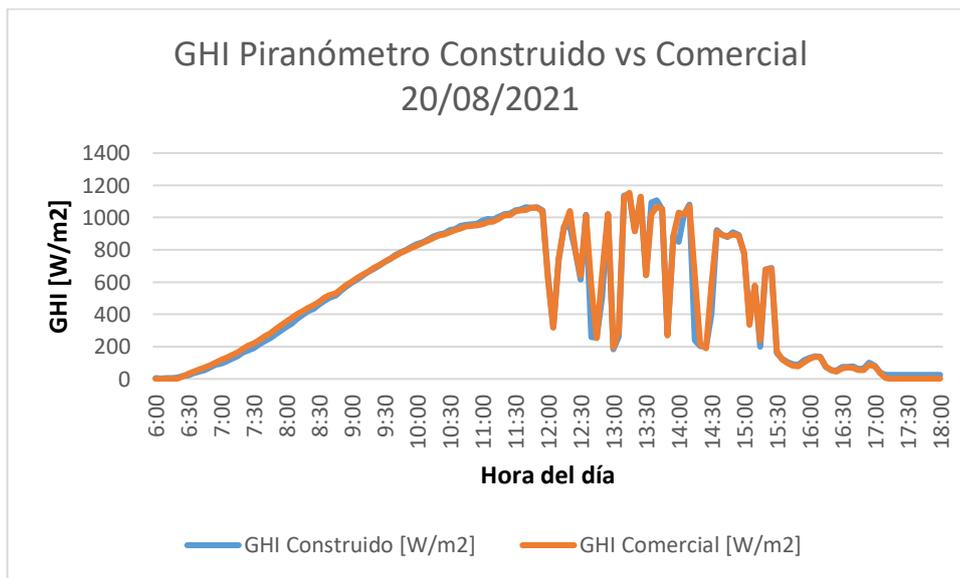


Figura 3.9 Mediciones de GHI del piranómetro construido y el piranómetro comercial el 20 de agosto de 2021.

En la figura 3.10 se observa las mediciones de ambos piranómetros, en un día soleado, pero con alta nubosidad durante todo el día.

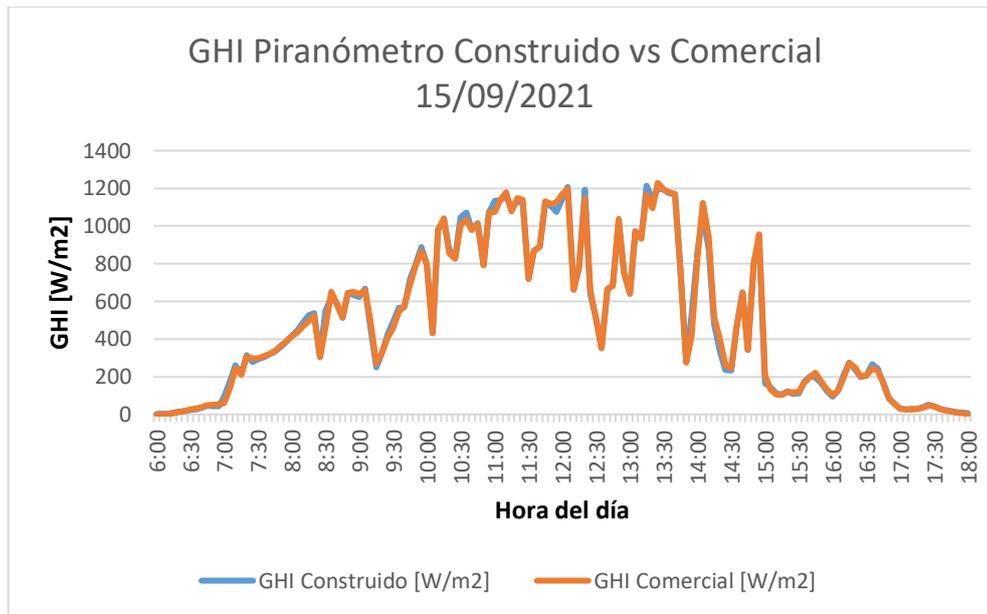


Figura 3.10 Mediciones de GHI del piranómetro construido y el piranómetro comercial el 15 de septiembre de 2021.

En la figura 3.11 se muestran las mediciones de ambos piranómetros en un día despejado hasta aproximadamente medio día, y con ligera lluvia a partir de las 15h30.



Figura 3.11 Mediciones de GHI del piranómetro construido y el piranómetro comercial el 14 de septiembre de 2021.

No se obtuvieron datos de un día totalmente despejado, ya que en la época del año donde se realizaron las mediciones de validación, se tuvo días nublados, con lluvia, y días

soleados, pero con gran cantidad de nubes. Hubo días despejados, pero en la mañana; generalmente en la tarde el día se encontraba nublado.

3.3.2 POSICIÓN SOLAR

Como ya se mencionó en el anterior capítulo, la validación del algoritmo implementado para hallar la posición solar de nuestro dispositivo, se lo hará al comparar sus resultados con los de la biblioteca Píolar.

Los datos de la posición solar que incluye los ángulos cenitales solar, acimutal solar y elevación solar del algoritmo implementado y de la biblioteca “Píolar”, fueron registrados cada 5 minutos en nuestra base de datos. Para luego compararlos y determinar la validez de nuestro algoritmo.

Para ello se tomaron en cuenta los mismos días que se usaron para la validación del componente global es decir del 11 de septiembre hasta el 19 de septiembre de 2021 con el dispositivo ubicado en la latitud -78.4896° y en la longitud -0.2097° . Los datos de uno de estos días se pueden observar en el ANEXO V.

En la tabla 3.4 se muestra el promedio del error obtenido y la desviación estándar de cada día, para poder establecer la dispersión de los valores de posición solar de nuestro algoritmo respecto a los de la biblioteca Píolar.

Tabla 3.4 Días utilizados para la validación del algoritmo desarrollado para encontrar la posición solar.

Fecha	%Promedio del Error Acimut	Desviación Estándar Acimut	%Promedio del Error Elevación	Desviación Estándar Elevación
11 de septiembre de 2021	0.0993	0.9957	0.3403	0.8610
12 de septiembre de 2021	0.0196	0.0840	0.3560	1.0773
13 de septiembre de 2021	0.0108	0.0337	0.3531	1.0425
14 de septiembre de 2021	0.01687	0.0895	0.3072	1.0326
15 de septiembre de 2021	0.0172	0.0973	0.3158	0.9449

16 de septiembre de 2021	0.01761	0.1038	0.3243	0.9061
17 de septiembre de 2021	0.0187	0.1186	0.3134	0.7760
18 de septiembre de 2021	0.0195	0.1309	0.3495	0.9518
19 de septiembre de 2021	0.0207	0.1496	0.3169	0.8378
PROMEDIO	0.0267	0.2003	0.3307	0.9377

De la tabla 3.4 se deduce que el error promedio del ángulo acimutal respecto de los valores que entrega la biblioteca es del 0.0267% y con una desviación estándar del 0.2003%. Por lo tanto, el error promedio podría desviarse +- 0.2003%, dando un rango del error máximo de 0.227%.

El error promedio del ángulo de elevación respecto de los valores que entrega la biblioteca es del 0.3307% y con una desviación estándar del 0.9377%. Por lo tanto, el error promedio podría desviarse +- 0.3307%, dando un rango del error máximo de 1.2684%.

Debido a que el ángulo cenital es el complemento del ángulo de elevación se deduce que el error máximo del ángulo de elevación que entrega el algoritmo será del 1.2684%.

3.3.3 COMPONENTE DIRECTO Y DIFUSO

Para validar el componente difuso es necesario validar el algoritmo de corrección que se mencionó en el capítulo 1, el cual consiste en hallar los valores de hombro o las máximas pendientes de la serie de datos que se obtienen cuando la banda de sombra cubre el difusor. Esto debido a que durante esta rotación se detecta aproximadamente DHI, sin embargo, la banda de sombra cubre una porción extra del cielo, por lo que el valor de DHI es en realidad menor que el valor real.

El valor "DHI real" se calcula al sumar al valor mínimo de la ráfaga de datos a la diferencia entre el GHI y el promedio de los valores de hombro. Ver ecuación 2.4.

Los datos de GHI se pueden muestrear y registrar cada segundo si se desea, pero debido a que la banda rota solo una vez cada minuto, los componentes GHI y DHI se pueden registrar cada minuto.

A continuación, se muestran algunas gráficas en donde se puede observar el comportamiento del algoritmo para hallar el valor mínimo de la ráfaga de datos, y sus respectivos valores de hombro.

En la figura 3.12 se puede observar el comportamiento del algoritmo para la corrección del componente difuso, en donde en línea blanca se observa el voltaje en milivoltios que entrega el piranómetro, en línea roja se observa el valor del hombro izquierdo, en línea naranja se observa el hombro derecho, y en línea verde se observa el valor mínimo de la ráfaga de datos que se generan al momento en que la sombra de banda cubre el difusor del piranómetro.

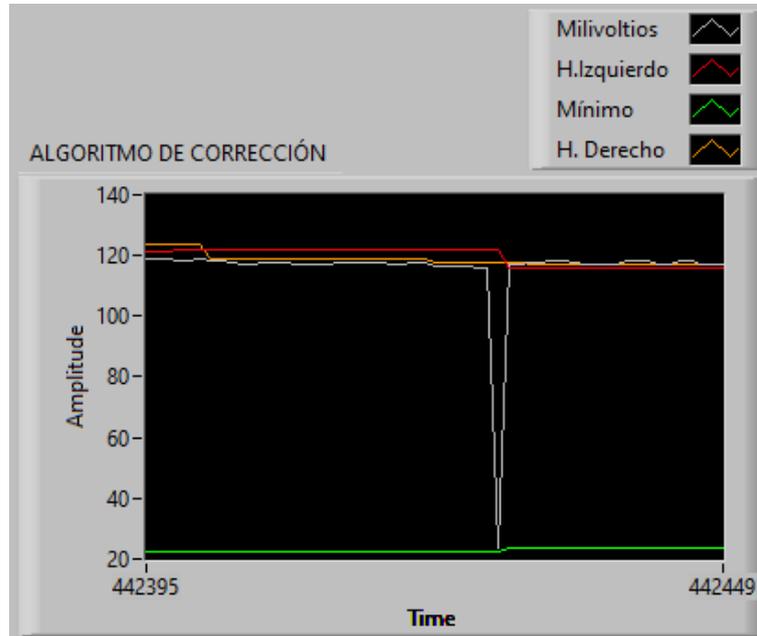


Figura 3.12 Comportamiento del algoritmo de corrección del componente difuso DHI.

Cabe recalcar que este algoritmo se lo realiza solo cuando la sombra de banda se encuentra girando, y esto ocurre solo una vez cada minuto, por lo que el componente difuso y el componente normal son calculados cada minuto. A diferencia del componente global que puede ser muestreado con mayor frecuencia, cada segundo, por ejemplo. En la figura 3.13 se puede observar claramente como se actualiza el valor mínimo (línea verde), de la rotación anterior de la banda que tiene un valor aproximado de 25 [mV] a un valor de 80 [mV] después de la rotación final. Lo mismo ocurre con los valores de hombro.

Este cambio generalmente se presenta cuando aparece repentinamente una nube, haciendo cambiar el componente difuso de un valor bajo, a un valor alto, muy cercano al componente global

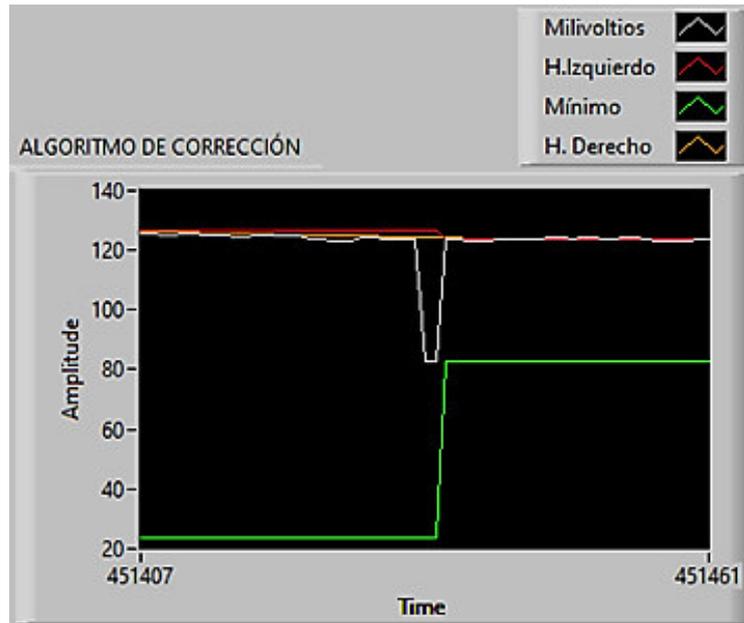


Figura 3.13 Comportamiento del algoritmo de corrección del componente difuso DHI, en un cambio repentino producido por una nube.

En la figura 3.14 se observa en amarillo el voltaje sin filtrar que entrega el piranómetro y en verde se observa el voltaje filtrado. Se puede observar que el algoritmo para filtrar la señal mejora en gran medida la señal que entrega el piranómetro, reduciendo el ruido de manera significativa.

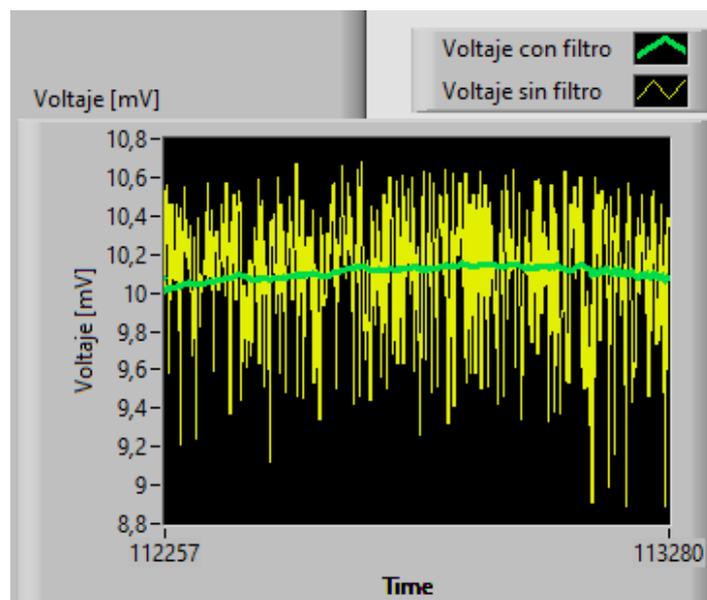


Figura 3.14 Comportamiento del filtro programado para mejorar la señal que llega del piranómetro

El problema que presenta este filtro es que nos genera un retardo, lo cual es contraproducente para esta aplicación. Especialmente, al momento de hallar los valores para la corrección del DHI, debido a que este retardo no permitía hallar el valor mínimo real de la ráfaga de valores. Esto se puede observar fácilmente en la imagen 3.15 en donde se observa el retardo que presenta la señal filtrada. Además, al mirar la señal sin filtro (amarilla) se observan e las caídas de voltaje que se presentan cuando la banda ha cubierto el difusor. Deduciendo para esta gráfica que la banda ha dado tres rotaciones presentando un valor mínimo aproximado de 58 [mV].

Ahora, si nos fijamos en la señal filtrada (verde), se observa que cuando la banda cubre el difusor, a penas se observa una variación en el voltaje, esto es debido al retardo. El valor mínimo sería aproximadamente 148 [mV]. Lo cual no está ni cerca del valor mínimo real.

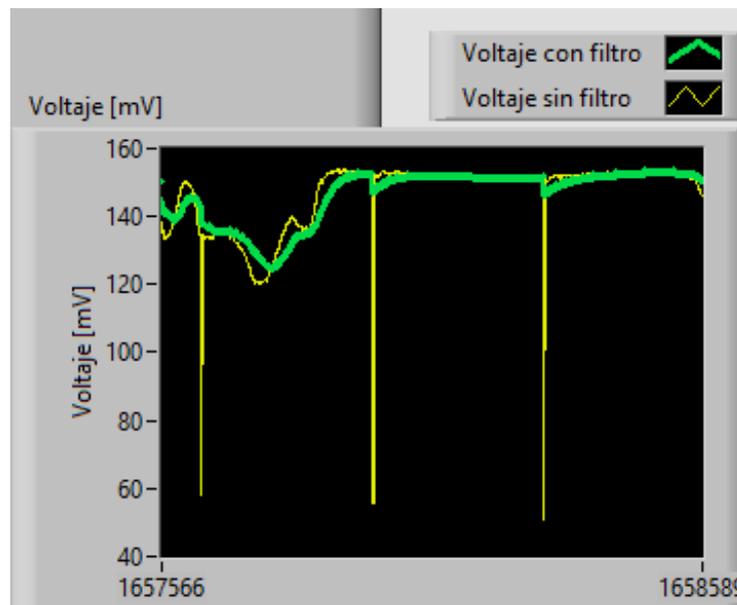


Figura 3.15 Comparación del valor mínimo de la señal filtrada (verde) y de la señal sin filtrar (amarilla).

Por lo tanto se decidió utilizar la señal filtrada únicamente para el cálculo del componente global GHI, y se usa la señal no filtrada solo para calcular el componente difuso DHI y su respectiva corrección.

En la figura 3.16 se observa el voltaje de corrección que se le añade al voltaje mínimo. Este voltaje corregido es el que se usa finalmente para hallar el componente difuso “real” DHI.

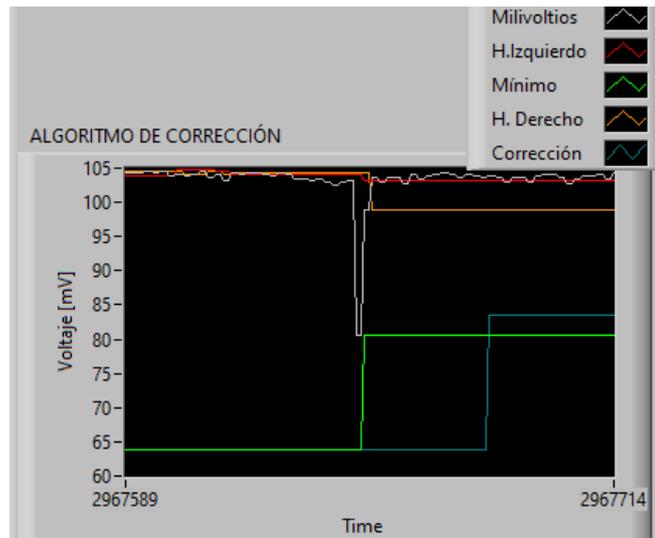


Figura 3.16 Voltaje de corrección del componente difuso DHI (línea azul).

Las figuras anteriores se muestran valores en milivoltios, por lo que hace falta multiplicarlos por el factor de calibración, para obtener valores de irradiancia. En la figura 3.17 se observa finalmente los valores del componente global GHI en línea verde, el componente difuso DHI en línea celeste y el componente normal DNI en línea roja.

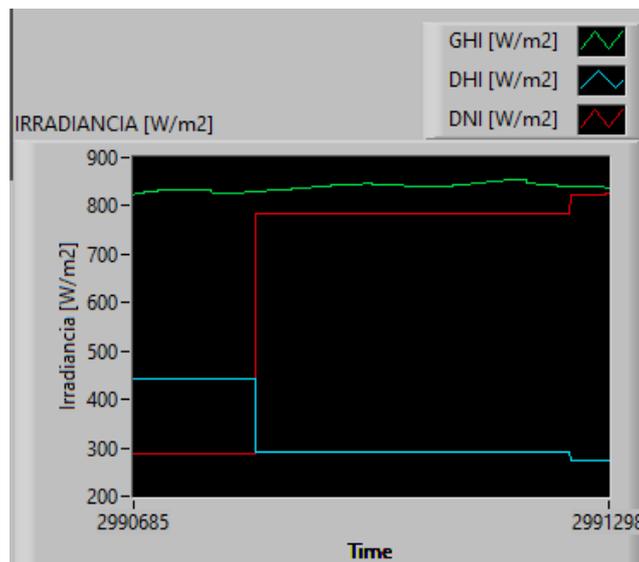


Figura 3.17 Medidas de irradiancia GHI, DHI, DNI obtenidas por el dispositivo construido en este trabajo.

Se puede observar que la medición del componente global GHI se lo realiza de manera continua, mientras que el componente difuso DHI y normal DNI solo se actualiza cada que vez que la banda da una revolución, es decir cada minuto.

Los algoritmos que se han implementado han dado buenos resultados y se han hecho pruebas durante varios días. Para poder validar los resultados del componente difuso DHI, cabe recalcar que depende básicamente de tener bien calibrado el componente global GHI, cosa que ya se ha hecho anteriormente y que el algoritmo de corrección funcione adecuadamente. Ambos puntos se ha demostrado que funcionan, por lo que se puede concluir que el DHI da un valor aproximado al real.

De igual manera sucede con el componente normal DNI que está relacionado directamente con el GHI, DHI y el ángulo cenital solar. Medidas que ya han sido validadas previamente. Concluyendo así que el DNI que entrega nuestro equipo, será aproximado al valor real.

A continuación se muestran algunos gráficos en donde se observan las mediciones de un día completo de cada uno de los componentes de irradiancia.

En la figura 3.18 se muestran las mediciones de irradiancia obtenidas el día 6 de octubre de 2021, en donde se observa la curva naranja DHI tiene prácticamente la misma forma que la curva azul GHI, esto ocurre cuando el componente DNI es prácticamente cero durante todo el día, debido a que se tuvo un día totalmente nublado.

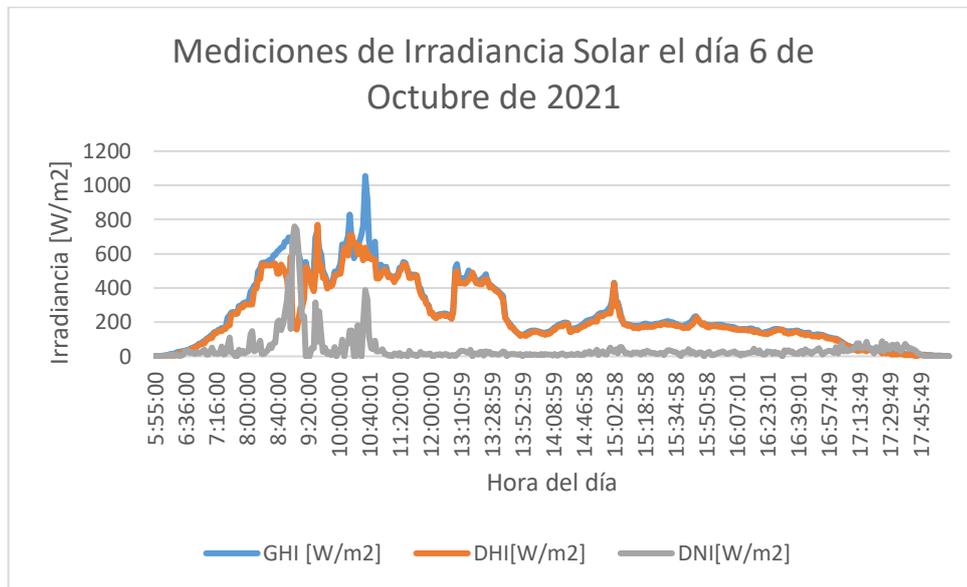


Figura 3.18 Mediciones de Irradiancia obtenidas por el dispositivo RSR el día 6 de octubre de 2021

En la figura 3.19 se muestran las mediciones de irradiancia obtenidas el día 24 de septiembre de 2021, en donde se observa en línea azul el componente GHI es mayor al resto, esto sucedió en un día en donde hubo un día soleado pero con gran nubosidad y por tanto varios cambios en la irradiancia.

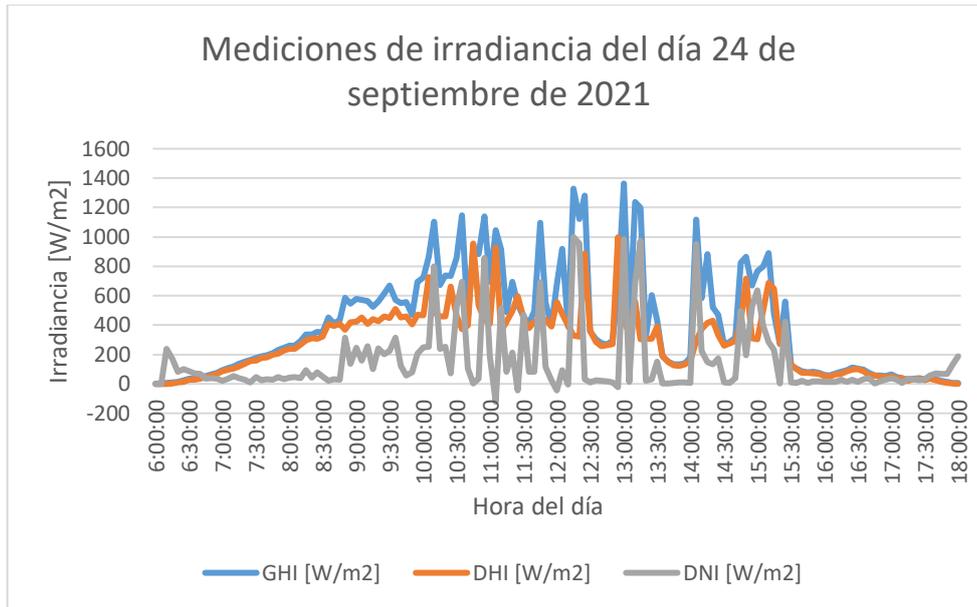


Figura 3.19 Mediciones de Irradiancia obtenidas por el dispositivo RSR el día 24 de septiembre de 2021

En la figura 3.20 se muestran las mediciones de irradiancia obtenidas el día 2 de octubre de 2021, en donde se observa un día despejado hasta aproximadamente las 10:30 de la mañana, se puede observar la línea gris DNI, es mayor incluso que la línea celeste GHI, en la tarde se observa que se presentó más nubosidad y por tanto la línea naranja DHI se asemeja más al componente GHI.

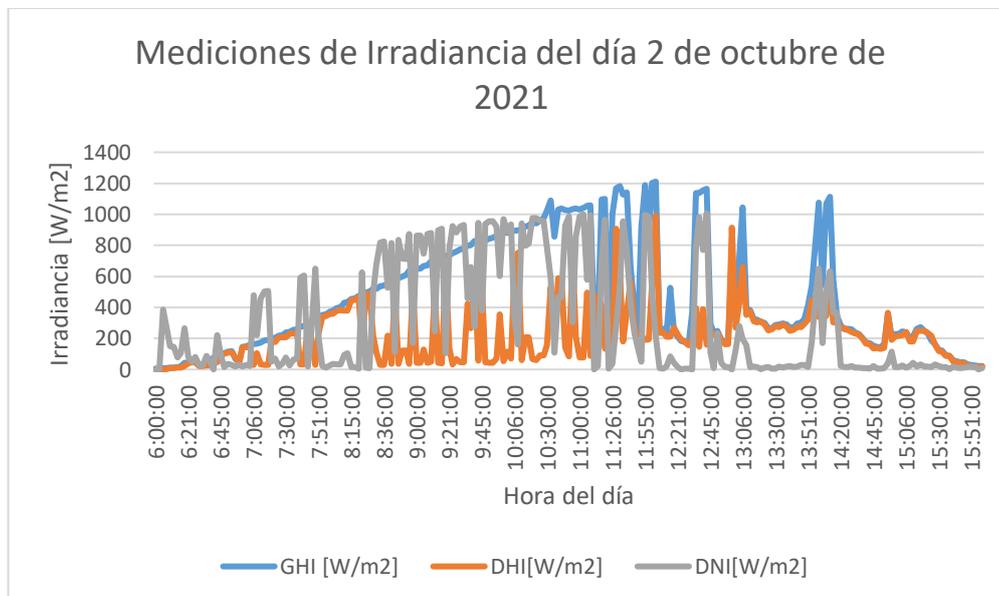


Figura 3.20 Mediciones de Irradiancia obtenidas por el dispositivo RSR el día 6 de octubre de 2021

3.3.4 REGISTRO Y VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS

Como ya se mencionó anteriormente el registro de datos se lo realizó usando un servidor web remoto que almacena sus datos en una base de datos MySQL, para luego mostrar estos datos en una página Web. En esta base de datos llamada “irradiancia” (figura 3.21) se almacenó la fecha, la hora, el ángulo cenital solar, el acimut solar, la elevación solar (tanto de la librería y del algoritmo desarrollado), la latitud y la longitud de donde se encuentra ubicado nuestro dispositivo, y los tres componentes de irradiancia (GHI, DHI y DNI).



Mostrando filas 30075 - 30099 (total de 30226, La consulta tardó 0.0373 segundos.)

```
SELECT * FROM `irradiancia`
```

Perfilando [Editar en línea] [Editar] [Explicar SQL] [Crear código PHP] [Actualizar]

<< < 1204 > >> | Número de filas: 25 | Filtrar filas: Buscar en esta tabla | Ordenar según la clave: Ninguna

+ Opciones		id	date	voltaje	cenit	cenitT	zenith	zenithT	altitud	altitudT	latitud	longitud	GHI	DHI	DNI
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	45875	27/09/2021 15:06:00	86.1	45.3363	45.3337	267.454	272.55	44.6637	44.6663	-0.2097	-78.4896	787.4	595.7	126
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	45876	27/09/2021 15:10:00	81.1	46.3361	46.3371	267.492	272.512	43.6639	43.6629	-0.2097	-78.4896	741.7	444.1	286.2
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	45877	27/09/2021 15:15:00	32.8	47.5843	47.5864	267.536	272.467	42.4157	42.4136	-0.2098	-78.4895	299.5	193.9	215
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	45878	27/09/2021 15:16:00	21.3	47.8333	47.8319	267.544	272.459	42.1667	42.1681	-0.2096	-78.4896	194.5	190.7	7.3

Figura 3.21 Base de datos creada para almacenar las variables importantes de este trabajo.

Para poder descargar estos datos, es necesario ingresar al servicio de hosting que escogimos para este trabajo, desde donde se puede acceder a la base de datos. Para ello se necesita el usuario y la contraseña Hostinger creados para este trabajo. Al pulsar exportar (ver figura 3.21) se puede descargar los datos que se necesite para el análisis.

Se combinó código Python, PHP, MySQL, para crear una tabla HTML que da como resultado el interfaz que se muestra en la figura 3.22, esta página puede ser visitada al acceder a la siguiente dirección <https://www.danneseqn.com/>, que básicamente muestra todos los valores que se almacenaron en la base de datos, a cualquier hora y desde cualquier lugar donde haya disponible internet

IRRADIANCIA 2021 EPN

ID	Fecha y hora (d/m/a)	Voltaje [mV]	Cenit Solar Librería	Cenit Solar Algoritmo	Azimuth Solar Librería	Azimuth Solar Algoritmo	Altitud Solar Librería	Altitud Solar Algoritmo	Latitud	Longitud	GHI [W/m ²]	DHI [W/m ²]	DNI [W/m ²]
45652	24/09/2021 14:55:00	73.4	42.3095	42.3092	269.06	270.943	47.6905	47.6908	-0.2097	-78.4896	670.7	309.9	523.6
45651	24/09/2021 14:51:00	93.5	41.3098	41.3049	269.047	270.956	48.6902	48.6951	-0.2097	-78.4896	855	650.3	274.8
45650	24/09/2021 14:50:00	94.5	41.0603	41.0591	269.044	270.96	48.9397	48.9409	-0.2096	-78.4896	863.8	715.9	195.3
45649	24/09/2021 14:46:00	103.6	40.0596	40.0547	269.029	270.974	49.9404	49.9453	-0.2097	-78.4896	946.9	421	497.1
45648	24/09/2021 14:45:00	90.4	39.8105	39.8089	269.026	270.978	50.1895	50.1911	-0.2097	-78.4896	826.5	421	495.3
45647	24/09/2021 14:40:00	34.4	38.5609	38.5588	269.006	270.997	51.4391	51.4412	-0.2097	-78.4896	314.9	291.8	40.2
45646	24/09/2021 14:36:00	32.2	37.5606	37.5546	268.989	271.015	52.4394	52.4454	-0.2096	-78.4895	294.7	275.7	17.9
45645	24/09/2021 14:35:00	31.1	37.3112	37.3087	268.985	271.019	52.6888	52.6913	-0.2096	-78.4896	284.3	274.1	7.3
45644	24/09/2021 14:31:00	28.7	36.3112	36.3044	268.966	271.038	53.6888	53.6956	-0.2097	-78.4896	262.5	260.1	3.7
45643	24/09/2021 14:30:00	29	36.0616	36.0586	268.961	271.042	53.9384	53.9414	-0.2096	-78.4895	265.5	260.1	11.6

Figura 3.22 Interfaz gráfico creado para el monitoreo de irradiancia, en una página Web de fácil acceso.

Para poder observar las variables importantes en in interfaz más dinámico y gráfico se desarrolló un Interfaz Hombre Máquina (HMI) en Labview). Después de realizar una lógica de programación gráfica se obtuvieron los siguientes resultados. En la figura 3.23 se detallan todos los componentes que conforman este interfaz.

Para facilidad de explicación se lo ha dividido en 7 bloques. (Ver figura 3.23).

El bloque 1 se tiene una breve presentación del proyecto. En el bloque 2 es donde se ingresa la dirección IP que tiene asignada la tarjeta Raspberry Pi 3B+, y el puerto 9999 que hemos asignado por defecto en la programación. Si se usa Remote it, se escribe la dirección IP y el puerto que asigna la misma aplicación.

En el bloque 3 se puede observar cómo funciona el algoritmo de corrección, esto resultó de mucha ayuda al momento de la programación del mismo y para poder dar validez al mismo. En este bloque se observa el voltaje sin filtrar, para poder observar cómo varía el voltaje cuando la banda cubre el difusor, además se puede observar los valores de hombro derecho e izquierdo, el valor mínimo de la ráfaga de barrido y la corrección necesaria para calcular bien el DHI.

En el bloque 4 se observan los tres componentes de irradiancia en [W/m²]. Este en realidad es el producto final de este trabajo, en donde se puede observar el comportamiento del GHI, DHI, y DNI.

En el bloque 5 se muestra todo lo relacionado con la posición solar, se muestra la longitud y latitud donde se encuentra el dispositivo, el ángulo cenital solar, el acimut solar, y la elevación solar respecto de este.

En el bloque 6 tenemos los valores de voltaje filtrado por software y del voltaje sin filtrar, esto para poder observar el comportamiento del filtro y poder validar su funcionamiento.

Y finalmente el bloque 7 es el que nos permite detener la aplicación, deteniendo así cualquier proceso que se esté haciendo, incluso dejará de moverse la sombra de banda y se dejará de almacenar datos en la base de datos.

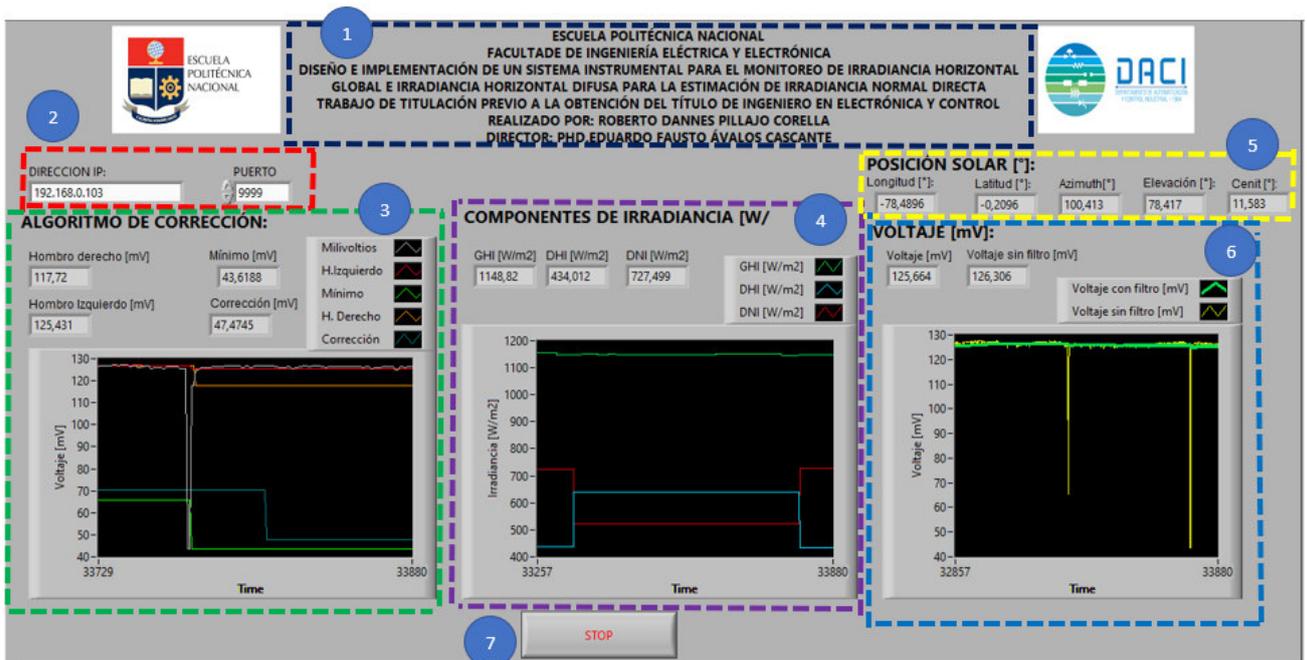


Figura 3.23 Interfaz Hombre Máquina (HMI) creado en Labview para el monitoreo de la irradiancia solar.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- En el presente proyecto de titulación se implementó un sistema tipo RSR (Rotating Shadowband Radiometer), el cual consta de un piranómetro basado en un fotodiodo, un sistema electrónico para la adquisición y visualización de los datos, y una estructura mecánica para obtener la mejor respuesta de cada uno de los componentes. A través de esta implementación, se adquirió una señal eléctrica del

piranómetro que posteriormente fue tratada y procesada electrónicamente, para mediante calibración obtener valores de irradiancia.

- La técnica de la banda de sombra giratoria solo tiene un grado de libertad mecánica por lo que es operativamente mucho más confiable al momento de cubrir el sol que con un seguidor solar de dos ejes. Esta confiabilidad de apuntamiento solar finalmente da como resultado datos que serán estadísticamente más precisos que los datos tomados por las configuraciones tradicionales de rastreadores. Los rastreadores suelen encontrar periódicamente errores aleatorios debido a la desalineación solar causada por el viento, hielo y escombros.
- Se instaló y configuró el sistema RSR, en el campus de la Escuela Politécnica Nacional, que es capaz de entregar datos de posición solar, Irradiancia Horizontal Global (GHI), Irradiancia Horizontal Difusa (DHI) e Irradiancia Normal Directa (DNI). Estas mediciones pueden ser adquiridas en tiempo real y pueden ser almacenadas en una base de datos creada especialmente para este proyecto.
- Después de realizar una revisión bibliográfica se escogió como sensor principal de todo el sistema, una celda solar basada en un fotodiodo. Debido a que este tipo de sistemas necesitan de una respuesta rápida del rango de los microsegundos, ya que, durante la rotación de la banda, se necesita tomar la mayor cantidad de datos para estimar de manera correcta el componente difuso DHI.
- Se desarrolló e implementó un algoritmo de control de rotación continua, que acciona un motor a pasos que a su vez mueve una sombra de banda que cubre por un breve momento el piranómetro, generando así una caída de voltaje y una ráfaga de datos, con las que se puede estimar el componente difuso (DHI).
- Se implementó un algoritmo de análisis de curvas para hallar el valor mínimo de la ráfaga de datos, y los valores de hombros para poder realizar la corrección del componente difuso (DHI).
- Se desarrolló e implementó un algoritmo para hallar la posición relativa del sol, que devuelve los valores del ángulo cenital solar, el ángulo de elevación solar, y el ángulo acimutal solar. Valores que son de mucha importancia para el cálculo del componente normal directo (DNI).
- Se implementó un piranómetro que básicamente consta de una estructura para proteger al fotodiodo, un conector para facilitar la adquisición de la señal del fotodiodo, y un difusor de teflón para mejorar la respuesta angular del piranómetro.
- El sistema mecánico implementado en este proyecto es liviano, compacto y de fácil montaje. Consta de una sombra de banda, un ajuste de latitud del motor, el soporte

del motor, un soporte para colocar el piranómetro, y un soporte general para todos estos componentes y ha presentado un buen desempeño en distintas condiciones climáticas, mostrándose lo suficiente robusto para soportar días soleados, nublados, e incluso días lluviosos.

- El sistema electrónico consta de un sistema de adquisición y tratamiento de datos que es comandado por la tarjeta embebida Arduino Nano, y un sistema de registro y visualización de datos que es comandado por la tarjeta embebida Raspberry Pi 3B+ que actúa como un datalogger.
- Haciendo uso de un servicio de hosting se creó una base de datos, en donde guardamos las variables más importantes de este trabajo, y usando programación en Python3, php y html se logra mostrar estos datos en una página Web, estos datos pueden ser visualizados desde cualquier lugar donde se tenga acceso a internet.
- Los valores de irradiancia almacenados en la base de datos pueden ser descargados para su análisis directamente desde el servicio de hosting, descargando el archivo .csv que puede ser fácilmente convertido en un archivo .xls (Excel), para analizar el comportamiento de la irradiancia durante todo el día.
- Se desarrolló un interfaz hombre máquina (HMI) para poder monitorear en tiempo real el comportamiento de todos los componentes de irradiancia, la conexión es inalámbrica mediante una conexión TCP-IP.
- Se realizó la calibración del piranómetro construido, al ubicarlo a una distancia de 15 metros de un piranómetro comercial Nippon Electric disponible en la Escuela Politécnica Nacional y comparar las mediciones de ambos piranómetros. Se tomaron varias series de datos durante varios días para obtener el factor de calibración que mejor se ajustaba a las condiciones climáticas de cada día, el factor final se obtuvo al sacar un promedio de los factores de calibración de todos los días.
- La validación de sistema RSR construido, se basa en la validación del componente global (GHI), al comparar las mediciones del piranómetro comercial y el piranómetro construido durante varios días, presentando un error medio de 3.48 % con una desviación estándar de 3.64%, dando un error máximo de 7.12 %.
- La validación del algoritmo para hallar la posición solar, se lo realizó al comparar las mediciones del algoritmo implementado y los de la librería Píolar desarrollada

en python3. Obteniendo un error máximo para el ángulo acimutal solar de 0.227% y un error máximo para la elevación solar y para el ángulo cenital solar del 1.1684%.

- Finalmente, la validación del componente difuso DHI, se lo realizó al observar el correcto funcionamiento de los algoritmos de análisis de curvas, ya que de esto depende su correcto cálculo.
- Una vez validado el GHI, DHI y el ángulo cenital solar, se puede concluir que el componente normal (DNI) también es válido, esto debido a que el cálculo de este, está en función de estos tres factores.

4.2 RECOMENDACIONES

- Ubicar el dispositivo RSR de manera horizontal, resulta de mucha importancia debido a que esto puede provocar mediciones erróneas, generando un error mayor al esperado.
- Colocar el soporte del motor sobre el ajuste de latitud a un ángulo cercano a la latitud geográfica a la que se encuentra el dispositivo, y ajustar el mismo de tal manera que el eje de rotación del motor, esté alineado con el difusor del piranómetro, esto garantiza que el eje del motor este paralelo al eje de rotación de la tierra.
- Si se cumple el punto anterior, y el soporte general del dispositivo se encuentra orientado en posición de norte a sur, se garantiza que la sombra de banda cubra al sensor del piranómetro, durante todos los días del año, sin necesidad de ajustarlo manualmente.
- Se recomienda alimentar con fuentes diferentes el motor y Arduino, esto debido a que durante de la rotación del motor, se generaba ruido extra en las lecturas de voltaje.
- Se recomienda, ajustar el potenciómetro del driver de motor a pasos A4988, para limitar la corriente máxima, para esta aplicación se ha limitado a un voltaje de 1.2V que da una corriente máxima de 1.5 A. Es importante usar su disipador de calor.

4.3 TRABAJOS FUTUROS

- Para futuros trabajos se recomienda, utilizar electrónica adicional para alimentar el sistema RSR de manera autónoma, es decir usando un panel solar, con una batería y un controlador de carga, que proporcionen la energía suficiente para alimentarlo.

- Debido a que es un sistema pensado para funcionar en lugares remotos, se podría utilizar un módulo GSM para poder enviar los datos vía mensaje hacia una base de datos, de esta manera ya no es un sistema dependiente de internet.
- En este trabajo se desarrolló el algoritmo de rotación continua, en un futuro trabajo se podría intentar implementar el algoritmo de rotación discontinua que no toma una ráfaga de datos durante la rotación, sino solo tres puntos, para poder estimar el componente difuso. (ver capítulo 2).
- Implementar una página Web en donde se pueda descargar directamente los datos que se necesiten, sin necesidad de ingresar a la base de datos para descargarlos.
- Se podría construir un sistema RSR parecido, pero usando un piranómetro comercial basado en un fotodiodo. Lo que implicaría implementar una nueva estructura mecánica del tipo RSR para las dimensiones del nuevo piranómetro.
- Esto, para poder enfocarnos más en los algoritmos de corrección del componente difuso sin presentar demasiado error en el componente global.
- Agregar sensores para poder aplicar algoritmos de corrección más complejos que incluyen medición de temperatura, humedad, altitud, masa de aire, entre otros. Hay una amplia línea de investigación en este aspecto.
- Usar un sensor de punto luminoso para apoyar al algoritmo de seguimiento solar, ya que esto tienen los sistemas comerciales. Esto es debido a que se obtiene un sistema con referencia de posicionamiento redundante.
- Para la conversión de la señal del piranómetro de corriente a voltaje, además de usar una resistencia como se lo hizo en este trabajo, se podría usar un acoplador de impedancia que hace exactamente el mismo trabajo y podría ayudar a reducir el ruido.
- Hacer una calibración a los componentes DHI y DNI, usando un equipo comercial que entregue este tipo de mediciones, para poder corroborar las mediciones de este equipo.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] R.Jácome Sánchez, I.Suárez Arias, «Desarrollo e implementación del controlador de un seguidor solar de un eje con estrategias de posicionamiento para paneles fotovoltaicos en la ciudad de Quito,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2015.
- [2] SENPLADES, «Plan Nacional para el Buen Vivir. Cambio de la Matriz Energética,» Julio 2013. [En línea]. Available: <http://plan.senplades.gob.ec/estrategia7..>
- [3] Orellana J.G, Orellana Samaniego M.L, «Estimacion de la Radiacion Solar Cantón Cuenca Mediante la Aplicacion del Modelo Bristow y CampBell,» Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca-Ecuador, 2015.

- [4] Sandra Arla Odio, Melto Tapia Zurita, José Guasumba Codena, «Validación del Recurso Solar en el Ecuador para Aplicaciones de Media y Alta Temperatura,» Universidad de las Fuerzas Armadas, Quito, 2017.
- [5] D.Vaca Revelo, F Ordoñez, «Mapa Solar del Ecuador 2019,» Quito, SCINERGY, 2019, pp. 4,5.
- [6] J.Suntaxi, «Caracterizacion energetica del sistema hidroconvencion de la luz solar,» Universidad de las Fuerzas Armadas Espe,, Quito-Ecuador, 2014.
- [7] F.Vignola, J.Michalsky, T.Stoffel, Solar and Infrared Radiation Measurments, Florida: Tylor & Francis Group, 2020.
- [8] C. N. d. Electricidad, «Atlas Solar del Ecuador,» Corporación para la Investigación Energética, Quito, 2008.
- [9] Cevallos Sierra, Ramos Martín, «J. Spatial assessment of the potential of renewable energy: The case of Ecuador.,» Renewable and Sustainable Energy Reviews, Quito, 2018.
- [10] Wilko Jessen, Stefan Wilbert, Luis Zaralejo Tirado, Lourdes Ramirez, Rita Valenzuela, José Liria, Bijan Nouri, Natalie Harrider, «Calibration Procedures for Rotating Shadowband,» SFERA II, 2016.
- [11] Sanchez Poma, Raúl Wilfredo, «Diseño y construcción de medidode de radiación con seguimiento solar y registrador de datos,» Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2018.
- [12] C.M.Alarcón Aguirre, C.D.López Estévez, «Desarrollo e implementación del controlador de un seguidor solar de un eje con estrategias de posicionamiento para paneles fotovoltaicos en la ciudad de Quito,» Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador, 2019.
- [13] M.Martinez, «SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN DE BAJO COSTE PARA LA MEDICIÓN DE IRRADIANCIA EN EL RANGO ESPECTRAL VISIBLE,» Universidad de Huelva, Huelva, 2015.
- [14] D.Pérez, «Procedimiento de Mantenimiento y Calibración de Estación Radiométrica,» Universidad de Sevilla, Sevilla , 2017.
- [15] S.Wilbert,N.Geuder, M.Schwandnt, B. Kraas. W. Jessen, R. Meyer, B.Nouri, «Best Practices for Solar Irradiance Measurements with Rotating Shadowband Irradiometers,» Solar Heating & Cooling Programme, 2015.
- [16] M.Sengupta, A.Habte, C.Gueymard, S.Wilbert, D. Renné, «Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Second Edition,» Solar Hearting & Cooling Programe, 2017.
- [17] J.Michalsky, J.Berndt, G.Schuster, «A Micropocessor Based Rotating Shadowband Radiometer,» Pacific Northwest Laboratory, Washington, 1986.

- [18] J. Michalsky, «The Astronomical Almanac's Algorithm for Approximate solar position (1950-2050),» Atmospheric Sciences Research, New York, 1988.
- [19] D.Rodríguez, «Sistema robótico de seguimiento solar,» Universidad de Costa Rica, San José, 2016.
- [20] A. Photonix, «Digi-Key,» 17 05 2019. [En línea]. Available: <https://www.digikey.com/es/products/detail/advanced-photonix/PDB-C139/480579>. [Último acceso: 17 05 2021].
- [21] G.Galeano, de *Programación de SISTEMAS EMBEBIDOS en C*, Alfaomega, 2014, pp. 9-12.
- [22] B.Bakker, «Makerguides.com,» 19 05 2021. [En línea]. Available: <https://www.makerguides.com/arduino-nano/#arduino-nano-pinout>.
- [23] «All datasheet,» 25 jul 2019. [En línea]. Available: [https://electronilab.co/tienda/arduino-nano-v3-atmega328-5v-cable-usb/..](https://electronilab.co/tienda/arduino-nano-v3-atmega328-5v-cable-usb/) [Último acceso: 20 May 2021].
- [24] D.Brooks, «Measuring Sunlight at Earth's Surface: Build Your Own Pyranometer,» Institute for Earth Science Research and Education, 27 10 2020. [En línea]. Available: <https://instesre.org/construction/pyranometer/pyranometer.htm>. [Último acceso: 26 05 2021].
- [25] D.Brooks, «Monitoring Solar Radiation and Its Transmission Through the Atmosphere,» August 2006. [En línea]. Available: <https://instesre.com/papers/UsingTheSun/using.htm>. [Último acceso: 26 Mayo 2021].
- [26] T. INSTRUMENTS, «TEXAS INSTRUMENTS,» [En línea]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1118.pdf?ts=1623809588835&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FADS1118. [Último acceso: 2021 6 15].
- [27] E.López, «INGENIERÍA EN MICROCONTROLADORES,» de *Protocolo SPI (Serial Peripheral Interface)*, México Distrito Federal, 2016, pp. 1,2.
- [28] altronics, «altronics,» [En línea]. Available: <https://altronics.cl/sensor-magnetico-efecto-hall-ky024>. [Último acceso: 29 7 2021].
- [29] L. M. ENGINEERS, «Last Minute ENGINEERS,» [En línea]. Available: <https://lastminuteengineers.com/neo6m-gps-arduino-tutorial/>. [Último acceso: 1 6 2021].
- [30] Alciro, «Plotter Router Fresadora CNC,» 1 1 2007. [En línea]. Available: http://www.alciro.org/alciro/Plotter-Router-Fresadora-CNC_1/Motores-hibridos_158.htm. [Último acceso: 14 6 2021].
- [31] «DatasheetCafe,» 1 1 2016. [En línea]. Available: <http://j5d2v7d7.stackpathcdn.com/wp-content/uploads/2016/04/17HS4401-datasheet-pdf.gif>. [Último acceso: 2021 6 14].

- [32] A.Newton, «HOW TO ELECTRONICS,» 26 3 2021. [En línea]. Available: <https://how2electronics.com/control-stepper-motor-with-a4988-driver-arduino/>. [Último acceso: 15 6 2021].
- [33] V.García, «EPA ELECTRÓNICA PRÁCTICA APLICADA,» 5 3 2020. [En línea]. Available: <https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/descripcion-del-driver-a4988>. [Último acceso: 15 6 2021].
- [34] Alldatasheet, «Alldatasheet,» 16 4 2019. [En línea]. Available: <https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=A4988>. [Último acceso: 15 6 2021].
- [35] L.Rodríguez, «Kolwidi,» 27 5 2019. [En línea]. Available: <https://kolwidi.com/blogs/blog-kolwidi/comunicaciones-serie-en-arduino-uart-i2c-y-spi>. [Último acceso: 15 5 2021].
- [36] R.Estrada, «HETPRO HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS PROFESIONALES,» 7 4 2019. [En línea]. Available: <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/puerto-serial/>. [Último acceso: 15 6 2021].
- [37] Mendoza, «Raspberry Pi MANUAL DE USUARIO,» [En línea]. Available: <https://www.mendoza.edu.ar/wp-content/uploads/2019/11/MANUAL-DE-USUARIO-Kit-Raspberry-Secundaria-.pdf>. [Último acceso: 17 6 2021].
- [38] I.Souza, «rockcontet blog,» 14 7 2019. [En línea]. Available: <https://rockcontent.com/es/blog/que-es-un-servidor/>. [Último acceso: 18 6 2021].
- [39] TechRarget, «SearchDataCenter en Español,» 1 4 2021. [En línea]. Available: <https://searchdatacenter.techtarget.com/es/definicion/MySQL>. [Último acceso: 6 18 2021].
- [40] A.Martínez, «MANUAL PRÁCTICO DE HTML,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid-España, 1995.
- [41] aprendeaprogramar.com, «apr,» [En línea]. Available: https://www.aprenderaprogramar.com/index.php?option=com_content&view=article&id=492:ique-es-php-y-ipara-que-sirve-un-potente-lenguaje-de-programacion-para-crear-paginas-web-cu00803b&catid=70&Itemid=193. [Último acceso: 18 6 2021].
- [42] Gustavo.B, «HOSTINGER TUTORIALES,» 4 1 2021. [En línea]. Available: <https://www.hostinger.es/tutoriales/que-es-un-hosting>. [Último acceso: 18 6 2021].
- [43] E.Bonet, «informatica.uv.es,» [En línea]. Available: <http://informatica.uv.es/it3guia/AGR/apuntes/teoria/documentos/SSH.pdf>. [Último acceso: 21 6 2021].
- [44] G.Holguín,S.Pérez,A.Orozco, Curso Básico LabVIEW 6i, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2002.
- [45] R.Bird, R.Hulstrom, «A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces,» Solar Energy Research, Golden,Colorado, 1981.

- [46] B. Stafford, «Pisolar,» 2007. [En línea]. Available: <https://pysolar.readthedocs.io/en/latest/>. [Último acceso: 21 09 2021].
- [47] F.Ordóñez, J. López, D. Vaca, C. Tapia, «Scinergy Meteorología,» Escuela Politécnica Nacional, 01 01 2019. [En línea]. Available: <https://meteo-scinergy.epn.edu.ec/>. [Último acceso: 25 08 2021].
- [48] ISO, «Solar energy- Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer,» ISO, Switzerland, 1992.

6. ANEXOS

ANEXO I. Manual de Usuario.

ANEXO II. Piezas del sistema mecánico.

ANEXO III. Ejemplo de un día de calibración.

ANEXO IV. Validación del componente global.

ANEXO V. Validación de la posición solar.

ANEXO I

MANUAL DE USUARIO

I.1. CIRCUITO ELECTRÓNICO DE CONTROL

El sistema electrónico consta de la placa electrónica (figura), en la que están incluidos una tarjeta Arduino Nano, un módulo GPS Ublox NEO-6M, un módulo conversor análogo-digital ADS 1118, un driver para controlar un motor a pasos A4988, y un sensor magnético KY-024, además, se incluyeron conectores de alimentación para el motor, conectores de alimentación para el resto de componentes, borneras para la conexión de las bobinas del motor, borneras para la conexión del sensor magnético, borneras para la señal de corriente que llega del piranómetro. Dentro de esta placa se encuentra incluida la resistencia de carga, la que se encarga de convertir la señal de corriente en una señal de voltaje.

El conector serial de la placa Arduino es conectado directamente a un puerto USB de la tarjeta Raspberry Pi 3B+.

Esta placa ha sido diseñada para ser colocada en un tablero electrónico, junto a la tarjeta Raspberry, solo necesita dos fuentes de alimentación: una de 12 V a 2 A para el motor a pasos y una de 5V a 3A para Raspberry y el resto de componentes.

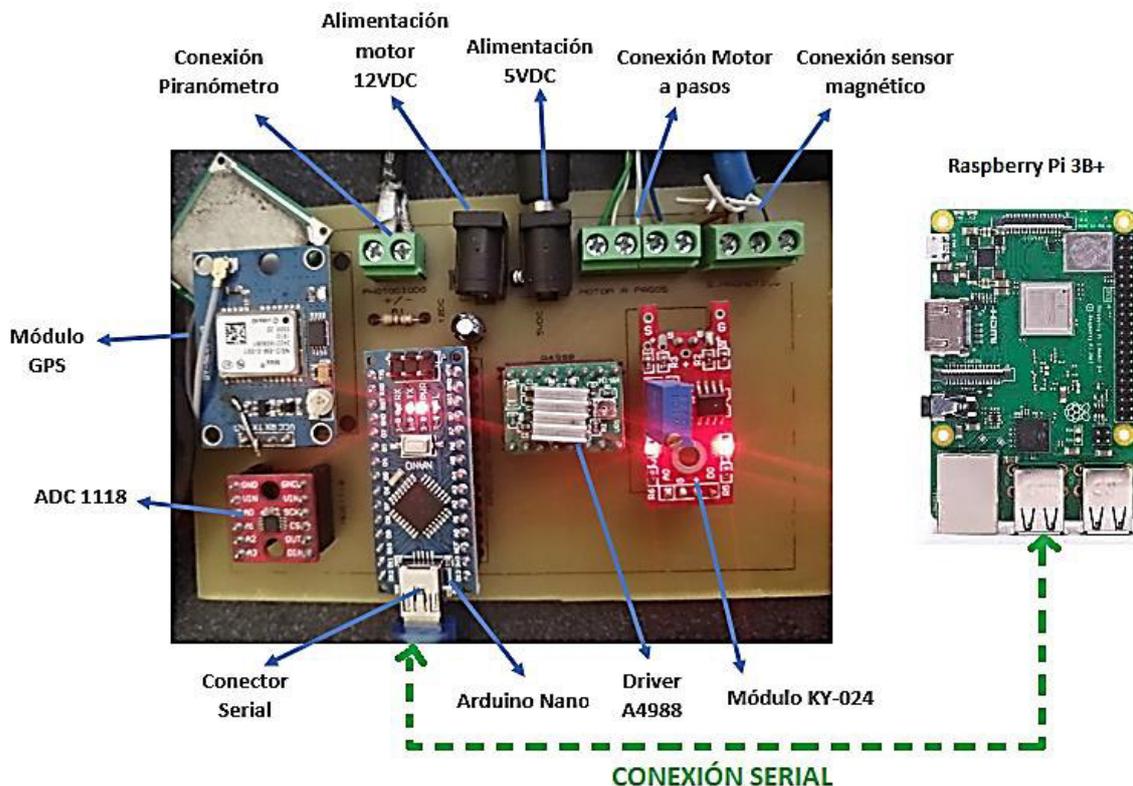


Figura I.1. Elementos constitutivos del circuito de control

I.2. INSTALACIÓN DEL HARDWARE:

Primero se debe ubicar el instrumento en un sitio adecuado. Idealmente, el sitio debe tener una vista sin obstáculos del horizonte. Un campo abierto o una azotea siempre es una buena opción. En áreas con posibles interferencias, es posible que se desee instalar el sistema en una plataforma elevada.

Montaje del piranómetro:

El piranómetro consta de las siguientes piezas.



Figura I.2. Partes constitutivas del piranómetro.

A continuación, se muestra el montaje de cada una de las piezas

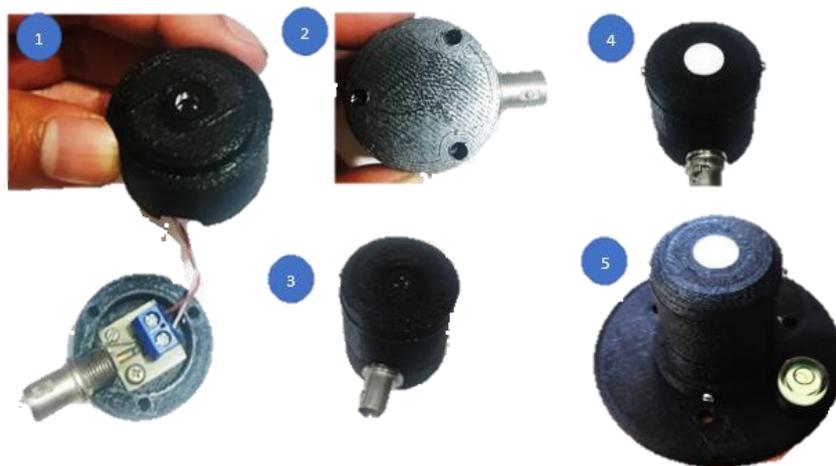


Figura I.3. Procedimiento del montaje del piranómetro

En la Tabla I.1. se comenta el procedimiento de montaje que hay que seguir.

Tabla I.1. Procedimiento de montaje del piranómetro. (ver figura 3.2)

Paso	Comentario
1	<ul style="list-style-type: none"> • Se coloca el fotodiodo a presión en el cuerpo superior del piranómetro • Se ajusta la placa electrónica del conector BNC al cuerpo inferior del piranómetro • Se conectan los terminales del fotodiodo a la bornera disponible.
2	<ul style="list-style-type: none"> • Se une mediante tornillos, el cuerpo superior con el inferior del piranómetro. Los tornillos ingresan desde la parte de abajo del cuerpo inferior del piranómetro
3	<ul style="list-style-type: none"> • Se coloca la tapa del piranómetro. Se ajusta mediante tornillos al cuerpo superior del piranómetro
4	<ul style="list-style-type: none"> • Se coloca el difusor en la tapa del piranómetro. (ingresa a presión)
5	<ul style="list-style-type: none"> • Se monta todo el piranómetro a la base de nivel. El piranómetro entra a presión y también es ajustado con tornillos.

Montaje del motor en la carcasa:

La carcasa del motor consta de dos partes, la carcasa superior donde se coloca el motor y el sensor magnético, y la carcasa inferior que se ajusta a la superior mediante tornillos para los componentes internos.



Figura I.3. Procedimiento del montaje del motor y el sensor magnético a la carcasa del motor

En la Tabla I.2. se comenta el procedimiento de montaje que hay que seguir.

Tabla I.2. Procedimiento de montaje del motor y el sensor magnético a la carcasa del motor. (ver figura I.3.)

Paso	Comentario
1	<ul style="list-style-type: none"> Insertar el motor a pasos en el espacio disponible en la carcasa, de igual manera el sensor magnético insertar en su orificio. Sacar los conectores por el orificio disponible en la carcasa.
2	<ul style="list-style-type: none"> Ajustar el motor a pasos, desde la parte frontal de la carcasa, usando los tornillos disponibles.
3	<ul style="list-style-type: none"> Acoplar la carcasa inferior a la superior, a presión.
4	<ul style="list-style-type: none"> Ajustar los tornillos disponibles para acoplar de manera fija la carcasa inferior con superior.

Montaje de la sombra de banda al eje del motor:

El orificio disponible en la sombra de banda, está diseñado para acoplarse a presión con el eje del motor. Para fijarlos de manera permanente hay dos tornillos disponibles para ajustar el eje del motor a la banda de sombra.

Para colocar el imán es necesario colocarlo con un poco de pegamento de silicona.



Figura I.4. Procedimiento para el montaje de la sombra de banda al eje del motor

Montaje de la estructura RSR:

El montaje de la estructura mecánica RSR es bastante intuitiva ya que solo se necesita de unos pocos tornillos para ajustar cada una de estas piezas.

En la figura I.5. se muestran todos los componentes de la estructura RSR:

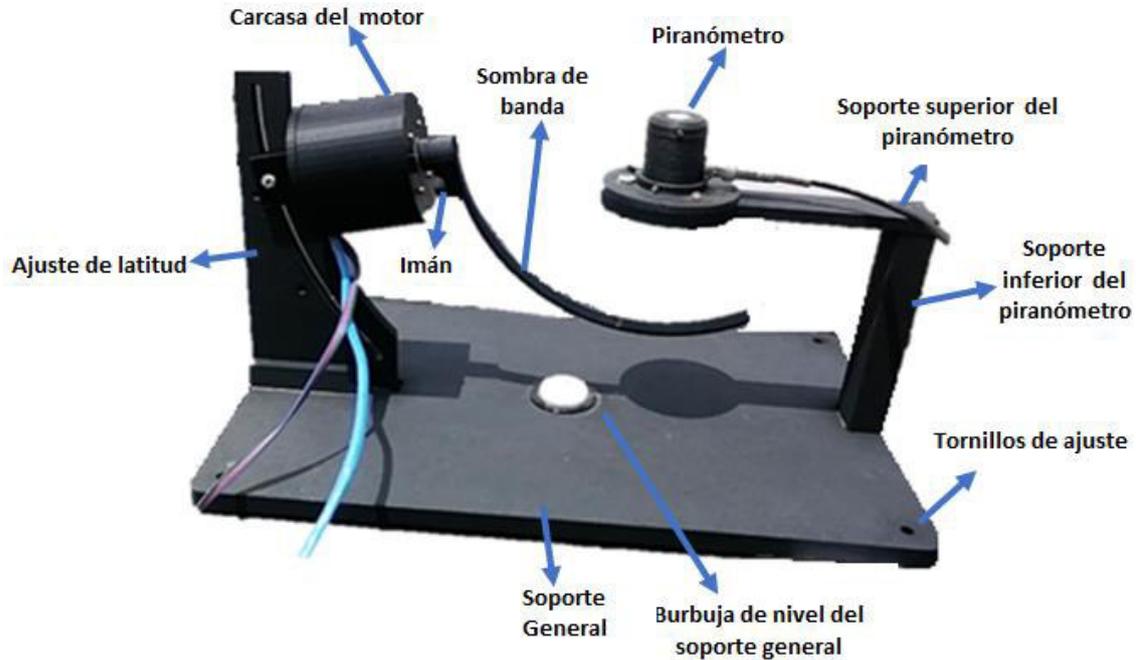


Figura I.5. Procedimiento para el montaje de la sombra de banda al eje del motor.

En la Tabla I.3. se comenta el procedimiento de montaje que hay que seguir.

Tabla I.3. Procedimiento de montaje de la estructura RSR

Paso	Comentario
1	<ul style="list-style-type: none"> Se acopla el piranómetro, al soporte superior del piranómetro, usando los tornillos disponibles
2	<ul style="list-style-type: none"> Se acopla el soporte superior del piranómetro, con el soporte inferior del piranómetro. Se atornilla desde la parte superior.
3	<ul style="list-style-type: none"> Se acopla tanto el ajuste de latitud como el soporte inferior del piranómetro, al soporte general. Se atornillan desde la parte inferior del soporte general.
4	<ul style="list-style-type: none"> Colocar la carcasa del motor sobre el ajuste de latitud a un ángulo cercano a la latitud geográfica a la que se encuentra el dispositivo, y ajustar el mismo de tal manera que el eje de rotación del motor, esté

	alineado con el difusor del piranómetro, esto garantiza que el eje del motor este paralelo al eje de rotación de la tierra.
5	<ul style="list-style-type: none"> Colocar la burbuja de nivel del soporte general usando los tornillos disponibles.

Atornillar el instrumento a la plataforma:

Debe realizar este procedimiento en un día soleado para asegurarse de que el instrumento esté correctamente alineado.

1. Coloque el instrumento de banda de sombra en la plataforma soporte. Alinee los orificios de sujeción del soporte general del instrumento sobre el orificio de la plataforma.
2. Ajuste el soporte general a la plataforma de soporte con los pernos de sujeción.
3. El soporte del motor del instrumento de banda de sombra debe estar paralelo al meridiano geográfico norte / sur local para que funcione correctamente.
4. Al mediodía solar, gire el instrumento de banda de sombra de modo que el soporte del motor mire en la misma dirección que el sol, asegurándose de que el soporte no arroje sombras a ninguno de los lados del motor de banda. En el hemisferio norte, el soporte del motor debe apuntar hacia el sur; en el hemisferio sur, debería apuntar al norte. (ver figura I.6.)

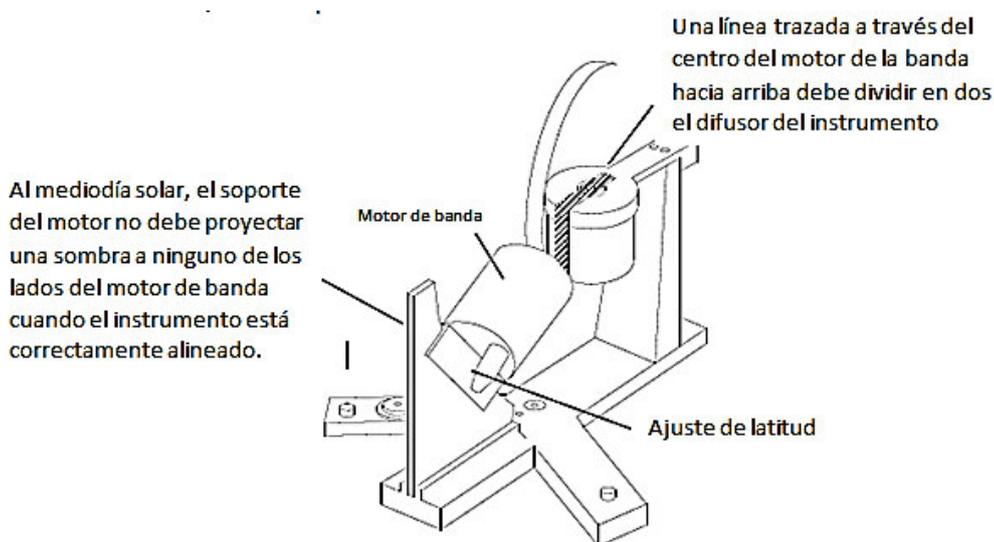


Figura I.6. Indicaciones fundamentales para el montaje del sistema RSR.

Nivel del instrumento:

Asegurarse que tanto que la burbuja de nivel del piranómetro como la del soporte general tengan su burbuja centrada en el círculo. Una vez asegurado que el instrumento esté bien nivelado, apriete los pernos de sujeción y vuelva a verificar.

Verifique la alineación de la banda:

El ajuste de latitud se establece correctamente cuando una línea trazada a través del centro del motor de banda biseca el difusor del instrumento como se muestra a continuación.

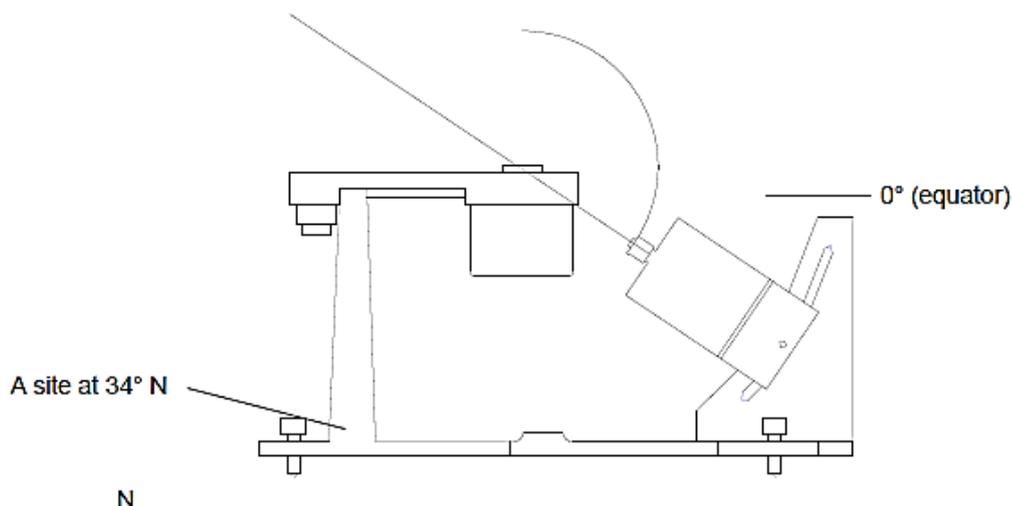


Figura I.7. Verificación de la alineación de la sombra de banda.

En resumen, se deben verificar los siguientes elementos:

- El horizonte artificial del difusor debe estar nivelado y la alineación geográfica norte / sur del soporte del motor debe verificarse al mediodía solar
- El ajuste de latitud del motor debe ser correcto. El motor debe atornillarse en el orificio más cercano a la latitud del sitio.
- El eje del motor debe ser empujado completamente contra el tope del orificio de la sombra de banda.
- La sombra de banda debe dar sombra al difusor por completo, mañana, mediodía y noche.

I.3. INSTALACIÓN DEL SISTEMA OPERATIVO PARA RASPBERRY:

Sistema operativo Raspbian:

La parte más importante de este trabajo se lo realiza en Raspberry, que necesita funcionar con un sistema operativo. Para esto se proporciona el archivo .img que contiene el sistema operativo Raspbian GNU/Linux que además ya tiene incluido todos los archivos necesarios para que el sistema RSR funcione de manera adecuada.

Este archivo .img debe ser montado en una tarjeta microSD que posteriormente será insertado en la tarjeta Raspberry Pi 3B+.

Para esto seguimos los siguientes pasos:

- i. Insertar la tarjeta SD al computador (asegurarse de que esté vacía o sino formatearla)
- ii. Descargar el programa Win32 Disk Imager, que permite montar la imagen en la tarjeta SD.
- iii. Ejecutar el programa Win32 Disk Imager como administrador.

- iv. Damos click en el botón que se muestra en la figura para seleccionar el archivo .img que queremos cargar en la tarjeta.

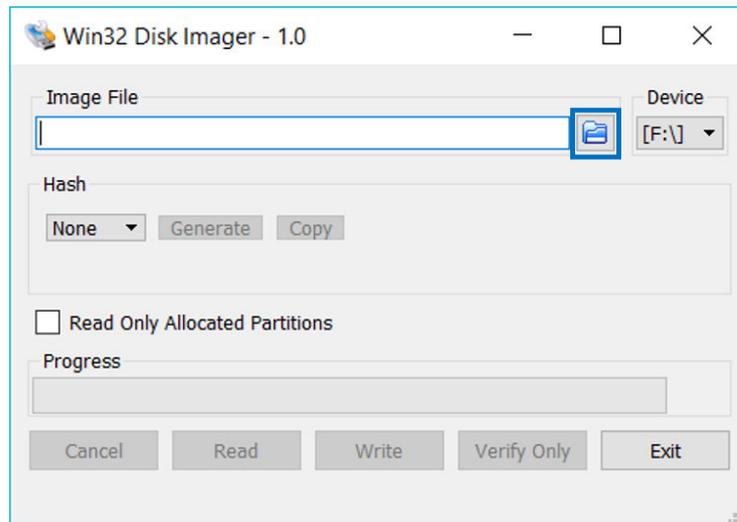


Figura I.8. Buscar y seleccionar el archivo .img en el directorio.

- v. Asegurarse que el dispositivo que está en la pestaña “Device” corresponde a la tarjeta SD.
- vi. Hacer click en “Write”.

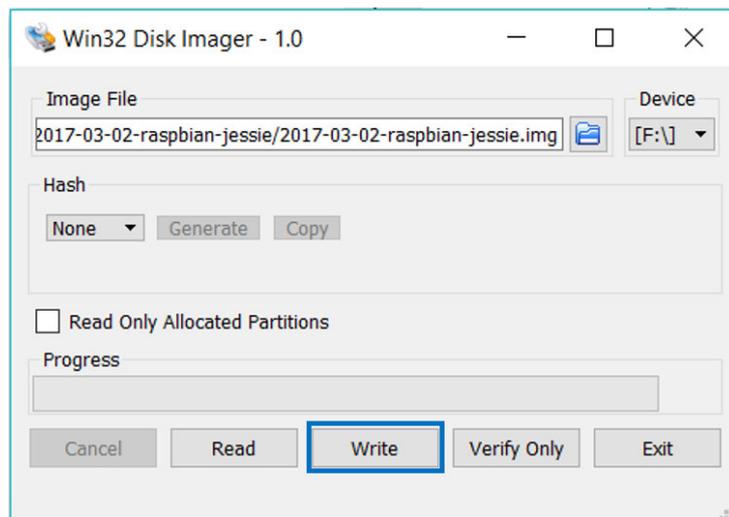


Figura I.9. Montando la imagen en la tarjeta SD, presionamos “Write”

- vii. Insertar la tarjeta SD en la Raspberry

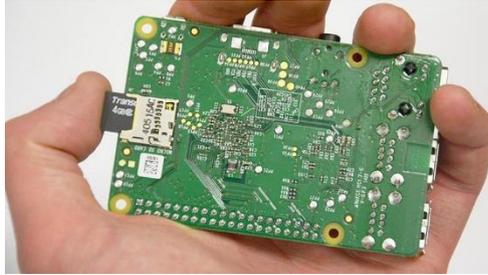


Figura I.10. Insertar la tarjeta SD en Raspberry Pi 3B+.

I.4. PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA:

Una vez instalado el sistema operativo con todos los archivos necesarios en Raspberry, simplemente hay que energizar la tarjeta, conectar Raspberry a una red de Internet y ejecutar algunos archivos, que están en el escritorio del sistema Raspbian.

Para ejecutar estos archivos seguimos los siguientes pasos:

- i. Hay dos carpetas en el escritorio, llamadas RSR_con_HMI y RSR_sin_HMI. Ambas contienen un archivo para Arduino y un archivo python 3.

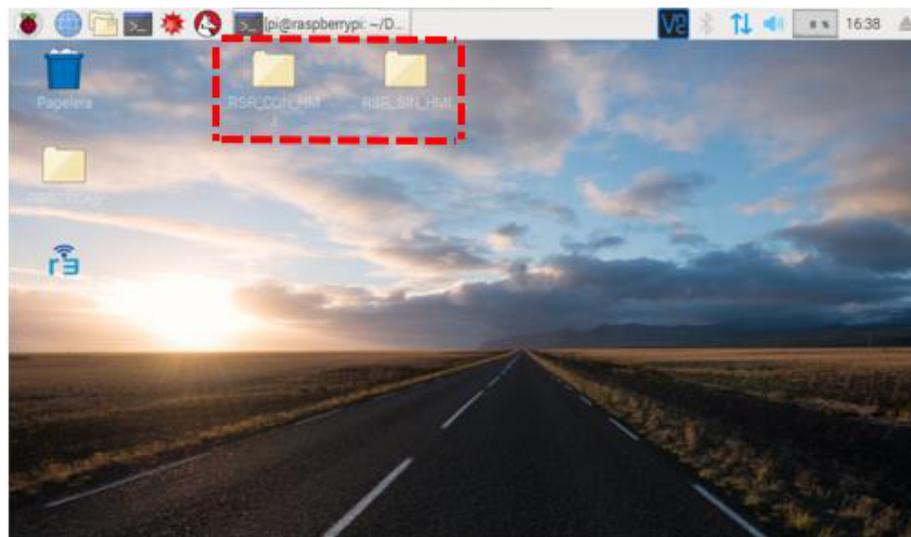


Figura I.11. Carpetas que contienen los archivos, para poner en marcha el sistema RSR.

- ii. El procedimiento para que el sistema recolecte datos, puede ser usando un HMI y sin usar el HMI. Pero para ambos casos siempre hay que cargar primero el código de Arduino, que se encuentra dentro de otra carpeta (recuadro rojo). Los archivos Python están al lado de esta carpeta (recuadro verde), estos deben ser ejecutados desde el terminal de Raspbian después de cargar el código de Arduino.



Figura I.12. Archivos Python en recuadro verde y carpeta con archivo para Arduino en recuadro rojo.

- iii. Al abrir la carpeta que contiene el código Arduino, se tiene un archivo .ino , el cual hay que ejecutar.

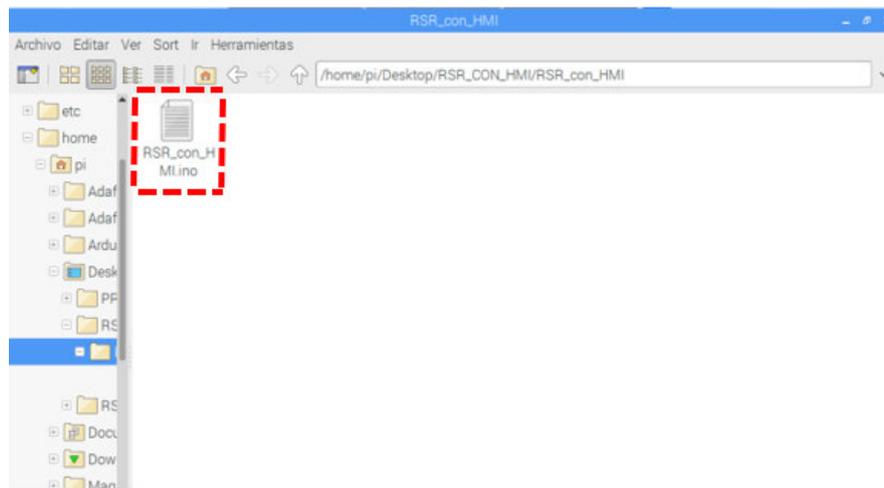


Figura I.13. Archivo .ino que contiene el programa que debe ser cargado en Arduino.

- iv. Debido a que en este sistema operativo se encuentra instalado el IDE de Arduino, es posible subir el código directamente usando Raspberry. Hay que asegurarse de que el cable serial de Arduino esté conectado a uno de los puertos USB de Raspberry.

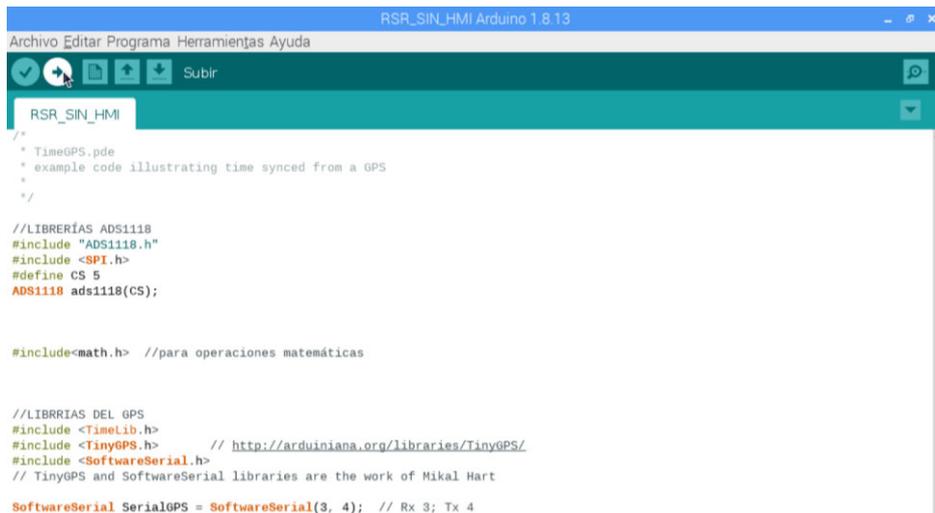


Figura I.14. IDE de Arduino, para subir el código a Arduino Nano directamente desde Raspberry.

- v. Una vez subido el código de Arduino, hay que ejecutar el archivo .py, desde la terminal de Raspbian que se encuentra en la parte superior de la pantalla.

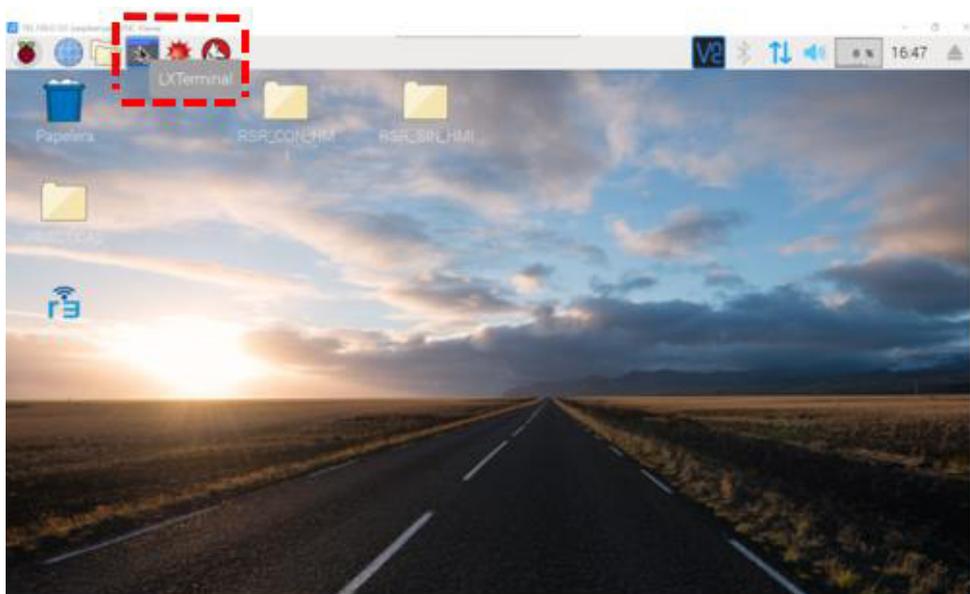


Figura I.15. Abrir la terminal Raspbian.

- vi. Se despliega la terminal, que básicamente trabaja con comandos Linux.

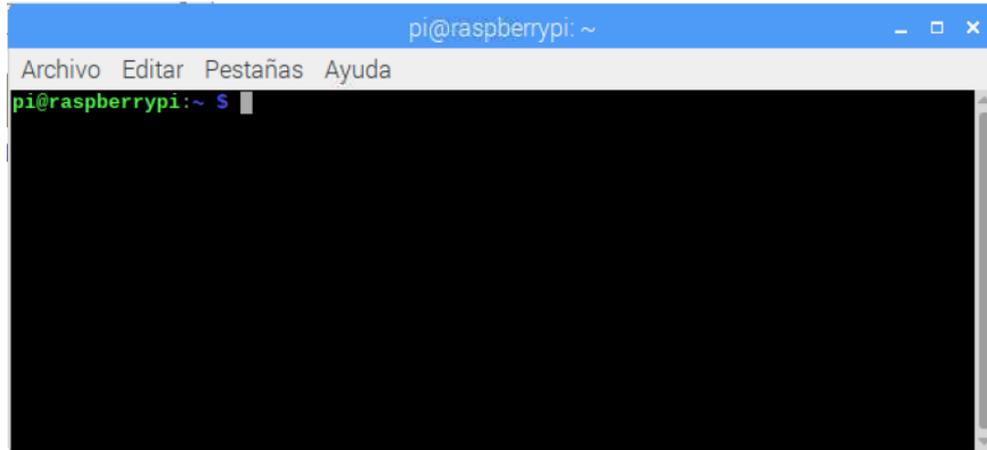


Figura I.16. Terminal de comandos Linux en Raspbian.

vii. Aquí hay que ingresar a donde se encuentran los archivos .py que necesitan ser ejecutados.

Para ejecutar el programa sin HMI hay que escribir las siguientes líneas

```
cd Desktop/RSR_sin_HMI
```

```
python3 recolectar_datos_cada_5.py
```

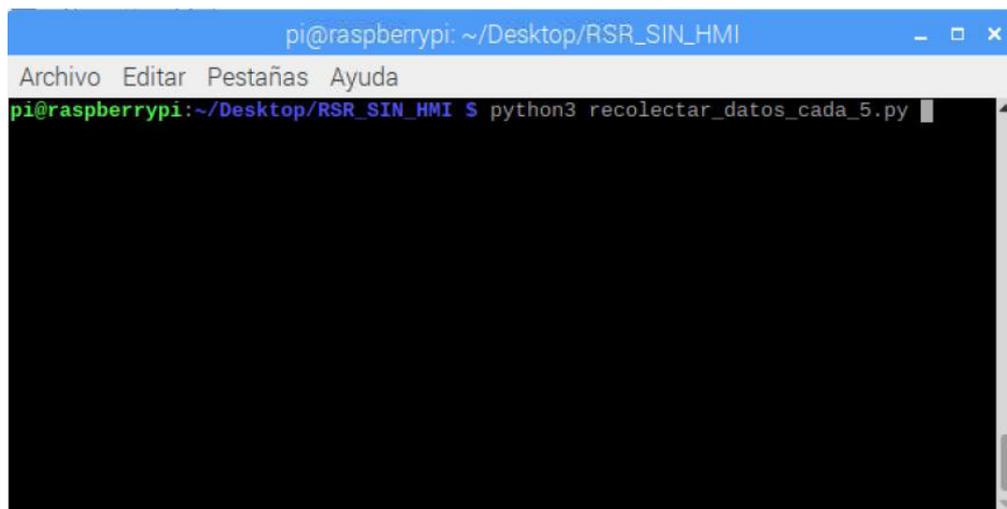


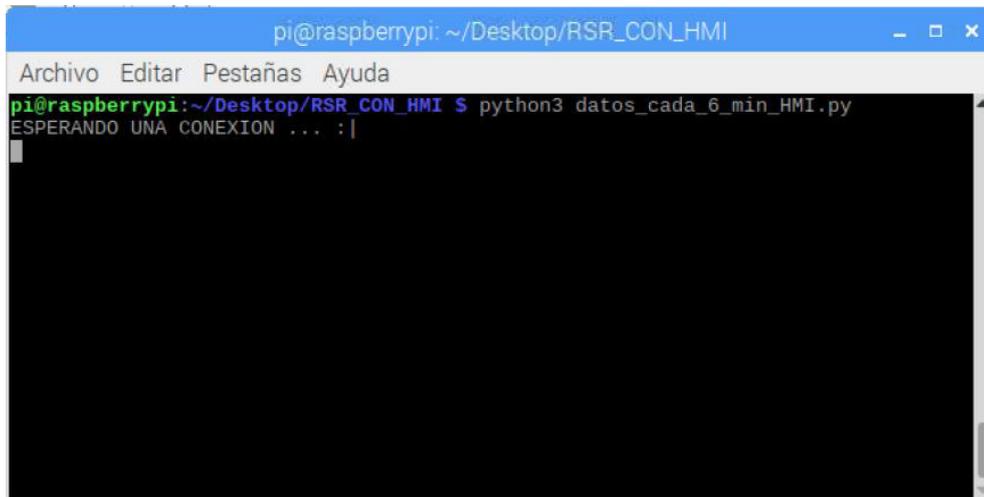
Figura I.17. Comando a ejecutar para recolectar los datos cada 5 minutos sin HMI.

Para ejecutar el programa con HMI hay que escribir las siguientes líneas

```
cd Desktop/RSR_con_HMI
```

```
python3 datos_cada_6min.py
```

Al ejecutar este programa, nos despliega el mensaje “ESPERANDO UNA CONEXIÓN|” como en la figura I.18. Es aquí donde Raspberry espera una conexión TCP IP con LabVIEW. Cuando detecta que se ha establecido una conexión, entonces empieza a ejecutar el programa principal.

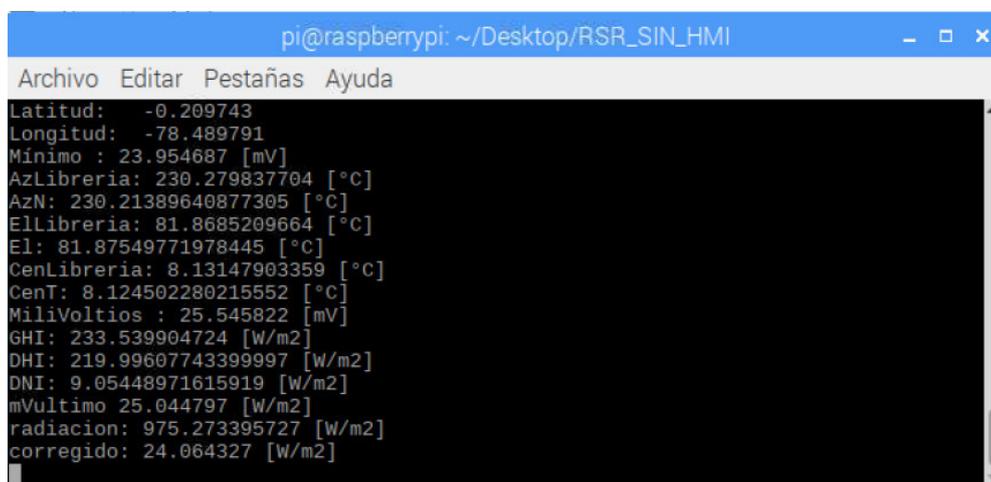


```
pi@raspberrypi: ~/Desktop/RSR_CON_HMI
Archivo Editar Pestañas Ayuda
pi@raspberrypi:~/Desktop/RSR_CON_HMI $ python3 datos_cada_6_min_HMI.py
ESPERANDO UNA CONEXION ... :|
```

Figura I.18. Comando a ejecutar para recolectar los datos cada 5 minutos con HMI.

Si se hizo todo el procedimiento para el programa sin HMI correctamente, se podrá observar el interfaz que se muestra en la figura I.19. Donde ya se puede observar los valores de irradiancia. Y registra los datos automáticamente en la base de datos, cada 5 minutos.

De igual manera si el programa con HMI realizó una conexión con LabVIEW correctamente, desplegará los valores de irradiancia igual a el de la figura I.19.



```
pi@raspberrypi: ~/Desktop/RSR_SIN_HMI
Archivo Editar Pestañas Ayuda
Latitud: -0.209743
Longitud: -78.489791
Mínimo : 23.954687 [mV]
AzLibreria: 230.279837704 [°C]
AzN: 230.21389640877305 [°C]
ElLibreria: 81.8685209664 [°C]
El: 81.87549771978445 [°C]
CenLibreria: 8.13147903359 [°C]
CenT: 8.124502280215552 [°C]
MiliVoltios : 25.545822 [mV]
GHI: 233.539904724 [W/m2]
DHI: 219.99607743399997 [W/m2]
DNI: 9.05448971615919 [W/m2]
mVultimo 25.044797 [W/m2]
radiacion: 975.273395727 [W/m2]
corregido: 24.064327 [W/m2]
```

Figura I.19. Interfaz que debe ejecutarse si se ha realizado todo el procedimiento de manera correcta

I.5. INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA (HMI).

Para poder ejecutar el Interfaz Hombre Máquina (HMI), es necesario tener instalada una versión igual o superior a LabVIEW 2020. Para ejecutar esta aplicación, es necesario que el programa en Python de Raspberry, se esté ejecutando y en espera de una conexión TCP-IP.

Para facilidad de explicación se lo ha dividido en 7 bloques. (Ver figura I.20.).

El bloque 1 se tiene una breve presentación del proyecto. En el bloque 2 es donde se ingresa la dirección IP que tiene asignada la tarjeta Raspberry Pi 3B+, y el puerto 9999 que hemos asignado por defecto en la programación. Si se usa Remote it, se escribe la dirección IP y el puerto que asigna la misma aplicación.

En el bloque 3 se puede observar cómo funciona el algoritmo de corrección, esto resultó de mucha ayuda al momento de la programación del mismo y para poder dar validez al mismo. En este bloque se observa el voltaje sin filtrar, para poder observar cómo varía el voltaje cuando la banda cubre el difusor, además se puede observar los valores de hombro derecho e izquierdo, el valor mínimo de la ráfaga de barrido y la corrección necesaria para calcular bien el DHI.

En el bloque 4 se observan los tres componentes de irradiancia en $[W/m^2]$. Este en realidad es el producto final de este trabajo, en donde se puede observar el comportamiento del GHI, DHI, y DNI.

En el bloque 5 se muestra todo lo relacionado con la posición solar, se muestra la longitud y latitud donde se encuentra el dispositivo, el ángulo cenital solar, el acimut solar, y la elevación solar respecto de este.

En el bloque 6 tenemos los valores de voltaje filtrado por software y del voltaje sin filtrar, esto para poder observar el comportamiento del filtro y poder validar su funcionamiento.

Y finalmente el bloque 7 es el que nos permite detener la aplicación, deteniendo así cualquier proceso que se esté haciendo, incluso dejará de moverse la sombra de banda y se dejará de almacenar datos en la base de datos.

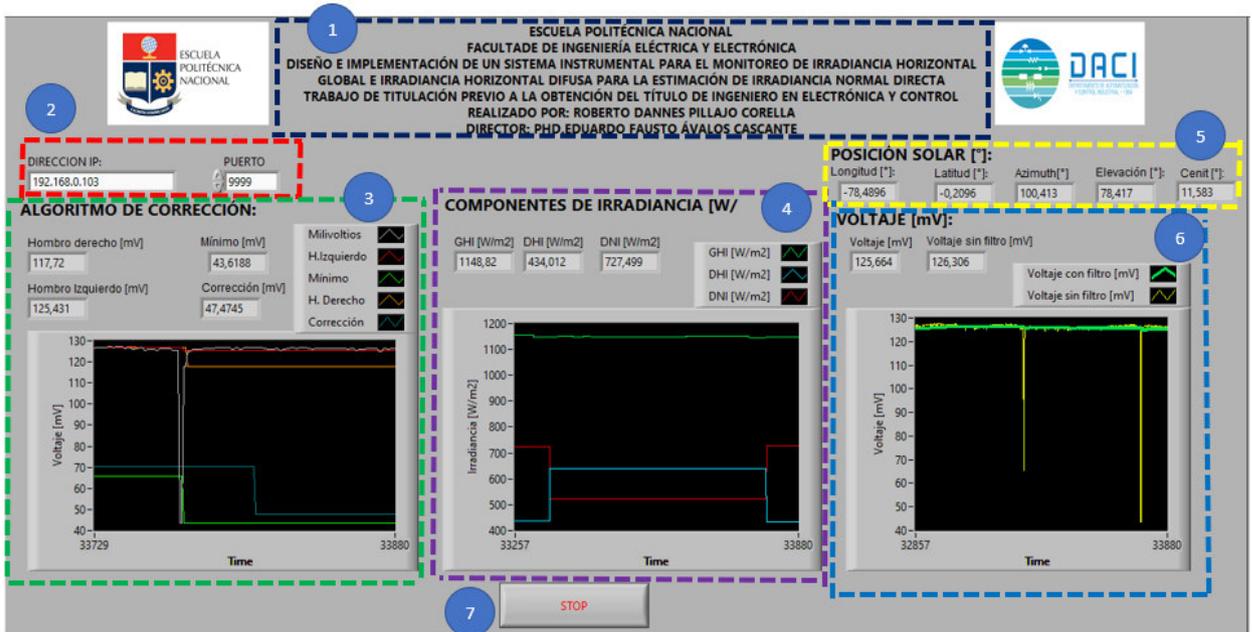


Figura I.20. Interfaz Hombre Máquina (HMI) creado en Labview para el monitoreo de la irradiancia solar.

I.6. ACCESO A LA BASE DE DATOS:

Hay que acceder a la página del servicio de hosting “HOSTINGER”.
<https://www.hostinger.com/cpanel-login> .

En esta página hay que insertar las credenciales de usuario y contraseña, una vez ingresadas se tiene acceso a la siguiente pantalla, en donde hay que dar clic a “Administrar”

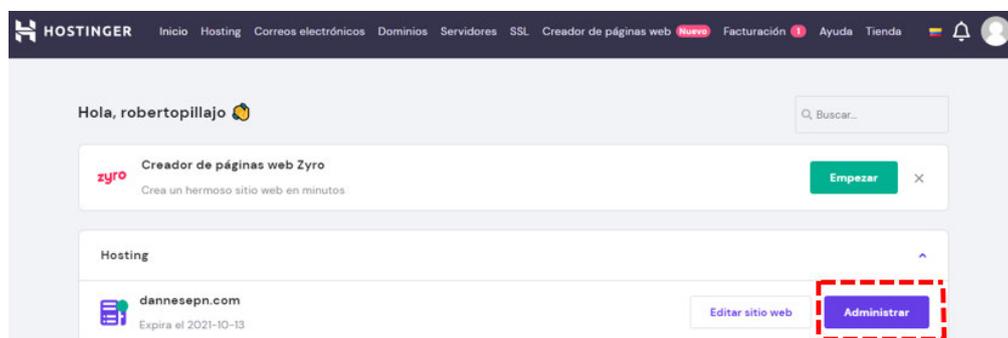


Figura I.21. Interfaz principal de “Hostinger”.

Luego hay que buscar las sección base de datos y damos clic en “Base de datos MySQL”

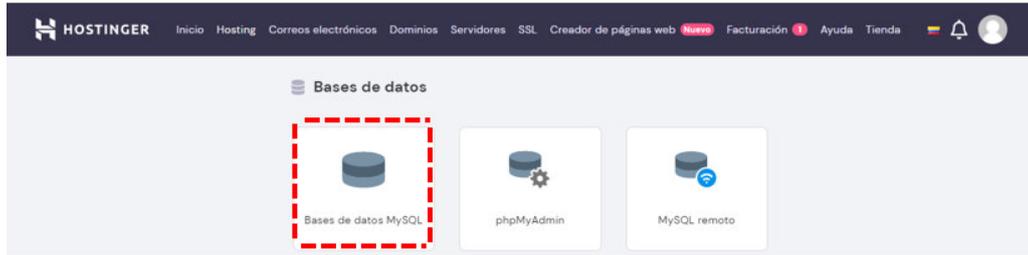


Figura I.22. Interfaz en “Hostinger” para acceder a la base de datos.

Nos despliega el siguiente interfaz, en donde podemos acceder a las bases de datos previamente creadas. Seleccionamos la que se muestra en la figura I.23. y damos clic en “Enter phpMyAdmin”.

Base de Datos MySQL	MySQL User	Host MySQL	Utilización de disco, MB	Creado en	Acciones
u484025564_raspi	u484025564_ dannes	localhost	12	2021-03-14 03:27:08	Enter phpMyAdmin

Figura I.23. Interfaz para ingresar a la base de datos creada para este proyecto.

Nos redirige a un interfaz phpMyAdmin como la de la figura I.24., en donde seleccionamos la base de datos “irradiancia”.

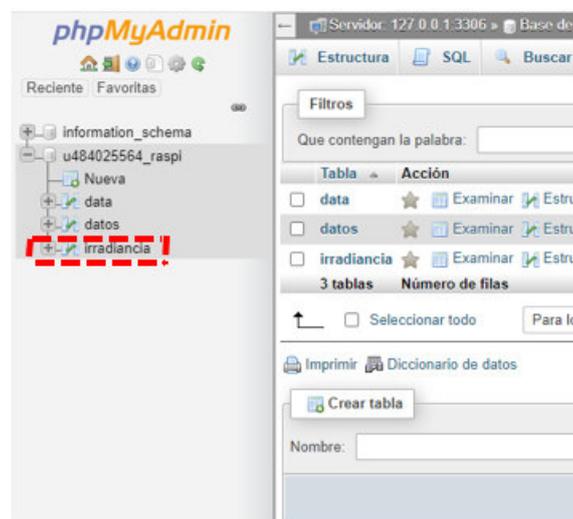


Figura I.24. Interfaz phpMyAdmin en donde se encuentra la base de datos creada para este proyecto.

En esta base de datos llamada “irradiancia” (Ver figura I.25.) se almacenó la fecha, la hora, el ángulo cenital solar, el acimut solar, la elevación solar (tanto de la librería y del algoritmo

desarrollado), la latitud y la longitud de donde se encuentra ubicado nuestro dispositivo, y los tres componentes de irradiancia (GHI, DHI y DNI).

Mostrando filas 30075 - 30099 (total de 30226. La consulta tardó 0.0373 segundos.)

```
SELECT * FROM `irradiancia`
```

Perfilando [Editar en línea] [Editar] [Explicar SQL] [Crear código PHP] [Actualizar]

<< < 1204 > >> | Número de filas: 25 | Filtrar filas: Buscar en esta tabla | Ordenar según la clave: Ninguna

+ Opciones		id	date	voltaje	cenit	cenitT	zenith	zenithT	altitud	altitudT	latitud	longitud	GHI	DHI	DNI
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	45875	27/09/2021 15:06:00	86.1	45.3363	45.3337	267.454	272.55	44.6637	44.6663	-0.2097	-78.4896	787.4	595.7	126
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	45876	27/09/2021 15:10:00	81.1	46.3361	46.3371	267.492	272.512	43.6639	43.6629	-0.2097	-78.4896	741.7	444.1	286.2
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	45877	27/09/2021 15:15:00	32.8	47.5843	47.5864	267.536	272.467	42.4157	42.4136	-0.2098	-78.4895	299.5	193.9	215
<input type="checkbox"/>	Editar Copiar Borrar	45878	27/09/2021 15:16:00	21.3	47.8333	47.8319	267.544	272.459	42.1667	42.1681	-0.2096	-78.4896	194.5	190.7	7.3

Figura I.25. Base de datos creada para almacenar las variables importantes de este trabajo.

Al pulsar exportar (ver figura I.25.) se puede descargar los datos que se necesite para su respectivo análisis.

I.7. ACCESO A LA PÁGINA WEB:

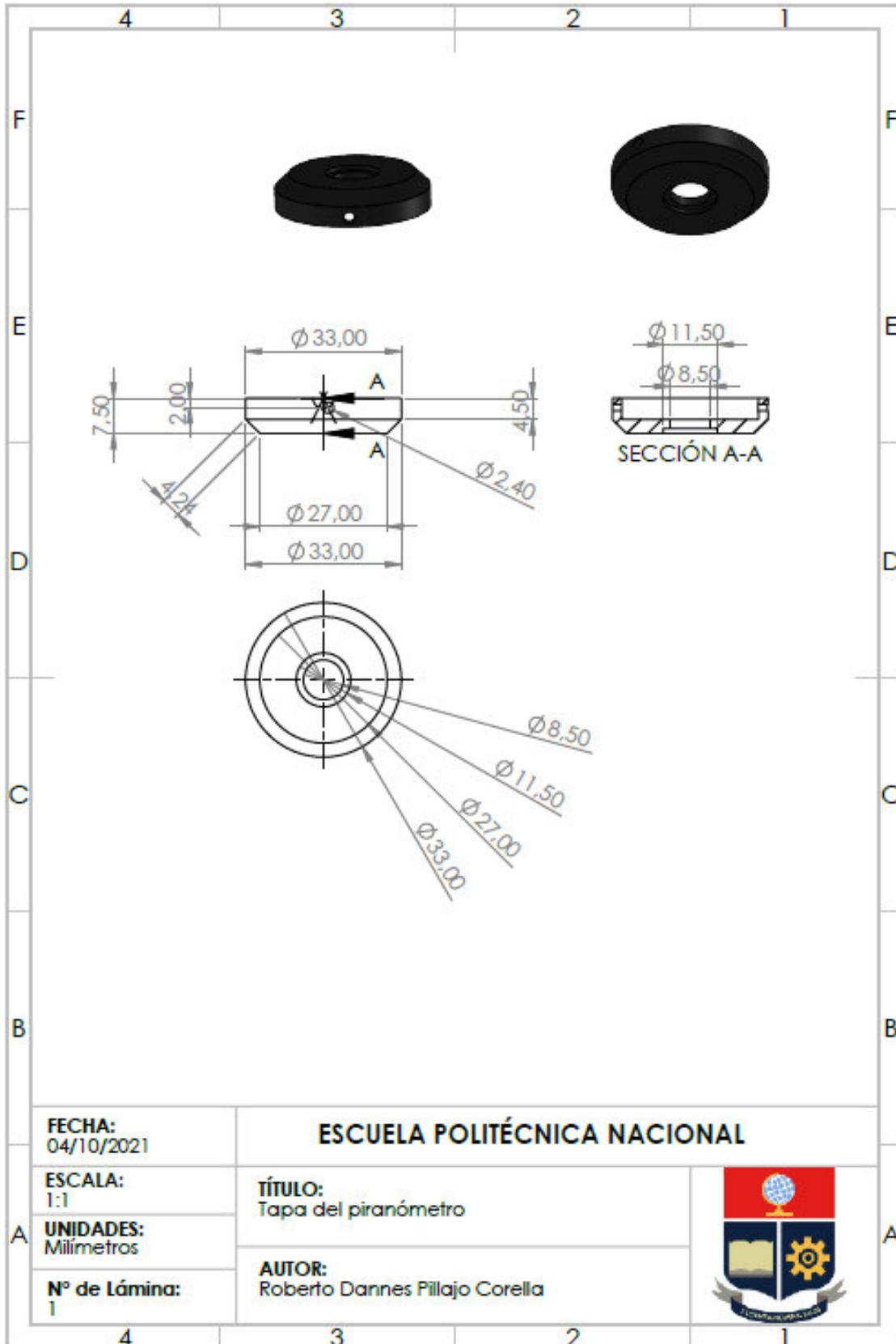
Para acceder a la página web creada para este trabajo, simplemente es necesario acceder a la siguiente dirección. <https://www.dannesepn.com/>. En donde se puede observar las mismas variables que en la base de datos, en tiempo real.

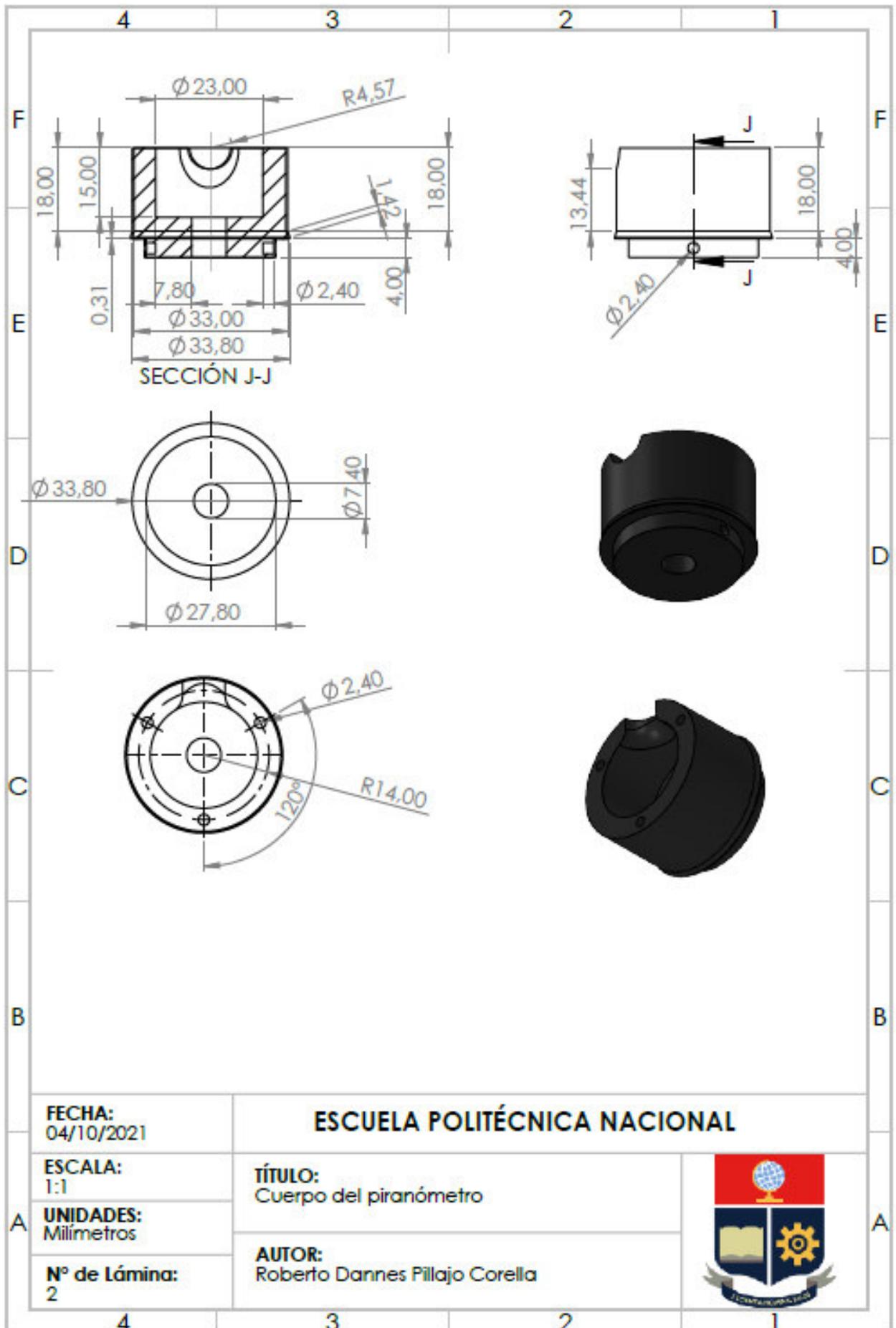
IRRADIANCIA 2021 EPN

ID	Fecha y hora (d/m/a)	Voltaje [mV]	Cenit Solar Librería	Cenit Solar Algoritmo	Azimuth Solar Librería	Azimuth Solar Algoritmo	Altitud Solar Librería	Altitud Solar Algoritmo	Latitud	Longitud	GHI [W/m2]	DHI [W/m2]	DNI [W/m2]
45652	24/09/2021 14:55:00	73.4	42.3095	42.3092	269.06	270.943	47.6905	47.6908	-0.2097	-78.4896	670.7	309.9	523.6
45651	24/09/2021 14:51:00	93.5	41.3098	41.3049	269.047	270.956	48.6902	48.6951	-0.2097	-78.4896	855	650.3	274.8
45650	24/09/2021 14:50:00	94.5	41.0603	41.0591	269.044	270.96	48.9397	48.9409	-0.2096	-78.4896	863.8	715.9	195.3
45649	24/09/2021 14:46:00	103.6	40.0596	40.0547	269.029	270.974	49.9404	49.9453	-0.2097	-78.4896	946.9	421	497.1
45648	24/09/2021 14:45:00	90.4	39.8105	39.8089	269.026	270.978	50.1895	50.1911	-0.2097	-78.4896	826.5	421	495.3
45647	24/09/2021 14:40:00	34.4	38.5609	38.5588	269.006	270.997	51.4391	51.4412	-0.2097	-78.4896	314.9	291.8	40.2
45646	24/09/2021 14:36:00	32.2	37.5606	37.5546	268.989	271.015	52.4394	52.4454	-0.2096	-78.4895	294.7	275.7	17.9
45645	24/09/2021 14:35:00	31.1	37.3112	37.3087	268.985	271.019	52.6888	52.6913	-0.2096	-78.4896	284.3	274.1	7.3
45644	24/09/2021 14:31:00	28.7	36.3112	36.3044	268.966	271.038	53.6888	53.6956	-0.2097	-78.4896	262.5	260.1	3.7
45643	24/09/2021 14:30:00	29	36.0616	36.0586	268.961	271.042	53.9384	53.9414	-0.2096	-78.4895	265.5	260.1	11.6

Figura I.26. Interfaz gráfico creado para el monitoreo de irradiancia, en una página Web de fácil acceso.

ANEXO II
PLANOS DE LAS PIEZAS MECÁNICAS DEL EQUIPO





FECHA:
04/10/2021

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCALA:
1:1

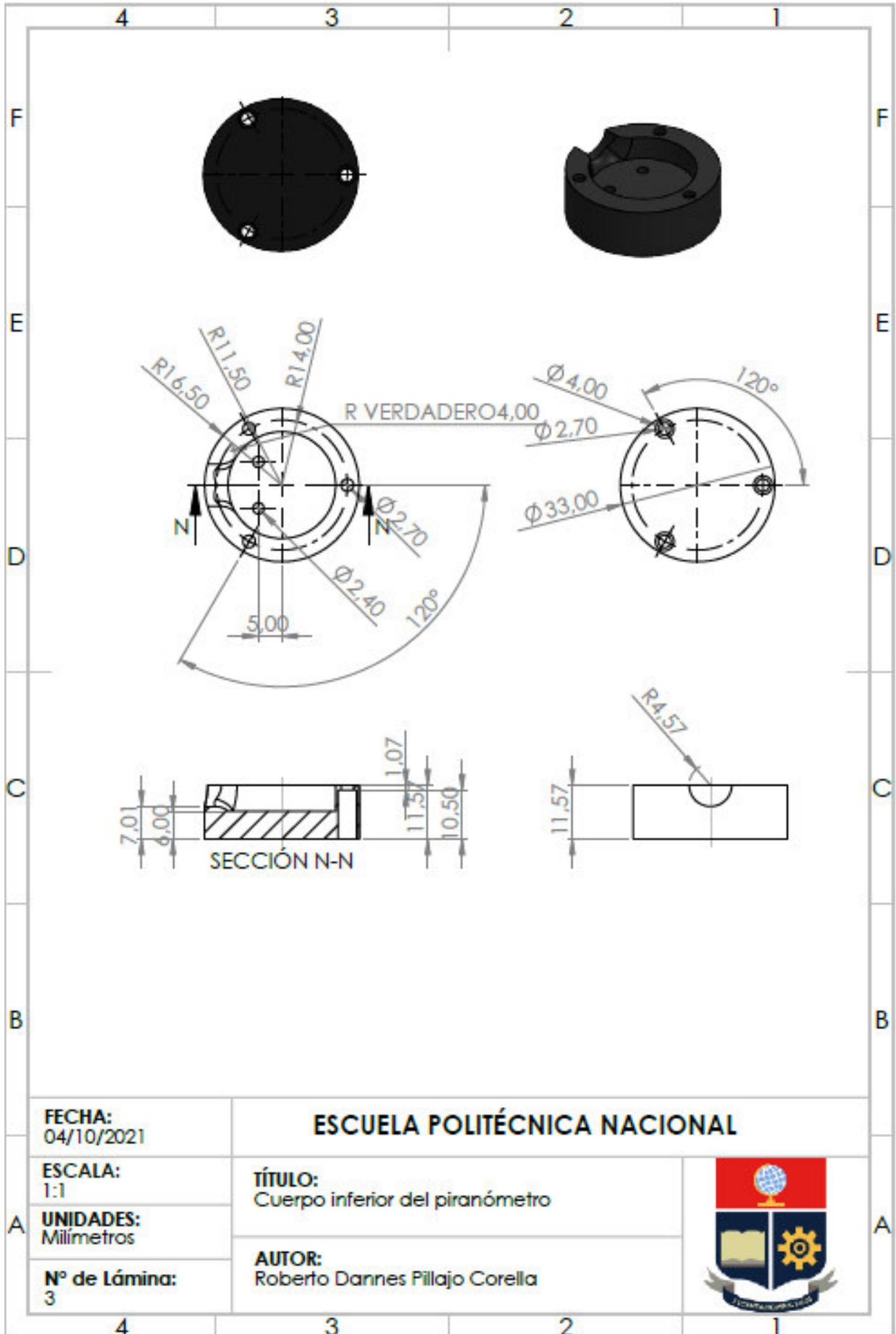
TÍTULO:
Cuerpo del piranómetro

UNIDADES:
Milímetros

AUTOR:
Roberto Dannes Pillajo Corella

Nº de Lámina:
2





FECHA:
04/10/2021

ESCALA:
1:1

UNIDADES:
Milímetros

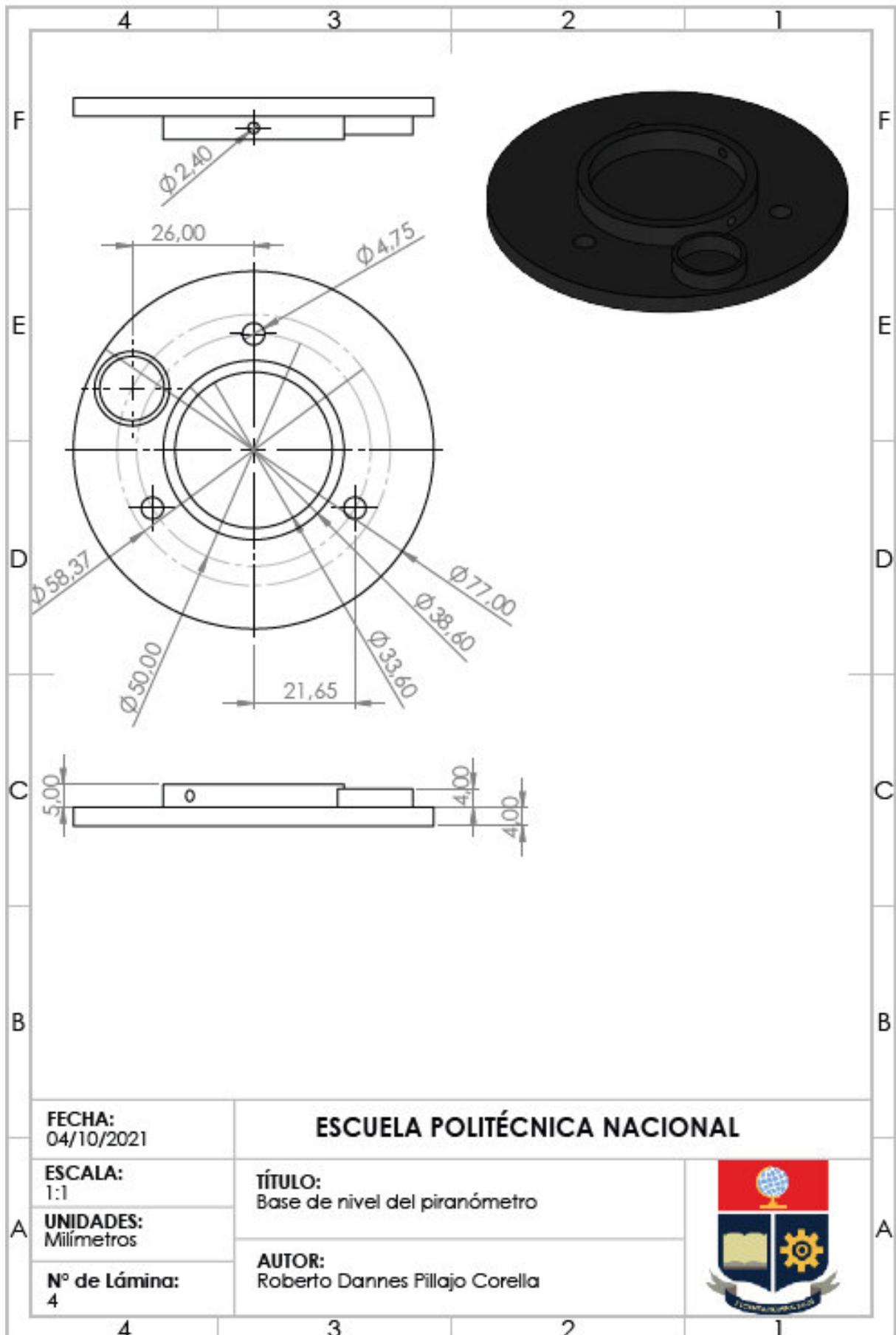
Nº de Lámina:
3

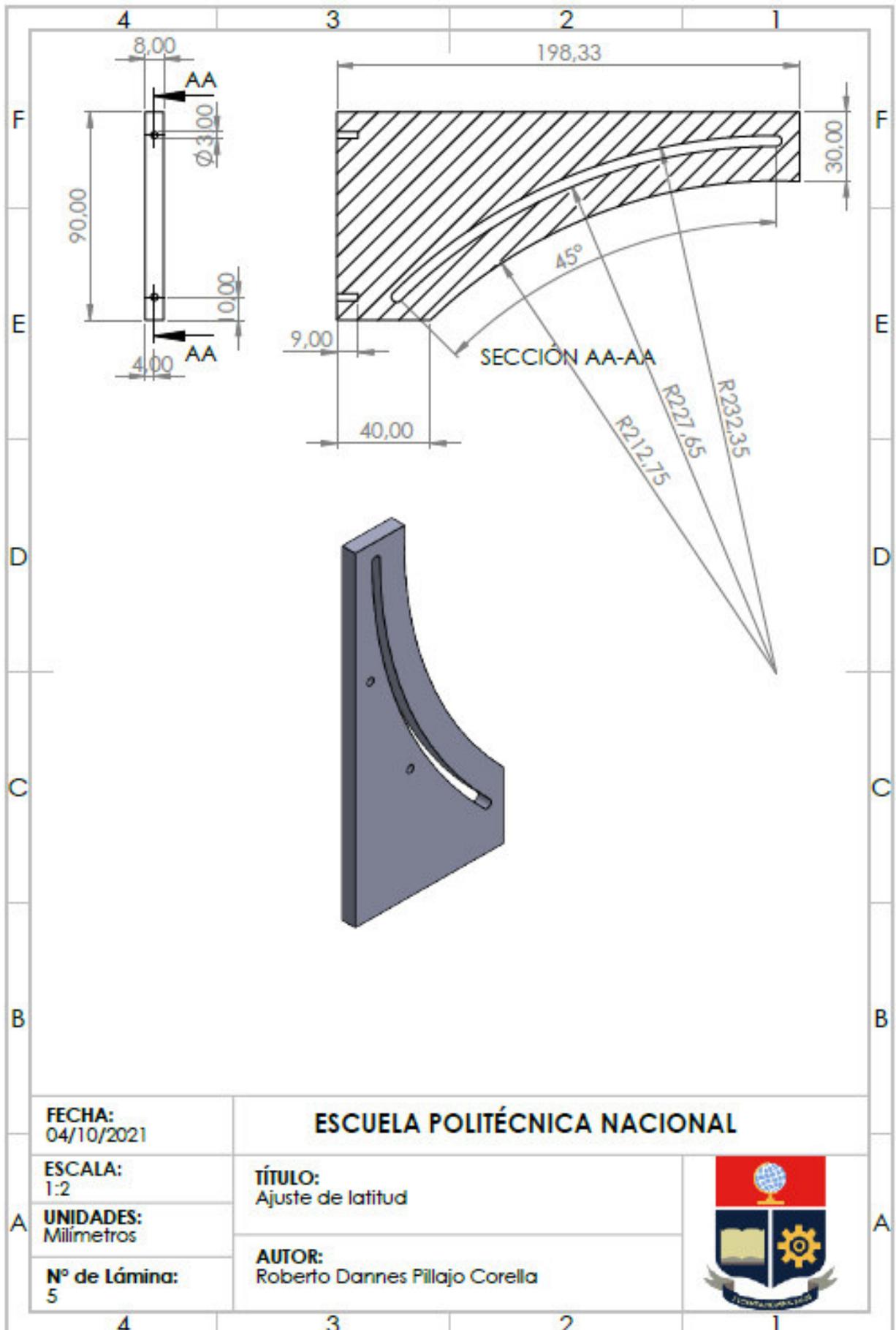
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

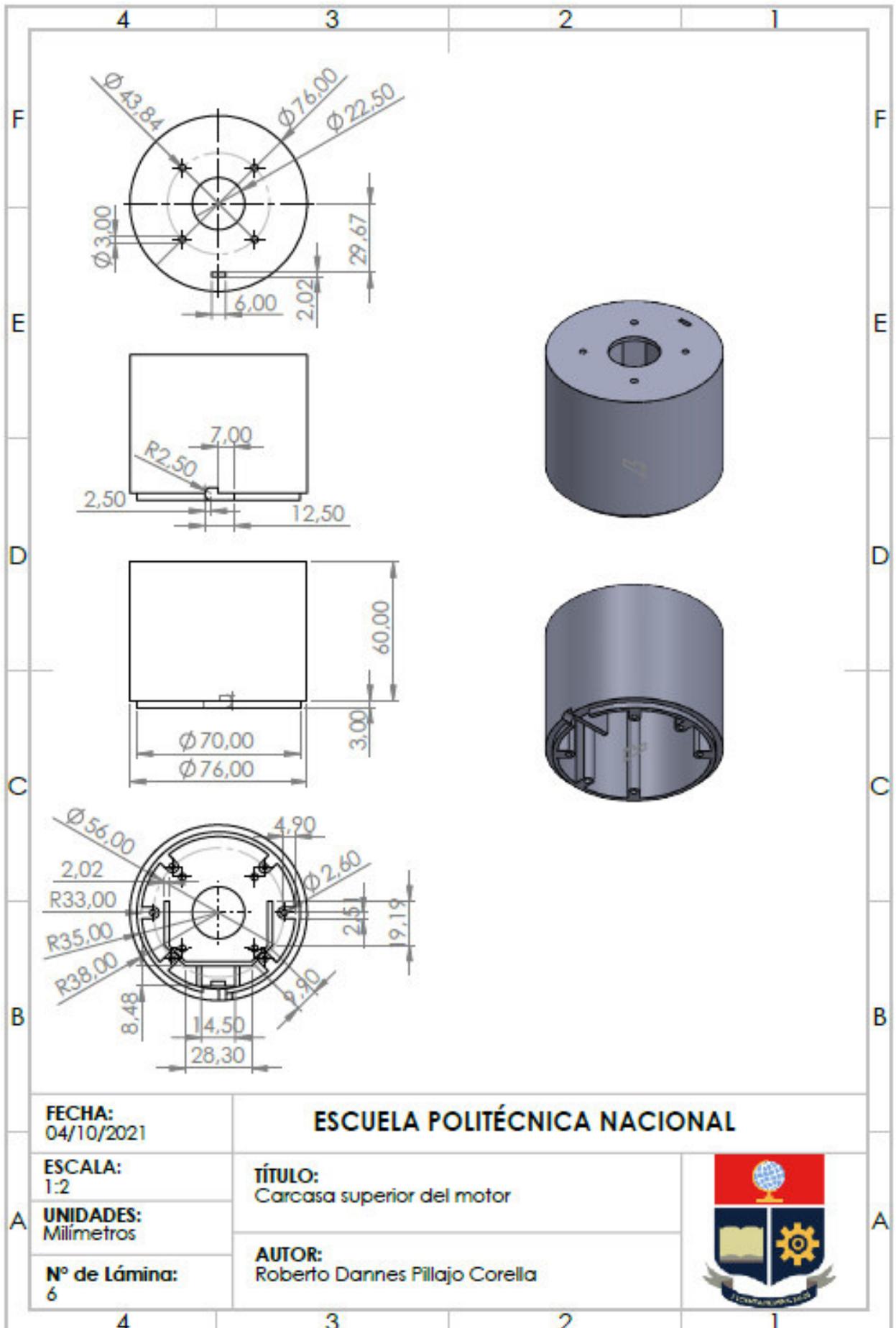
TÍTULO:
Cuerpo inferior del piranómetro

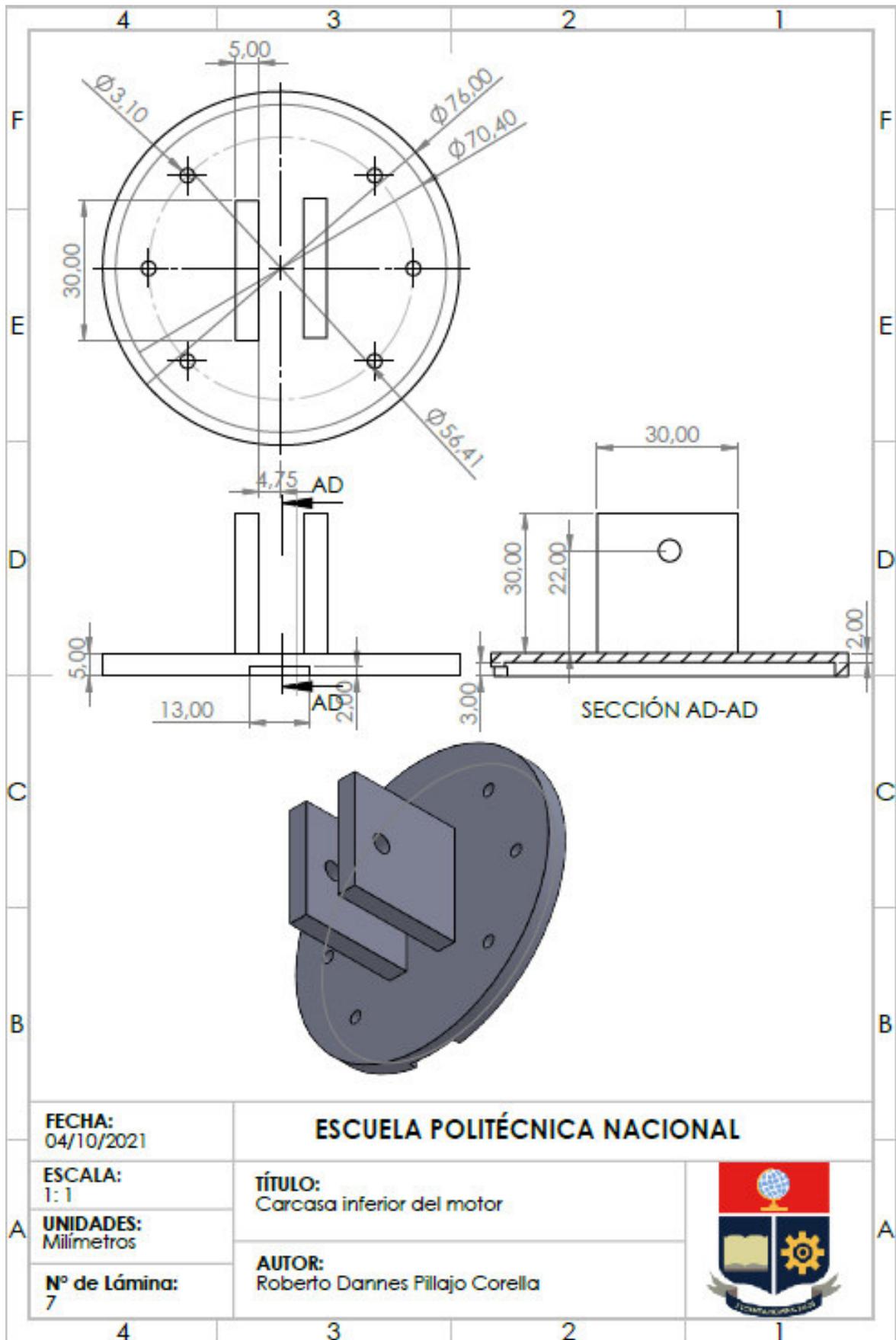
AUTOR:
Roberto Dannes Pillajo Corella











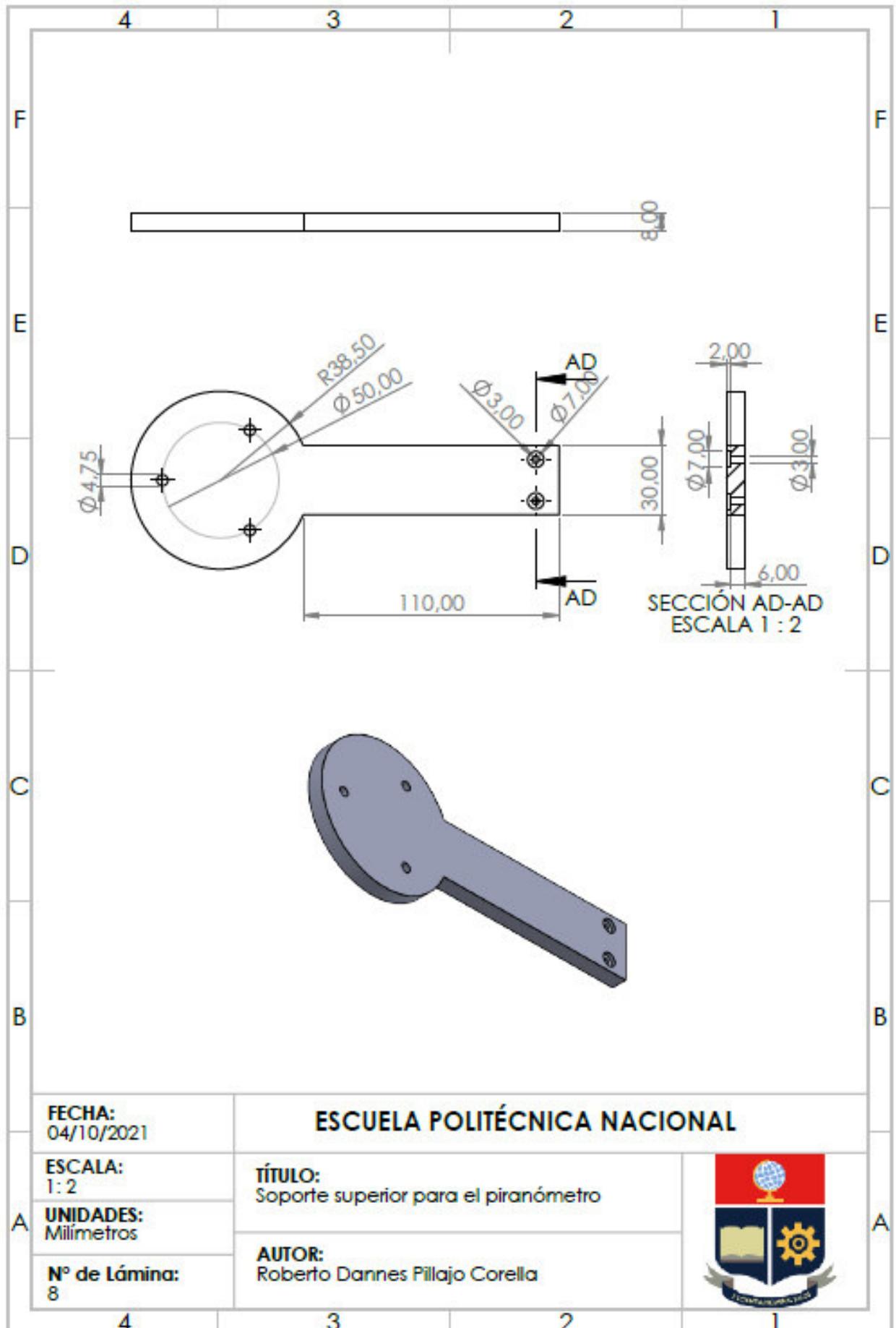
FECHA: 04/10/2021
ESCALA: 1:1
UNIDADES: Milímetros
Nº de Lámina: 7

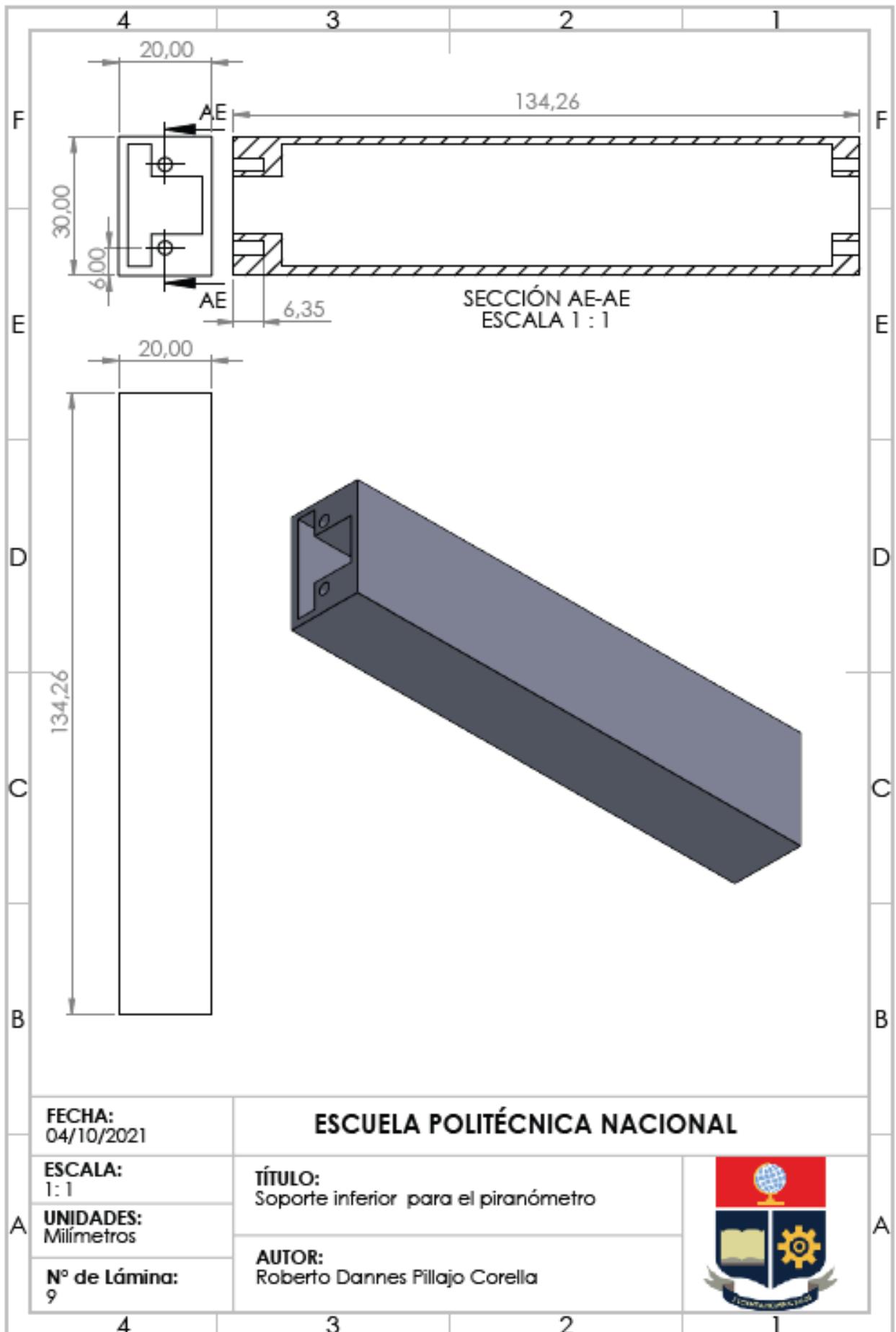
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

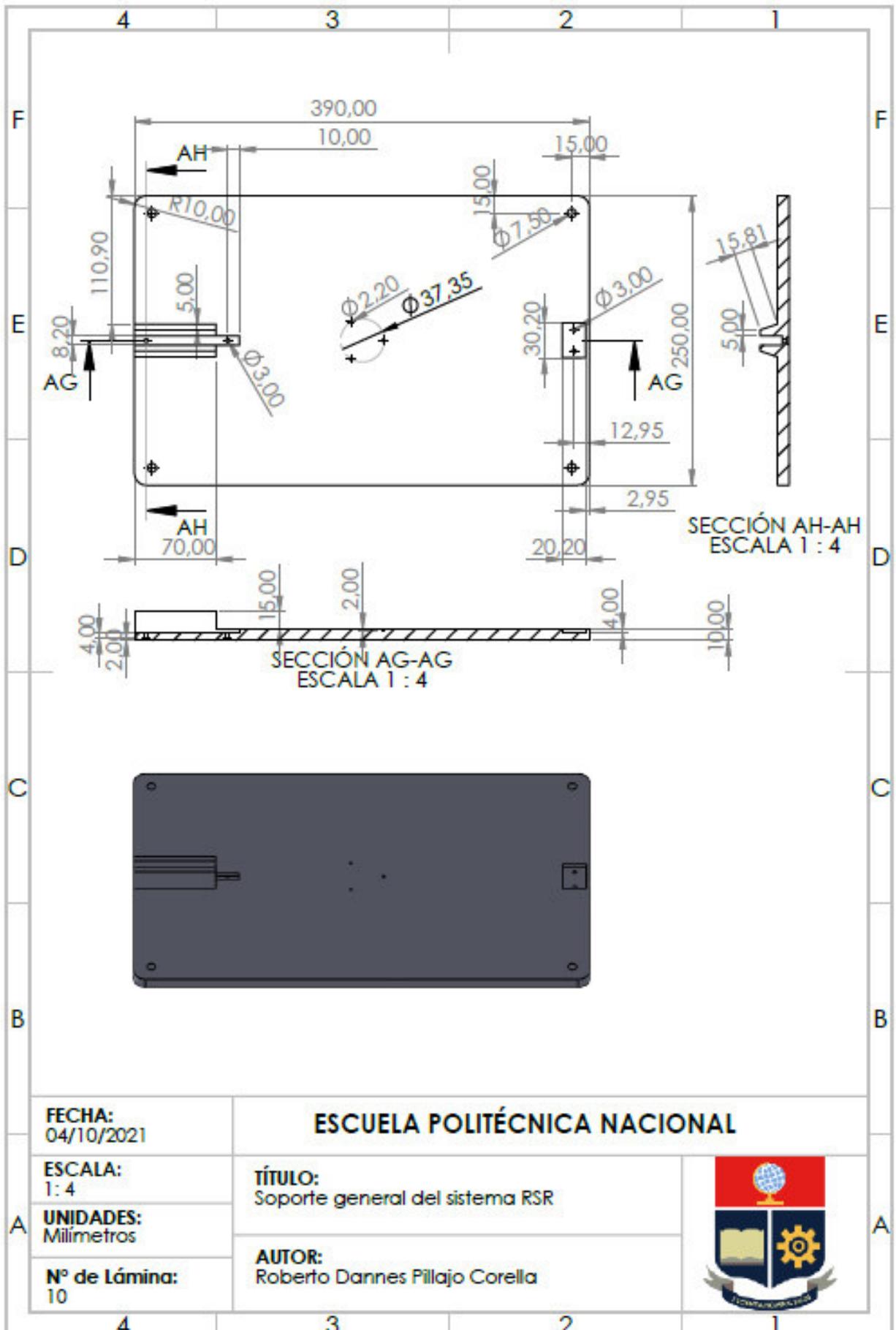
TÍTULO:
Carcasa inferior del motor

AUTOR:
Roberto Dannes Pillajo Corella









FECHA:
04/10/2021

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCALA:
1: 4

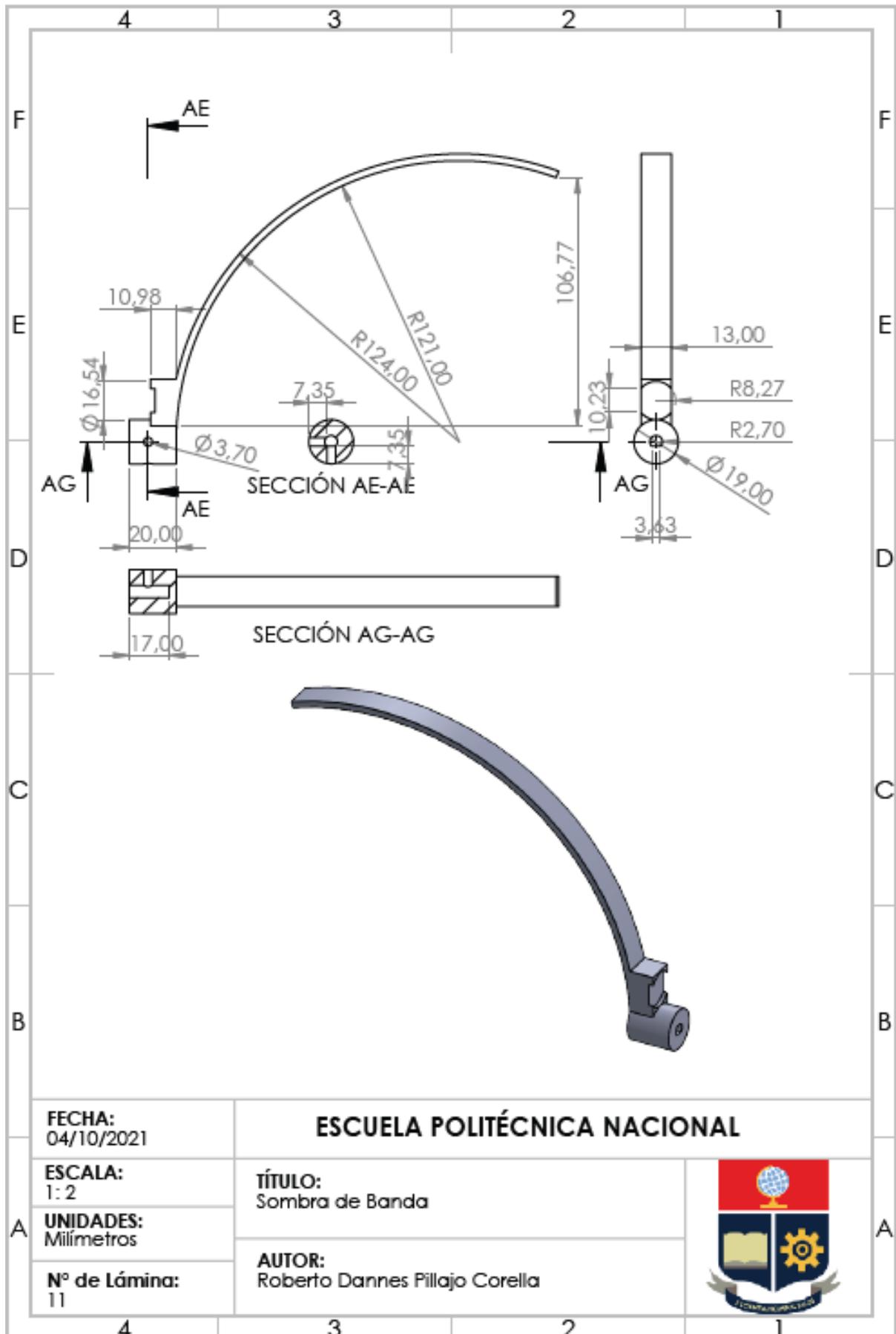
TÍTULO:
Soporte general del sistema RSR

UNIDADES:
Milímetros

Nº de Lámina:
10

AUTOR:
Roberto Dannes Pillajo Corella





ANEXO III

Factor de calibración del día 20 de agosto de 2021. Se obtuvo un factor de corrección de offset de 2.5 mV y un factor multiplicativo de 9.145 (en verde los valores que están debajo del 5% de error)

Medición:	Fecha:	Hora:	Milivoltios:	OFFSET:	Factor de Calibración:	GHI Calibrada:	GHI Estación 1:	%Error:
1	20/8/2021	6:00	-2,5516	2,5	9,145	-0,5	0,0	#DIV/0!
2	20/8/2021	6:05	-2,5613	2,5	9,145	-0,6	0,0	#DIV/0!
3	20/8/2021	6:10	-2,4606	2,5	9,145	0,4	0,0	#DIV/0!
4	20/8/2021	6:15	-2,4	2,5	9,145	0,9	0,4	128,625
5	20/8/2021	6:20	-1,7355	2,5	9,145	7,0	3,8	83,9829605
6	20/8/2021	6:25	-1,4937	2,5	9,145	9,2	7,6	21,0870197
7	20/8/2021	6:30	-1,5913	2,5	9,145	8,3	10,4	20,0955625
8	20/8/2021	6:35	-0,9878	2,5	9,145	13,8	15,1	8,41676159
9	20/8/2021	6:40	-0,2329	2,5	9,145	20,7	20,6	0,64383252
10	20/8/2021	6:45	0,3308	2,5	9,145	25,9	25,3	2,32279051
11	20/8/2021	6:50	0,4374	2,5	9,145	26,9	29,4	8,63087415
12	20/8/2021	6:55	1,5118	2,5	9,145	36,7	37,4	1,90398128
13	20/8/2021	7:00	1,7132	2,5	9,145	38,5	38,6	0,18208808
14	20/8/2021	7:05	2,8109	2,5	9,145	48,6	50,3	3,44298111
15	20/8/2021	7:10	4,2257	2,5	9,145	61,5	62,4	1,43184856
16	20/8/2021	7:15	5,8073	2,5	9,145	76,0	78,0	2,60223269
17	20/8/2021	7:20	7,1279	2,5	9,145	88,0	90,9	3,1384538
18	20/8/2021	7:25	8,3812	2,5	9,145	99,5	101,2	1,67136957
19	20/8/2021	7:30	12,1389	2,5	9,145	133,9	129,5	3,37663359

20	20/8/2021	7:35	14,4479	2,5	9,145	155,0	158,4	2,15369602
21	20/8/2021	7:40	18,1161	2,5	9,145	188,5	185,2	1,8003426
22	20/8/2021	7:45	19,0675	2,5	9,145	197,2	199,4	1,08586384
23	20/8/2021	7:50	18,0493	2,5	9,145	187,9	180,7	3,99742584
24	20/8/2021	7:55	16,4506	2,5	9,145	173,3	175,3	1,13905476
25	20/8/2021	8:00	14,7298	2,5	9,145	157,6	156,9	0,42480625
26	20/8/2021	8:05	16,9262	2,5	9,145	177,7	185,8	4,38503821
27	20/8/2021	8:10	19,9856	2,5	9,145	205,6	209,0	1,61205167
28	20/8/2021	8:15	20,9059	2,5	9,145	214,0	221,9	3,53900158
29	20/8/2021	8:20	20,903	2,5	9,145	214,0	223,8	4,36977882
30	20/8/2021	8:25	24,5708	2,5	9,145	247,6	259,8	4,71036721
31	20/8/2021	8:30	28,3101	2,5	9,145	281,8	288,9	2,47200952
32	20/8/2021	8:35	26,984	2,5	9,145	269,6	293,3	8,06983294
33	20/8/2021	8:40	40,2832	2,5	9,145	391,3	397,5	1,57173233
34	20/8/2021	8:45	26,7599	2,5	9,145	267,6	346,4	22,7535261
35	20/8/2021	8:50	62,7824	2,5	9,145	597,0	505,0	18,2193164
36	20/8/2021	8:55	68,5161	2,5	9,145	649,4	680,7	4,59200316
37	20/8/2021	9:00	70,6716	2,5	9,145	669,2	699,4	4,32452359
38	20/8/2021	9:05	59,126	2,5	9,145	563,6	553,0	1,91135081
39	20/8/2021	9:10	52,8573	2,5	9,145	506,2	506,3	0,01135522
40	20/8/2021	9:15	78,6778	2,5	9,145	742,4	747,5	0,68615639
41	20/8/2021	9:20	78,2836	2,5	9,145	738,8	751,9	1,74677191
42	20/8/2021	9:25	78,4262	2,5	9,145	740,1	741,1	0,13896923
43	20/8/2021	9:30	78,4177	2,5	9,145	740,0	763,0	3,01541723
44	20/8/2021	9:35	63,0824	2,5	9,145	599,8	598,4	0,22577674
45	20/8/2021	9:40	93,4077	2,5	9,145	877,1	874,7	0,27162644
46	20/8/2021	9:45	99,3984	2,5	9,145	931,9	870,9	6,9997552
47	20/8/2021	9:50	46,1266	2,5	9,145	444,7	631,4	29,5707544

48	20/8/2021	9:55	40,8176	2,5	9,145	396,1	405,8	2,38061804
49	20/8/2021	10:00	33,1324	2,5	9,145	325,9	315,8	3,18502153
50	20/8/2021	10:05	35,3716	2,5	9,145	346,3	365,7	5,2951102
51	20/8/2021	10:10	57,4066	2,5	9,145	547,8	451,7	21,2853347
52	20/8/2021	10:15	107,559	2,5	9,145	1006,5	1005,9	0,0586097
53	20/8/2021	10:20	69,4127	2,5	9,145	657,6	816,5	19,4560145
54	20/8/2021	10:25	117,349	2,5	9,145	1096,0	1009,2	8,60276506
55	20/8/2021	10:30	107,645	2,5	9,145	1007,3	1037,8	2,94121941
56	20/8/2021	10:35	107,365	2,5	9,145	1004,7	1041,0	3,48554995
57	20/8/2021	10:40	112,666	2,5	9,145	1053,2	1062,7	0,89460149
58	20/8/2021	10:45	72,3488	2,5	9,145	684,5	684,9	0,05953044
59	20/8/2021	10:50	112,05	2,5	9,145	1047,6	1049,1	0,14681632
60	20/8/2021	10:55	92,102	2,5	9,145	865,1	864,6	0,06191187
61	20/8/2021	11:00	110,034	2,5	9,145	1029,1	1049,6	1,95089272
62	20/8/2021	11:05	112,193	2,5	9,145	1048,9	1050,8	0,18390893
63	20/8/2021	11:10	113,283	2,5	9,145	1058,8	1066,7	0,73727055
64	20/8/2021	11:15	80,75	2,5	9,145	761,3	878,2	13,3088989
65	20/8/2021	11:20	37,8302	2,5	9,145	368,8	361,9	1,91204172
66	20/8/2021	11:25	42,4404	2,5	9,145	411,0	430,6	4,55644264
67	20/8/2021	11:30	72,4538	2,5	9,145	685,5	741,4	7,54619625
68	20/8/2021	11:35	52,5363	2,5	9,145	503,3	508,3	0,9823011
69	20/8/2021	11:40	48,6215	2,5	9,145	467,5	466,1	0,30167722
70	20/8/2021	11:45	64,6529	2,5	9,145	614,1	656,1	6,39944056
71	20/8/2021	11:50	60,5117	2,5	9,145	576,2	601,1	4,13541898
72	20/8/2021	11:55	103,372	2,5	9,145	968,2	926,8	4,46692274
73	20/8/2021	12:00	75,564	2,5	9,145	713,9	924,9	22,8137874
74	20/8/2021	12:05	101,177	2,5	9,145	948,1	944,6	0,37329716
75	20/8/2021	12:10	107,75	2,5	9,145	1008,2	1006,9	0,13270931

76	20/8/2021	12:15	83,1605	2,5	9,145	783,4	968,0	19,0738355
77	20/8/2021	12:20	95,582	2,5	9,145	897,0	824,5	8,78834324
78	20/8/2021	12:25	72,057	2,5	9,145	681,8	710,3	4,00904336
79	20/8/2021	12:30	89,03	2,5	9,145	837,0	874,7	4,30526466
80	20/8/2021	12:35	77,5694	2,5	9,145	732,2	768,5	4,71897684
81	20/8/2021	12:40	76,2755	2,5	9,145	720,4	669,5	7,60297946
82	20/8/2021	12:45	64,7547	2,5	9,145	615,0	593,4	3,64749435
83	20/8/2021	12:50	91,2076	2,5	9,145	857,0	830,3	3,21040612
84	20/8/2021	12:55	101,026	2,5	9,145	946,7	951,9	0,54152012
85	20/8/2021	13:00	95,9237	2,5	9,145	900,1	860,0	4,66101587
86	20/8/2021	13:05	65,5793	2,5	9,145	622,6	651,6	4,45285474
87	20/8/2021	13:10	56,0738	2,5	9,145	535,7	529,9	1,08650708
88	20/8/2021	13:15	55,0922	2,5	9,145	526,7	510,8	3,10897984
89	20/8/2021	13:20	51,1777	2,5	9,145	490,9	498,1	1,44899287
90	20/8/2021	13:25	50,3933	2,5	9,145	483,7	462,8	4,51798369
91	20/8/2021	13:30	51,4555	2,5	9,145	493,4	477,5	3,33466963
92	20/8/2021	13:35	66,2887	2,5	9,145	629,1	572,0	9,97773802
93	20/8/2021	13:40	53,7926	2,5	9,145	514,8	513,7	0,21332042
94	20/8/2021	13:45	57,9547	2,5	9,145	552,9	571,6	3,27882584
95	20/8/2021	13:50	97,803	2,5	9,145	917,3	921,1	0,41570568
96	20/8/2021	13:55	66,6886	2,5	9,145	632,7	669,0	5,42156248
97	20/8/2021	14:00	73,0694	2,5	9,145	691,1	774,8	10,80509
98	20/8/2021	14:05	59,9745	2,5	9,145	571,3	582,2	1,8671758
99	20/8/2021	14:10	59,5921	2,5	9,145	567,8	642,8	11,662686
100	20/8/2021	14:15	45,5881	2,5	9,145	439,8	619,2	28,9784117
101	20/8/2021	14:20	33,9901	2,5	9,145	333,7	448,4	25,5794013
102	20/8/2021	14:25	30,7494	2,5	9,145	304,1	301,6	0,81756068
103	20/8/2021	14:30	48,101	2,5	9,145	462,7	461,7	0,22658545

104	20/8/2021	14:35	27,5586	2,5	9,145	274,9	365,2	24,7300392
105	20/8/2021	14:40	23,0799	2,5	9,145	233,9	223,8	4,52555206
106	20/8/2021	14:45	31,8437	2,5	9,145	314,1	286,5	9,62413141
107	20/8/2021	14:50	44,5358	2,5	9,145	430,1	448,0	3,98607344
108	20/8/2021	14:55	36,9975	2,5	9,145	361,2	363,9	0,74068769
109	20/8/2021	15:00	31,1454	2,5	9,145	307,7	305,0	0,88104361
110	20/8/2021	15:05	24,7039	2,5	9,145	248,8	257,8	3,49896606
111	20/8/2021	15:10	16,6643	2,5	9,145	175,3	163,2	7,38818842
112	20/8/2021	15:15	20,1969	2,5	9,145	207,6	193,2	7,43434291
113	20/8/2021	15:20	52,151	2,5	9,145	499,8	500,7	0,18306471
114	20/8/2021	15:25	46,2859	2,5	9,145	446,1	478,1	6,68331824
115	20/8/2021	15:30	36,3578	2,5	9,145	355,4	398,3	10,782179
116	20/8/2021	15:35	39,9368	2,5	9,145	388,1	353,7	9,72138422
117	20/8/2021	15:40	33,3547	2,5	9,145	327,9	317,6	3,24031219
118	20/8/2021	15:45	20,0595	2,5	9,145	206,3	213,0	3,1424284
119	20/8/2021	15:50	17,9281	2,5	9,145	186,8	185,6	0,65461988
120	20/8/2021	15:55	13,3943	2,5	9,145	145,4	152,3	4,56114675
121	20/8/2021	16:00	16,2478	2,5	9,145	171,4	170,9	0,32102458
122	20/8/2021	16:05	38,3072	2,5	9,145	373,2	373,9	0,19207168
123	20/8/2021	16:10	40,5567	2,5	9,145	393,8	401,5	1,92938443
124	20/8/2021	16:15	43,7547	2,5	9,145	423,0	441,6	4,21213055
125	20/8/2021	16:20	13,9475	2,5	9,145	150,4	143,5	4,81699477
126	20/8/2021	16:25	12,4082	2,5	9,145	136,3	125,4	8,72048565
127	20/8/2021	16:30	7,6656	2,5	9,145	93,0	96,6	3,76354865
128	20/8/2021	16:35	8,2744	2,5	9,145	98,5	86,6	13,7781617
129	20/8/2021	16:40	10,1542	2,5	9,145	115,7	103,8	11,486184
130	20/8/2021	16:45	10,2923	2,5	9,145	117,0	112,3	4,17238068
131	20/8/2021	16:50	8,6877	2,5	9,145	102,3	110,7	7,57767254

132	20/8/2021	16:55	6,0178	2,5	9,145	77,9	84,8	8,14235731
133	20/8/2021	17:00	8,3329	2,5	9,145	99,1	97,2	1,92064866
134	20/8/2021	17:05	6,0786	2,5	9,145	78,5	86,7	9,51407497
135	20/8/2021	17:10	9,1052	2,5	9,145	106,1	105,0	1,07576571
136	20/8/2021	17:15	8,6522	2,5	9,145	102,0	109,9	7,20030118
137	20/8/2021	17:20	4,4818	2,5	9,145	63,8	73,3	12,8941869
138	20/8/2021	17:25	4,8722	2,5	9,145	67,4	72,9	7,51883539
139	20/8/2021	17:30	5,7852	2,5	9,145	75,8	77,0	1,5998
140	20/8/2021	17:35	4,4795	2,5	9,145	63,8	83,0	23,0993645
141	20/8/2021	17:40	4,7292	2,5	9,145	66,1	67,6	2,20261243
142	20/8/2021	17:45	3,7466	2,5	9,145	57,1	63,5	10,0391228
143	20/8/2021	17:50	3,2423	2,5	9,145	52,5	52,3	0,40790344
144	20/8/2021	17:55	2,1733	2,5	9,145	42,7	42,4	0,79558608
145	20/8/2021	18:00	0,9452	2,5	9,145	31,5	29,3	7,53021843

ANEXO IV

Validación de resultados de GHI el día 16 de septiembre de 2021. Se obtuvo una media de error de 4.32% y una desviación estándar de 5.01%. (en gris los valores mayores a 10 mV para sacar la media y desviación del error)

Medición:	Fecha:	Hora:	Voltaje [mV]	GHI Construido [W/m2]	GHI Comercial [W/m2]	% Error
1	16/9/2021	6:00	0,0	0,0	0,0	#¡DIV/0!
2	16/9/2021	6:05	0,4	3,7	0,5	631,36
3	16/9/2021	6:10	0,4	3,7	2,3	58,9913043
4	16/9/2021	6:15	1,0	9,1	8,7	5,08045977
5	16/9/2021	6:20	1,5	13,7	12,8	7,1328125
6	16/9/2021	6:25	1,7	15,5	15,8	1,63670886
7	16/9/2021	6:30	3,5	32,0	27,8	15,0971223
8	16/9/2021	6:35	4,9	44,8	43,4	3,21612903
9	16/9/2021	6:40	6,4	58,5	58,1	0,70361446
10	16/9/2021	6:45	7,2	65,8224	73,3	10,2013643
11	16/9/2021	6:50	8,6	78,6212	84,1	6,51462545
12	16/9/2021	6:55	5,2	47,5384	55,9	14,9581395
13	16/9/2021	7:00	8,4	99,6478	76,1	30,9432326
14	16/9/2021	7:05	15,3	162,7	172,3	5,55565873
15	16/9/2021	7:10	30,1	298,0	303,4	1,77020435
16	16/9/2021	7:15	26,2	262,4	275,8	4,86751269
17	16/9/2021	7:20	28,6	284,3	299,0	4,9109699
18	16/9/2021	7:25	23,2	234,9	235,4	0,19141886
19	16/9/2021	7:30	10,6	119,8	115,2	3,95850694
20	16/9/2021	7:35	9,6	110,6	112,4	1,58523132

21	16/9/2021	7:40	8,0	96,0	80,0	19,98875
22	16/9/2021	7:45	11,3	126,2	127,7	1,20626468
23	16/9/2021	7:50	43,4	419,6	388,6	7,98193515
24	16/9/2021	7:55	40,8	395,8	402,8	1,72576961
25	16/9/2021	8:00	58,9	561,3	577,0	2,71771231
26	16/9/2021	8:05	64,8	615,3	598,7	2,76542509
27	16/9/2021	8:10	66,0	626,2	627,2	0,15513393
28	16/9/2021	8:15	65,0	617,1	622,4	0,85395244
29	16/9/2021	8:20	63,0	598,8	613,5	2,39592502
30	16/9/2021	8:25	61,1	581,4	607,1	4,22810081
31	16/9/2021	8:30	65,7	623,5	639,9	2,56533833
32	16/9/2021	8:35	69,3	656,4	662,8	0,96626433
33	16/9/2021	8:40	26,3	263,3	341,7	22,9471466
34	16/9/2021	8:45	40,1	389,4	320,9	21,3615457
35	16/9/2021	8:50	41,4	401,3	387,7	3,51658499
36	16/9/2021	8:55	78,0	735,9	684,8	7,46655958
37	16/9/2021	9:00	74,0	699,4	716,2	2,35087964
38	16/9/2021	9:05	69,6	659,1	584,2	12,8274906
39	16/9/2021	9:10	27,5	274,3	266,1	3,06651635
40	16/9/2021	9:15	37,8	368,4	329,0	11,9825532
41	16/9/2021	9:20	15,7	166,4	168,5	1,25554896
42	16/9/2021	9:25	56,3	537,5	538,7	0,21355114
43	16/9/2021	9:30	38,9	378,5	379,7	0,32162233
44	16/9/2021	9:35	25,2	253,2	251,6	0,64920509
45	16/9/2021	9:40	33,8	331,9	323,1	2,7095636
46	16/9/2021	9:45	55,2	527,5	526,4	0,20771277
47	16/9/2021	9:50	56,4	538,5	538,9	0,08094266
48	16/9/2021	9:55	69,0	653,7	634,5	3,01859732

49	16/9/2021	10:00	90,3	848,4	838,3	1,2021472
50	16/9/2021	10:05	106,9	1000,1	975,5	2,5253511
51	16/9/2021	10:10	85,3	802,7	802,2	0,0582897
52	16/9/2021	10:15	101,6	951,7	915,3	3,97489348
53	16/9/2021	10:20	119,5	1115,3	1099,4	1,44842641
54	16/9/2021	10:25	117,3	1095,2	1003,0	9,19357926
55	16/9/2021	10:30	116,5	1087,9	1082,6	0,48937742
56	16/9/2021	10:35	114,2	1066,9	1055,2	1,10608415
57	16/9/2021	10:40	117,5	1097,0	1074,7	2,07871964
58	16/9/2021	10:45	118,4	1105,3	1089,7	1,42863173
59	16/9/2021	10:50	118,7	1108,0	1091,9	1,47544647
60	16/9/2021	10:55	118,5	1106,2	1091,0	1,39156737
61	16/9/2021	11:00	119,3	1113,5	1073,4	3,7353829
62	16/9/2021	11:05	109,4	1023,0	1026,4	0,33224864
63	16/9/2021	11:10	86,9	817,3	824,8	0,9099418
64	16/9/2021	11:15	75,7	714,9	715,5	0,08324249
65	16/9/2021	11:20	130,3	1214,1	1214,9	0,06933904
66	16/9/2021	11:25	66,1	627,1	629,3	0,34304783
67	16/9/2021	11:30	46,6	448,9	447,5	0,30663687
68	16/9/2021	11:35	56,6	540,3	540,0	0,05411111
69	16/9/2021	11:40	105,1	983,7	986,4	0,27583131
70	16/9/2021	11:45	117,8	1099,8	1158,4	5,06020373
71	16/9/2021	11:50	142,1	1321,9	1341,5	1,45857622
72	16/9/2021	11:55	56,8	542,1	543,8	0,30882677
73	16/9/2021	12:00	42,4	410,5	428,5	4,20634772
74	16/9/2021	12:05	53,1	508,3	461,9	10,0444252
75	16/9/2021	12:10	67,0	635,4	618,2	2,77725655
76	16/9/2021	12:15	133,2	1240,6	953,9	30,0523535

77	16/9/2021	12:20	135,1	1257,9	1251,8	0,49042978
78	16/9/2021	12:25	134,5	1252,5	1267,7	1,20265047
79	16/9/2021	12:30	129,2	1204,0	1248,3	3,54871425
80	16/9/2021	12:35	129,0	1202,2	1215,9	1,12895797
81	16/9/2021	12:40	126,7	1181,1	1193,7	1,05165452
82	16/9/2021	12:45	128,3	1195,8	1039,4	15,0446027
83	16/9/2021	12:50	111,4	1041,3	1068,0	2,50245318
84	16/9/2021	12:55	137,8	1282,6	1237,9	3,61277971
85	16/9/2021	13:00	74,5	703,9	765,9	8,09061235
86	16/9/2021	13:05	63,3	601,5	562,6	6,92207608
87	16/9/2021	13:10	66,3	629,0	606,7	3,6706115
88	16/9/2021	13:15	71,8	679,3	645,6	5,21229864
89	16/9/2021	13:20	73,7	696,6	670,8	3,84919499
90	16/9/2021	13:25	73,6	695,7	680,8	2,18951234
91	16/9/2021	13:30	74,6	704,8	702,4	0,34854784
92	16/9/2021	13:35	73,5	694,8	677,3	2,58260741
93	16/9/2021	13:40	68,7	650,9	638,5	1,9436805
94	16/9/2021	13:45	65,1	618,0	607,0	1,81205931
95	16/9/2021	13:50	75,6	714,0	650,2	9,8108582
96	16/9/2021	13:55	70,3	665,5	698,5	4,71902649
97	16/9/2021	14:00	84,0	790,8	790,4	0,04845648
98	16/9/2021	14:05	90,8	852,9	865,0	1,39322543
99	16/9/2021	14:10	80,6	759,7	790,0	3,83541772
100	16/9/2021	14:15	104,3	976,4	966,3	1,04166408
101	16/9/2021	14:20	129,5	1206,7	1130,6	6,73483106
102	16/9/2021	14:25	113,6	1061,4	982,5	8,02912977
103	16/9/2021	14:30	97,7	916,0	1057,2	13,3533485
104	16/9/2021	14:35	102,2	957,2	847,1	12,9934364

105	16/9/2021	14:40	96,4	904,1	924,4	2,19128083
106	16/9/2021	14:45	96,2	902,3	916,7	1,56917203
107	16/9/2021	14:50	94,5	886,8	860,8	3,01742565
108	16/9/2021	14:55	92,0	863,9	884,2	2,29371183
109	16/9/2021	15:00	89,7	842,9	860,2	2,01204371
110	16/9/2021	15:05	84,8	798,1	816,0	2,19404412
111	16/9/2021	15:10	89,6	842,0	836,9	0,60678695
112	16/9/2021	15:15	82,9	780,7	746,9	4,5289597
113	16/9/2021	15:20	82,5	777,1	781,8	0,60501407
114	16/9/2021	15:25	82,8	779,8	681,7	14,3923427
115	16/9/2021	15:30	80,3	757,0	787,1	3,82955152
116	16/9/2021	15:35	80,3	757,0	765,5	1,11592423
117	16/9/2021	15:40	77,9	735,0	748,2	1,76198877
118	16/9/2021	15:45	35,9	351,1	407,5	13,8520736
119	16/9/2021	15:50	21,7	221,2	202,1	9,46877783
120	16/9/2021	15:55	19,3	199,3	192,6	3,47642783
121	16/9/2021	16:00	22,1	224,9	205,4	9,49036027
122	16/9/2021	16:05	15,9	168,2	159,9	5,19874922
123	16/9/2021	16:10	11,5	128,0	132,1	3,11279334
124	16/9/2021	16:15	12,2	134,4	142,9	5,95703289
125	16/9/2021	16:20	11,6	128,9	115,8	11,3145078
126	16/9/2021	16:25	49,2	472,6	472,2	0,09347734
127	16/9/2021	16:30	46,3	446,1	412,0	8,2838835
128	16/9/2021	16:35	38,1	371,2	399,9	7,18549637
129	16/9/2021	16:40	35,0	342,8	370,1	7,36962983
130	16/9/2021	16:45	32,8	322,7	342,6	5,8048453
131	16/9/2021	16:50	30,2	298,9	322,2	7,21806331
132	16/9/2021	16:55	27,3	272,4	295,8	7,90006761

133	16/9/2021	17:00	27,4	273,3	289,4	5,54740843
134	16/9/2021	17:05	30,1	298,0	301,4	1,11838089
135	16/9/2021	17:10	25,4	255,1	266,4	4,25608108
136	16/9/2021	17:15	22,4	227,6	233,0	2,30223176
137	16/9/2021	17:20	22,0	224,0	225,3	0,58632934
138	16/9/2021	17:25	18,4	191,1	193,2	1,10362319
139	16/9/2021	17:30	16,2	171,0	164,2	4,11412911
140	16/9/2021	17:35	12,3	135,3	127,4	6,2021978
141	16/9/2021	17:40	9,1	106,0	101,2	4,78972332
142	16/9/2021	17:45	3,4	53,9	38,6	39,7352332
143	16/9/2021	17:50	2,7	47,5	20,2	135,338614
144	16/9/2021	17:55	2,3	43,9	15,2	188,694737
145	16/9/2021	18:00	1,8	39,3	11,0	257,369091

MEDIA DEL ERROR	DESVIACIÓN DEL ERROR
4,32	5,01

ANEXO IV

Validación de resultados del día 16 de septiembre de 2021. Se obtuvo una media de error de 4.32% y una desviación estándar de 5.01%. (en gris los valores mayores a 10 mV para sacar la media y desviación del error)

Fecha	Hora	Acimut librería	Acimut algoritmo	Elevación librería	Elevación algoritmo	% Error Acimut	% Error Elevación
16/9/2021	6:00:00	87,545	87,5461	-2,182	-2,1909	0,0013	0,4079
16/9/2021	6:05:00	87,5432	87,5443	-0,9328	-0,9418	0,0013	0,9648
16/9/2021	6:10:00	87,5402	87,5414	0,7494	0,7373	0,0014	1,6146
16/9/2021	6:15:00	87,5361	87,5373	1,8739	1,8566	0,0014	0,9232
16/9/2021	6:20:00	87,5308	87,532	3,0472	2,8054	0,0014	7,9352
16/9/2021	6:25:00	87,5243	87,5255	4,2484	4,055	0,0014	4,5523
16/9/2021	6:30:00	87,5167	87,5179	5,4645	5,304	0,0014	2,9371
16/9/2021	6:35:00	87,5078	87,509	6,6903	6,5531	0,0014	2,0507
16/9/2021	6:40:00	87,4977	87,4989	7,9216	7,8022	0,0014	1,5073
16/9/2021	6:45:00	87,4864	87,4876	9,1572	9,0513	0,0014	1,1565
16/9/2021	6:50:00	87,4738	87,475	10,3957	10,3005	0,0014	0,9158
16/9/2021	6:55:00	87,4599	87,4611	11,636	11,5496	0,0014	0,7425
16/9/2021	7:00:00	87,4447	87,446	12,8779	12,7986	0,0015	0,6158
16/9/2021	7:05:00	87,4282	87,4294	14,1208	14,0477	0,0014	0,5177
16/9/2021	7:10:00	87,4102	87,4115	15,3646	15,2968	0,0015	0,4413
16/9/2021	7:15:00	87,3908	87,3921	16,6093	16,5459	0,0015	0,3817
16/9/2021	7:20:01	87,37	87,3713	17,8544	17,795	0,0015	0,3327
16/9/2021	7:25:00	87,3476	87,349	19,1	19,0438	0,0016	0,2942
16/9/2021	7:30:00	87,3237	87,325	20,3461	20,293	0,0015	0,2610

16/9/2021	7:35:00	87,2981	87,2995	21,5925	21,5418	0,0016	0,2348
16/9/2021	7:40:00	87,2708	87,2722	22,8385	22,7907	0,0016	0,2093
16/9/2021	7:45:00	87,2418	87,2433	24,0853	24,0395	0,0017	0,1902
16/9/2021	7:50:00	87,2109	87,2124	25,3321	25,2884	0,0017	0,1725
16/9/2021	7:55:00	87,1781	87,1796	26,5792	26,5373	0,0017	0,1576
16/9/2021	8:00:00	87,1432	87,1447	27,8262	27,786	0,0017	0,1445
16/9/2021	8:05:00	87,1063	87,1078	29,0735	29,0349	0,0017	0,1328
16/9/2021	8:10:00	87,067	87,0686	30,321	30,2836	0,0018	0,1233
16/9/2021	8:15:00	87,0254	87,027	31,5684	31,5322	0,0018	0,1147
16/9/2021	8:20:00	86,9812	86,9828	32,8158	32,7808	0,0018	0,1067
16/9/2021	8:25:00	86,9346	86,9363	34,0628	34,0293	0,0020	0,0983
16/9/2021	8:30:00	86,8849	86,8867	35,3108	35,278	0,0021	0,0929
16/9/2021	8:35:00	86,8324	86,8342	36,558	36,5265	0,0021	0,0862
16/9/2021	8:40:00	86,7767	86,7785	37,8056	37,775	0,0021	0,0809
16/9/2021	8:45:00	86,7176	86,7195	39,0528	39,0232	0,0022	0,0758
16/9/2021	8:50:00	86,6549	86,6568	40,3004	40,2715	0,0022	0,0717
16/9/2021	8:55:00	86,5883	86,5903	41,5479	41,5198	0,0023	0,0676
16/9/2021	9:00:00	86,5174	86,5195	42,7955	42,7679	0,0024	0,0645
16/9/2021	9:05:00	86,4421	86,4442	44,0425	44,0159	0,0024	0,0604
16/9/2021	9:10:00	86,3619	86,3641	45,2892	45,2636	0,0025	0,0565
16/9/2021	9:15:00	86,2763	86,2786	46,5368	46,5115	0,0027	0,0544
16/9/2021	9:20:00	86,1852	86,1875	47,7838	47,7592	0,0027	0,0515
16/9/2021	9:25:00	86,0877	86,0901	49,0306	49,0067	0,0028	0,0487
16/9/2021	9:30:00	85,9835	85,986	50,2776	50,2541	0,0029	0,0467
16/9/2021	9:35:00	85,8718	85,8745	51,5244	51,5013	0,0031	0,0448
16/9/2021	9:40:00	85,752	85,7547	52,7705	52,7483	0,0031	0,0421
16/9/2021	9:45:00	85,6231	85,6261	54,0171	53,9952	0,0035	0,0405
16/9/2021	9:50:00	85,4842	85,4873	55,2633	55,2419	0,0036	0,0387

16/9/2021	9:55:00	85,3344	85,3377	56,509	56,4882	0,0039	0,0368
16/9/2021	10:00:00	85,1724	85,1758	57,7545	57,7345	0,0040	0,0346
16/9/2021	10:05:00	84,9962	84,9999	59	58,9801	0,0044	0,0337
16/9/2021	10:10:00	84,8048	84,8087	60,245	60,2257	0,0046	0,0320
16/9/2021	10:15:00	84,5957	84,5998	61,4896	61,4707	0,0048	0,0307
16/9/2021	10:20:00	84,367	84,3713	62,7337	62,7154	0,0051	0,0292
16/9/2021	10:25:00	84,1155	84,1201	63,9775	63,9594	0,0055	0,0283
16/9/2021	10:30:00	83,8377	83,8427	65,2205	65,203	0,0060	0,0268
16/9/2021	10:35:00	83,5297	83,5352	66,4634	66,4459	0,0066	0,0263
16/9/2021	10:40:00	83,1868	83,1927	67,705	67,688	0,0071	0,0251
16/9/2021	10:45:00	82,8021	82,8086	68,9457	68,9291	0,0079	0,0241
16/9/2021	10:50:00	82,3684	82,3755	70,1852	70,1692	0,0086	0,0228
16/9/2021	10:55:00	81,8756	81,8834	71,4234	71,4078	0,0095	0,0218
16/9/2021	11:00:00	81,3117	81,3204	72,6603	72,645	0,0107	0,0211
16/9/2021	11:05:00	80,6598	80,6697	73,8952	73,88	0,0123	0,0206
16/9/2021	11:10:00	79,8984	79,9096	75,1273	75,1127	0,0140	0,0194
16/9/2021	11:15:00	78,9986	79,0116	76,3564	76,3422	0,0165	0,0186
16/9/2021	11:20:01	77,9191	77,9343	77,5815	77,5676	0,0195	0,0179
16/9/2021	11:25:00	76,6024	76,6204	78,8009	78,7876	0,0235	0,0169
16/9/2021	11:30:00	74,963	74,9855	80,0133	80	0,0300	0,0166
16/9/2021	11:35:00	72,8704	72,8978	81,2151	81,2026	0,0376	0,0154
16/9/2021	11:40:00	70,1192	70,1555	82,4011	82,3888	0,0518	0,0149
16/9/2021	11:45:00	66,3601	66,4082	83,563	83,5515	0,0725	0,0138
16/9/2021	11:50:00	60,98	61,0472	84,6851	84,6745	0,1102	0,0125
16/9/2021	11:55:00	52,8346	52,9358	85,7358	85,7265	0,1915	0,0108
16/9/2021	12:00:00	39,8549	40,0115	86,6469	86,6397	0,3929	0,0083
16/9/2021	12:05:00	19,2763	19,5023	87,2748	87,2715	1,1724	0,0038
16/9/2021	12:10:00	352,253	352,492	87,4053	87,4072	0,0678	0,0022

16/9/2021	12:15:00	328,105	328,276	86,9729	86,979	0,0521	0,0070
16/9/2021	12:20:00	312,046	312,147	86,1639	86,1719	0,0324	0,0093
16/9/2021	12:25:00	302,081	302,141	85,1636	85,1724	0,0199	0,0103
16/9/2021	12:30:00	295,656	295,694	84,0676	84,0768	0,0129	0,0109
16/9/2021	12:35:00	291,272	291,298	82,9202	82,9296	0,0089	0,0113
16/9/2021	12:40:00	288,13	288,147	81,7441	81,753	0,0059	0,0109
16/9/2021	12:45:00	285,777	285,789	80,5485	80,5571	0,0042	0,0107
16/9/2021	12:50:00	283,956	283,965	79,3405	79,349	0,0032	0,0107
16/9/2021	12:55:00	282,508	282,516	78,1235	78,1321	0,0028	0,0110
16/9/2021	13:00:00	281,332	281,337	76,9011	76,909	0,0018	0,0103
16/9/2021	13:05:00	280,357	280,361	75,6737	75,6812	0,0014	0,0099
16/9/2021	13:10:00	279,539	279,542	74,443	74,45	0,0011	0,0094
16/9/2021	13:15:00	278,841	278,844	73,2087	73,2159	0,0011	0,0098
16/9/2021	13:20:00	278,24	278,242	71,973	71,9797	0,0007	0,0093
16/9/2021	13:25:00	277,717	277,718	70,7352	70,7417	0,0004	0,0092
16/9/2021	13:30:00	277,258	277,259	69,4962	69,5022	0,0004	0,0086
16/9/2021	13:35:00	276,853	276,853	68,256	68,2615	0,0000	0,0081
16/9/2021	13:40:00	276,492	276,492	67,0148	67,0198	0,0000	0,0075
16/9/2021	13:45:00	276,168	276,169	65,7725	65,7772	0,0004	0,0071
16/9/2021	13:50:00	275,878	275,878	64,5298	64,5341	0,0000	0,0067
16/9/2021	13:55:00	275,614	275,614	63,2863	63,2901	0,0000	0,0060
16/9/2021	14:00:00	275,375	275,375	62,0418	62,0456	0,0000	0,0061
16/9/2021	14:05:00	275,158	275,157	60,7977	60,8007	0,0004	0,0049
16/9/2021	14:10:00	274,958	274,957	59,5527	59,5553	0,0004	0,0044
16/9/2021	14:15:00	274,775	274,775	58,3074	58,3095	0,0000	0,0036
16/9/2021	14:20:00	274,606	274,606	57,062	57,0637	0,0000	0,0030
16/9/2021	14:25:00	274,45	274,45	55,8161	55,8173	0,0000	0,0021
16/9/2021	14:30:00	274,306	274,306	54,5701	54,5708	0,0000	0,0013

16/9/2021	14:35:00	274,172	274,172	53,3235	53,324	0,0000	0,0009
16/9/2021	14:40:00	274,048	274,047	52,0766	52,0767	0,0004	0,0002
16/9/2021	14:45:00	273,932	273,931	50,8307	50,8297	0,0004	0,0020
16/9/2021	14:50:00	273,824	273,823	49,584	49,5825	0,0004	0,0030
16/9/2021	14:55:00	273,723	273,722	48,3369	48,3349	0,0004	0,0041
16/9/2021	15:00:00	273,628	273,628	47,0895	47,0872	0,0000	0,0049
16/9/2021	15:05:00	273,539	273,539	45,8423	45,8394	0,0000	0,0063
16/9/2021	15:10:00	273,456	273,456	44,5956	44,5915	0,0000	0,0092
16/9/2021	15:15:00	273,378	273,377	43,3478	43,3436	0,0004	0,0097
16/9/2021	15:20:00	273,304	273,303	42,1012	42,0957	0,0004	0,0131
16/9/2021	15:25:00	273,235	273,234	40,8534	40,8471	0,0004	0,0154
16/9/2021	15:30:00	273,169	273,169	39,6063	39,5992	0,0000	0,0179
16/9/2021	15:35:00	273,108	273,107	38,3584	38,3504	0,0004	0,0209
16/9/2021	15:40:00	273,05	273,049	37,111	37,1021	0,0004	0,0240
16/9/2021	15:45:00	272,995	272,994	35,8634	35,8536	0,0004	0,0273
16/9/2021	15:50:00	272,943	272,942	34,6158	34,605	0,0004	0,0312
16/9/2021	15:55:00	272,894	272,893	33,3683	33,3563	0,0004	0,0360
16/9/2021	16:00:00	272,847	272,846	32,1208	32,1076	0,0004	0,0411
16/9/2021	16:05:00	272,803	272,803	30,8733	30,8588	0,0000	0,0470
16/9/2021	16:10:00	272,762	272,761	29,6256	29,6101	0,0004	0,0523
16/9/2021	16:15:00	272,723	272,722	28,3783	28,3613	0,0004	0,0599
16/9/2021	16:20:00	272,686	272,685	27,1309	27,1123	0,0004	0,0686
16/9/2021	16:25:00	272,651	272,65	25,8843	25,8635	0,0004	0,0804
16/9/2021	16:30:00	272,617	272,616	24,6368	24,6145	0,0004	0,0905
16/9/2021	16:35:01	272,586	272,585	23,3902	23,3654	0,0004	0,1060
16/9/2021	16:40:00	272,557	272,556	22,1432	22,1166	0,0004	0,1201
16/9/2021	16:45:00	272,529	272,528	20,8967	20,8674	0,0004	0,1402
16/9/2021	16:50:00	272,503	272,502	19,6503	19,6182	0,0004	0,1634

16/9/2021	16:55:00	272,478	272,477	18,4048	18,3694	0,0004	0,1923
16/9/2021	17:00:00	272,455	272,454	17,1592	17,1202	0,0004	0,2273
16/9/2021	17:05:00	272,433	272,432	15,9146	15,871	0,0004	0,2740
16/9/2021	17:10:00	272,413	272,412	14,6702	14,6218	0,0004	0,3299
16/9/2021	17:15:00	272,393	272,393	13,4267	13,3726	0,0000	0,4029
16/9/2021	17:20:00	272,376	272,375	12,1842	12,1234	0,0004	0,4990
16/9/2021	17:25:00	272,359	272,358	10,9431	10,8743	0,0004	0,6287
16/9/2021	17:30:00	272,344	272,343	9,7035	9,625	0,0004	0,8090
16/9/2021	17:35:00	272,33	272,329	8,4664	8,3757	0,0004	1,0713
16/9/2021	17:40:00	272,317	272,316	7,2325	7,1264	0,0004	1,4670
16/9/2021	17:45:00	272,306	272,305	6,0037	5,877	0,0004	2,1104
16/9/2021	17:50:00	272,295	272,294	4,7828	4,6279	0,0004	3,2387
16/9/2021	17:55:00	272,286	272,285	3,5739	3,5786	0,0004	0,1315
16/9/2021	18:00:00	272,277	272,276	2,3862	2,3292	0,0004	2,3887

Media Error Acimut [%]	Desviación Acimut [%]	Media Error Elevación [%]	Desviación Elevación [%]
0,0176	0,1039	0,3244	0,9062

ORDEN DE EMPASTADO