



UNIVERSIDAD NACIONAL

PEDRO RUIZ GALLO

**FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TESIS

Diseño e implementación de un sistema seguidor de luz solar de dos ejes auto compensables en cualquier zona geográfica y estación del año utilizando GPS, para aprovechar la máxima incidencia de luz solar en paneles fotovoltaicos.

Para optar por el título profesional de:

Ingeniero Electrónico

Autor:

Bach. Rosell Arce Omar David

Asesor:

Msc. Ing. Nombera Lossio Martín

Lambayeque – Perú

Octubre, 2021

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

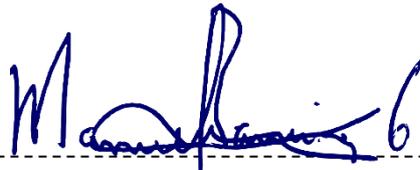
TESIS

Diseño e implementación de un sistema seguidor de luz solar de dos ejes auto compensables en cualquier zona geográfica y estación del año utilizando GPS, para aprovechar la máxima incidencia de luz solar en paneles fotovoltaicos.

Para optar por el título profesional de:

Ingeniero Electrónico

Aprobada por el siguiente jurado:



Ing. Manuel Ramírez Castro

Presidente



Ing. Francisco Segura Altamirano

Secretario



Msc. Ing. Lucía Chamán Cabrera

Vocal

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TESIS

Diseño e implementación de un sistema seguidor de luz solar de dos ejes auto compensables en cualquier zona geográfica y estación del año utilizando GPS, para aprovechar la máxima incidencia de luz solar en paneles fotovoltaicos.

Para optar por el título profesional de:

Ingeniero Electrónico

Autor:



Bach. Rosell Arce Omar David

Asesor:



Msc. Ing. Nombera Lossio Martín

COPIA DEL ACTA DE SUSTENTACIÓN



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DECANATO

Ciudad Universitaria - Lambayeque



ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL N°036- 2021-D/FACFyM

Siendo las 11:00 am del día 29 de Octubre del 2021, se reunieron vía plataforma virtual, <https://meet.google.com/iph-btio-wqb> los miembros del jurado evaluador de la Tesis titulada:

Diseño e Implementación de Un Sistema Seguidor de Luz Solar de Dos Ejes Auto compensables en Cualquier Zona Geográfica y Estación del Año Utilizando GPS, para Aprovechar La Máxima Incidencia de Luz Solar en Paneles Fotovoltaico

Designados por Resolución N° 1653-2018-D/FACFYM de fecha 27 de diciembre del 2018, y la resolución N° 721-2021-VIRTUAL-D/FACFYM, en el sentido de NOMBRAR, a la docente Mg. Ing. Lucia Isabel Chaman Cabrera, como miembro del jurado en reemplazo del docente Mtro. Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera Con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

| | |
|---|------------|
| Ing. Manuel Javier Ramírez Castro | Presidente |
| Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano | Secretario |
| Mg. Ing. Lucía Isabel Chamán Cabrera | Vocal |

La tesis fue asesorada por el Mg. Ing. Martin Augusto Nombera Lossio nombrado por Resolución N° 1069-2018-D/FACFyM de fecha 05 de Setiembre del 2018.

El Acto de Sustentación fue autorizado por Resolución N° 746-2021-VIRTUAL-D/FACFyM de fecha 22 de Octubre del 2021.

La Tesis fue presentada y sustentada por el Bachiller: Rosell Arce Omar David, y tuvo una duración de 30 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el Calificativo de 19 (diecinueve) en la escala vigesimal, mención Muy Bueno.

Por lo que queda apto para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Electrónico**, de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 12:00 pm se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto con la firma de los miembros del jurado.

Ing. Manuel Javier Ramírez Castro
Presidente

Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano
Secretario

Mg. Ing. Lucia Isabel Chaman Cabrera
Vocal

Mg. Ing. Martin Augusto Nombera Lossio
Asesor

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA SEGUIDOR DE LUZ SOLAR DE DOS EJES AUTOCOMPENSABLES EN CUALQUIER ZONA GEOGRÁFICA Y ESTACIÓN DEL AÑO UTILIZANDO GPS, PARA APROVECHAR LA MÁXIMA INCIDENCIA DE LUZ SOL

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Walter Nsengiyumva, Shi Guo Chen, Lihua Hu, Xueyong Chen. "Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018 Publicación | 8% |
| 2 | www.sensormag.com Fuente de Internet | 3% |
| 3 | Swarup Bhunia, Mark Tehranipoor. "A Quick Overview of Electronic Hardware", Elsevier BV, 2019 Publicación | 2% |
| 4 | Hui Liu. "Rail transit collaborative robot systems", Elsevier BV, 2020 Publicación | 1% |
| 5 | mars1980.github.io Fuente de Internet | 1% |

| | | |
|----|--|------|
| 6 | epdf.tips Fuente de Internet | 1 % |
| 7 | W. Bolton. "Control systems", Elsevier BV, 2002 Publicación | 1 % |
| 8 | Jerin Kuriakose Tharamuttam, Andrew Keong Ng. "Design and Development of an Automatic Solar Tracker", Energy Procedia, 2017 Publicación | 1 % |
| 9 | Korzeniewska Ewa, Szczesny Artur, Zawislak Ratal, Seme Sebastian. "The algorithms in tracking photovoltaic systems", 2018 Applications of Electromagnetics in Modern Techniques and Medicine (PTZE), 2018 Publicación | <1 % |
| 10 | www.ijceronline.com Fuente de Internet | <1 % |
| 11 | Dogan Ibrahim. "Introduction", Elsevier BV, 2019 Publicación | <1 % |
| 12 | Bertness, Mark. "Marine Community Ecology and Conservation", Oxford University Press Publicación | <1 % |
| 13 | www.fierceelectronics.com Fuente de Internet | <1 % |



Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

Apagado

Excluir bibliografía

Apagado





Digital Receipt

This receipt acknowledges that Turnitin received your paper. Below you will find the receipt information regarding your submission.

The first page of your submissions is displayed below.

Submission author: Rosell Arce Omar David
Assignment title: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA SEGUIDOR DE ...
Submission title: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA SEGUIDOR DE ...
File name: Tesis_-_STOR-28SEP2021v2.docx
File size: 29.28M
Page count: 99
Word count: 20,682
Character count: 109,726
Submission date: 29-Sep-2021 11:12PM (UTC-0500)
Submission ID: 1661285564

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TESIS

PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

"DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA SEGUIDOR DE LUZ SOLAR DE DOS EJES AUTOCOMPENSABLES EN CUALQUIER ZONA GEOGRÁFICA Y ESTACIÓN DEL AÑO UTILIZANDO GPS, PARA APROVECHAR LA MÁXIMA INCIDENCIA DE LUZ SOLAR EN PANELES FOTOVOLTAICOS"

PRESENTADA POR:
Bach. Rosell Arce Omar David

ASESOR:
Msc. Ing. Numbera Lasso Martín

Lambayeque - Perú
2021

Mg. Ing. Martin Augusto Numbera Lasso

CONSTANCIA DE APROBACIÓN DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo, Martín A. Nombera Lossio, Asesor de tesis, de trabajo de investigación, del estudiante Omar David Rosell Arce, Titulada:

Diseño e implementación de un sistema seguidor de luz solar de dos ejes auto compensables en cualquier zona geográfica y estación del año utilizando GPS, para aprovechar la máxima incidencia de luz solar en paneles fotovoltaicos.

Luego de la revisión exhaustiva del documento constato que la misma tiene un índice de similitud del 18% verificable en el reporte de similitud del programa Turnitin.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Lambayeque, 17 de junio del 2024.



Martín A. Nombera Lossio
DNI: 16688697
Asesor

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo, Omar David Rosell Arce, y Martín Nombera Lossio, asesor del trabajo de investigación “Diseño e implementación de un sistema seguidor de luz solar de dos ejes auto compensable en cualquier zona geográfica y estación del año utilizando GPS, para aprovechar la máxima incidencia de luz solar en paneles fotovoltaicos” declaramos bajo juramento que este trabajo no ha sido plagiado, ni contiene datos falsos. En caso se demostrara lo contrario, asumimos responsablemente la anulación de este informe y por ende el proceso administrativo a que hubiera lugar. Que puede conducir a la anulación del título o grado emitido como consecuencia de este informe.

Lambayeque, 21 de octubre de 2021

Nombre del investigador:



Bach. Rosell Arce Omar David

Nombre del asesor:



Msc. Ing. Nombera Lossio Martín

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme dado la vida, por hacer de mi historia una historia perfecta para mi salvación.

A amada esposa Katherine, quien con su incansable ahínco me encaminó por el sendero hacia la determinación de poder terminar este proyecto, por no dejarme vencer cuando la vida no tenía sentido y ser siempre ese apoyo que necesito.

A mis padres, que con mucho esfuerzo me brindaron hogar, alimento y educación, que me enseñaron a ser consecuentes con mis actos y responsable de mis errores, mi madre Susana que con su amor y oraciones intercedía para que no desfallezca.

A mis amigos Edwin y Miguel que me proporcionaron asistencia e información para la realización de este proyecto.

DEDICATORIA

Para Andrea.

RESUMEN

Se presenta un sistema seguidor solar de 2 ejes cuyo objetivo es maximizar la incidencia de luz solar sobre los paneles fotovoltaicos. Para ello, se diseña un sistema electromecánico controlado por la plataforma de desarrollo BeagleBone Black. Esta plataforma utilizará información de hora, fecha, posición y altitud proveniente de un receptor GPS para calcular, mediante un algoritmo, la posición óptima del panel fotovoltaico.

El sistema posicionará el panel usando dos motores, uno por cada eje, en función de los cálculos y la detección del amanecer. La orientación y elevación del panel serán monitoreadas por dos sensores hasta alcanzar la posición final. Posteriormente, la plataforma de desarrollo tomará dos mediciones instantáneas de voltaje cada 15 minutos: una del panel en el sistema seguidor y otra de un panel fijo con las mismas características. Estas mediciones se almacenarán desde el amanecer hasta el crepúsculo para su comparación final.

Palabras clave: Seguidor Solar, Panel Fotovoltaico, Beaglebone Black, Motor, Sensor.

ABSTRACT

A dual-axis solar tracker system is presented with the objective of maximizing the incidence of sunlight on photovoltaic panels. To achieve this, an electromechanical system controlled by the BeagleBone Black development platform is designed. This platform will use information such as time, date, position, and altitude from a GPS receiver to calculate the optimal position of the photovoltaic panel using an algorithm.

The system will position the panel using two motors, one for each axis, based on the calculations and the detection of sunrise. The orientation and elevation of the panel will be monitored by two sensors until the final position is reached. Subsequently, the development platform will take two instantaneous voltage measurements every 15 minutes: one from the panel in the tracking system and another from a fixed panel with the same characteristics. These measurements will be stored from sunrise to sunset for final comparison.

Keywords: Solar Tracker System, Photovoltaic Panels, Beaglebone Black, Motor, Sensor.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| ÍNDICE..... | XV |
| LISTA DE TABLAS | XVII |
| LISTA DE FIGURAS | XVIII |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| CAPÍTULO I: ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN | 2 |
| INFORMACIÓN GENERAL..... | 2 |
| PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN..... | 2 |
| <i>Síntesis de la situación problemática.....</i> | <i>2</i> |
| <i>Formulación del problema de investigación.....</i> | <i>3</i> |
| <i>Formulación de la hipótesis</i> | <i>3</i> |
| OBJETIVOS | 4 |
| <i>Objetivo general</i> | <i>4</i> |
| <i>Objetivos específicos.....</i> | <i>4</i> |
| DISEÑO TEÓRICO | 4 |
| <i>Antecedentes</i> | <i>4</i> |
| <i>Definición Y Operacionalización De Variables</i> | <i>6</i> |
| <i>Diseño Metodológico</i> | <i>7</i> |
| CAPÍTULO II: DISEÑO TEÓRICO..... | 9 |
| SEGUIDOR SOLAR..... | 9 |
| CLASIFICACIÓN DE SEGUIDORES SOLARES | 11 |
| <i>Seguidores solares basados en la unidad de seguimiento</i> | <i>11</i> |
| <i>Seguidores solares basados en el número de ejes.</i> | <i>14</i> |
| <i>Seguidores solares basados en la estrategia de control.</i> | <i>16</i> |
| <i>Seguidores solares basados en la estrategia de seguimiento.....</i> | <i>18</i> |
| ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA | 20 |
| <i>La Célula Fotovoltaica</i> | <i>20</i> |
| <i>Composición De La Célula Fotovoltaica.....</i> | <i>20</i> |
| <i>El Módulo Fotovoltaico</i> | <i>20</i> |
| <i>El Generador Fotovoltaico.....</i> | <i>21</i> |
| CÁLCULO DE POSICIÓN SOLAR | 22 |
| SISTEMAS EMBEBIDOS..... | 24 |
| <i>Hardware de Sistema Embebido.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Software del Sistema Embebido.....</i> | <i>25</i> |
| <i>Características de los Sistemas Embebidos.</i> | <i>25</i> |
| SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS) | 26 |
| UNIDAD DE MEDICIÓN INERCIAL. | 28 |
| DISTORSIONES HARD-IRON & SOFT-IRON | 30 |
| <i>Distorsión Hard-Iron.</i> | <i>31</i> |
| <i>Distorsión Soft-Iron.</i> | <i>33</i> |
| MOTORES PASO A PASO..... | 36 |
| MICROCONTROLADORES..... | 39 |
| COMUNICACIÓN SERIAL..... | 39 |
| CAPÍTULO III: DISEÑO METODOLÓGICO | 42 |
| BEAGLEBONE BLACK | 42 |
| SOFTWARE EAGLE 7.6.0..... | 43 |
| DIAGRAMA ESQUEMÁTICO EN SOFTWARE EAGLE 7.6.0 | 44 |
| DIAGRAMA PCB EN SOFTWARE EAGLE 7.6.0..... | 45 |
| MÓDULO ADAFRUIT ULTIMATE GPS v3..... | 46 |
| MÓDULO ALTIIMUV5..... | 47 |
| MÓDULO DE CONTROL DE MOTOR PASO A PASO. | 49 |
| CONVERTIDOR LÓGICO DE NIVEL..... | 50 |

| | |
|---|-----------|
| ATENUADOR DE VOLTAJE PARA PANELES SOLARES | 50 |
| DISEÑO DE SOFTWARE. | 51 |
| ECLIPSE IDE 2020-12..... | 52 |
| DESARROLLO DE SOFTWARE..... | 53 |
| PROCESO DE FABRICACIÓN DEL SEGUIDOR SOLAR DE 2 EJES..... | 55 |
| FABRICACIÓN DE LA PLACA DE CIRCUITO IMPRESO | 55 |
| FABRICACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SEGUIDOR SOLAR | 58 |
| ENSAMBLADO DE LOS DISPOSITIVOS MECÁNICOS Y ELÉCTRICOS..... | 61 |
| PREPARACIÓN DEL BEAGLEBONE BLACK. | 62 |
| PREPARACIÓN DEL IMU..... | 64 |
| CAPÍTULO IV: PRUEBAS Y RESULTADOS | 68 |
| FUNCIONAMIENTO DEL SEGUIDOR SOLAR | 68 |
| TOMA DE MUESTRAS..... | 72 |
| ALCANCES Y LIMITACIONES | 74 |
| <i>Alcances.....</i> | <i>74</i> |
| <i>Limitaciones.....</i> | <i>75</i> |
| CÁLCULO PRESUPUESTAL. | 75 |
| CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 77 |
| CONCLUSIONES | 77 |
| RECOMENDACIONES..... | 77 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 79 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 - Cuadro de variables dependientes. | 6 |
| Tabla 2 - Cuadro de variables independientes. | 7 |
| Tabla 3 - Descripción de la sentencia GPRMC | 28 |
| Tabla 4 - Tabla de Polaridades de motor | 37 |
| Tabla 5 - Principales características de Beaglebone Black. | 43 |
| Tabla 6 - Comparativa entre cálculo de seguidor solar vs herramienta Suncalc. | 71 |
| Tabla 7 - Costo de herramientas | 75 |
| Tabla 8 – Costo de materiales para seguidor solar. | 76 |
| Tabla 9 - Costo de mano de obra y servicios. | 76 |
| Tabla 10 - Cálculo total del proyecto. | 76 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Ilustración de ángulo azimutal, zenit y de elevación | 10 |
| Figura 2 - Seguidor Solar Pasivo | 12 |
| Figura 3 - Diagrama de Bloque de Seguidor Solar Activo | 13 |
| Figura 4 - Secuencia Lógica de Control de Proceso de un Seguidor Solar Activo | 14 |
| Figura 5 - Estructura Genérica de un Seguidor Solar de Lazo Cerrado | 17 |
| Figura 6 - Estructura Genérica de una Configuración de Seguidor Solar de Lazo abierto . | 18 |
| Figura 7 - Sistema Embebido, Raspberry Pi 4 Modelo B | 24 |
| Figura 8 - Sentencia GPRMC | 27 |
| Figura 9 - Ángulos de rotación según su eje. | 29 |
| Figura 10 - Lectura magnética con distorsión mínima | 31 |
| Figura 11 - Un gráfico de datos del magnetómetro que muestra la distorsión de Hard-Iron, exhibida por un desplazamiento constante tanto en X como en Y | 32 |
| Figura 12 - Efecto de Soft-Iron que distorsiona el círculo ideal en una forma elíptica..... | 33 |
| Figura 13 - Una elipse generada como resultado de la distorsión de Soft-Iron, centrada en (0,0) con rotación θ | 34 |
| Figura 14 - Alineación de los ejes mayor y menor de la elipse con los ejes X e Y del sistema de coordenadas, respectivamente, después de la rotación | 35 |
| Figura 15 - Los principios básicos del motor paso a paso de imanes permanentes (2 fases) con un rotor que da pasos de 90° | 37 |
| Figura 16 - Principios básicos de un motor paso a paso de reluctancia variable trifásico .. | 38 |
| Figura 17 - Circuito controlador SAA 1027 para un motor paso a paso de 12V de 4 fases | 38 |
| Figura 18 - Puerto de comunicaciones paralelo..... | 40 |
| Figura 19 - Puerto de comunicaciones serie | 40 |
| Figura 20 - Transmisión en serie | 41 |
| Figura 21 - Panel de Control del software EAGLE 7.6.0 con previsualización..... | 44 |
| Figura 22 - Diseño esquemático del seguidor solar de doble eje | 45 |
| Figura 23 - Diagrama PCB del seguidor solar de doble eje | 46 |
| Figura 24 - Diseño esquemático del Módulo “Adafruit Ultimate GPS v3” | 47 |
| Figura 25 - Diagrama esquemático de AltiIMUv5 de Pololu..... | 48 |
| Figura 26 - Diseño esquemático del módulo controlador del motor paso a paso..... | 49 |
| Figura 27 - Diseño esquemático del módulo convertidor lógico de nivel usando el circuito integrado 74HC245..... | 50 |
| Figura 28 - Diseño esquemático del circuito divisor de voltaje | 51 |
| Figura 29 - Interfaz de principal del Eclipse 2020-12 | 52 |
| Figura 30 - Diagrama de Flujos del Seguidor Solar de 2 Ejes | 53 |
| Figura 31 - Diagrama de ruteo para la placa de circuito impreso..... | 55 |
| Figura 32 - Tarjeta Principal para entrada de interfaces del sistema seguidor solar de 2 ejes (anverso)..... | 56 |
| Figura 33 - Tarjeta principal para entrada de interfaces con Beaglebone Black (reverso) . | 57 |
| Figura 34 - Tarjeta Principal para entrada de interfaces con Beaglebone Black instalado . | 57 |
| Figura 35 - Tapa superior con anclaje a motor PaP (izquierda) y Tapa inferior con anclaje para módulos controladores y tarjeta principal (derecha) | 58 |
| Figura 36 - Tapa lateral de la estructura del seguidor solar..... | 59 |
| Figura 37 - Estructura de soporte para los motores paso a paso (PaP)..... | 59 |
| Figura 38 - Parte superior del seguidor solar con canales para el paso de cables hacia los motores | 60 |
| Figura 39 - Soporte para el motor de elevación..... | 60 |
| Figura 40 - Estructura inferior para anclaje de las tarjetas del seguidor solar..... | 61 |

| | |
|---|----|
| Figura 41 - Ensamblado eléctrico de los dispositivos a la tarjeta principal del seguidor solar | 61 |
| Figura 42 - Ensamblado de los soportes para los motores de elevación y azimuth | 62 |
| Figura 43 - Ensamblado total del seguidor solar de 2 ejes | 62 |
| Figura 44 - Principales interfaces del Beaglebone Black | 64 |
| Figura 45 - Lectura magnética cruda salida del sensor | 65 |
| Figura 46 - Resultados de la calibración usando Magneto | 66 |
| Figura 47 - Ejemplo de código para calcular el ángulo de elevación calibrado usando la Ecuación 18. | 67 |
| Figura 48 - Muestra los mensajes de salida al no encontrar más de 4 satélite | 68 |
| Figura 49 - Se muestra que el GPS ha inicializado pero el ángulo de elevación es menor a cero | 69 |
| Figura 50 - Funcionamiento ideal del Seguidor Solar | 70 |
| Figura 51 - Uso de la herramienta Suncalc.org | 71 |
| Figura 52 - Gráfica comparativa entre seguidor solar y panel fijo (horizontal) para Lima. | 72 |
| Figura 53 - Gráfica comparativa entre seguidor solar y panel fijo (horizontal) para Pay Pay | 73 |
| Figura 54 - Gráfica comparativa entre seguidor solar y panel fijo (horizontal) para Chiclayo..... | 73 |
| Figura 55 - Gráfica comparativa entre cada localidad según lo censado del seguidor solar vs el panel fijo..... | 74 |
| Figura 56 - Gráfica comparativa entre cada localidad según el porcentaje de voltaje acumulado en el día por el seguidor solar vs el panel fijo..... | 74 |

INTRODUCCIÓN

Aprovechar la energía proveniente de la luz solar se puede lograr de varias formas, principalmente con el uso de paneles fotovoltaicos, que convierten los rayos del sol en energía eléctrica, estos paneles generarán energía en mayor o menor medida dependiendo de la incidencia de luz solar que recaiga sobre ellos. Esta incidencia de luz solar sobre los paneles puede verse afectada por varios tipos de factores, uno de ellos y el principal es el clima, ya que no es lo mismo recibir luz solar en un día despejado que uno lluvioso o nublado; otro de los factores determinantes es la posición relativa del panel respecto a los haces de luz solar, debido que mientras más perpendicular esté el panel respecto de los haces de luz solar mayor será la generación de energía por el panel.

Asumiendo que tengamos un hermoso día soleado, podemos sacar ventaja de la incidencia de luz solar sobre los paneles fotovoltaicos que tengan una posición fija relativa al sol, esto se puede lograr mediante el uso de un sistema seguidor solar, el cual, se puede definir como un dispositivo electromecánico que mediante diferentes métodos es capaz de ajustar automáticamente su posición relativa al sol, haciéndose valer de información como las coordenadas del panel, la fecha, la hora y la altura. Toda esta información es importante, debido a que la incidencia sobre un punto fijo no es la misma hoy que mañana, a causa del movimiento de traslación de la tierra, es ahí donde nace la necesidad de poder presentar este proyecto de **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA SEGUIDOR DE LUZ SOLAR DE DOS EJES AUTOCOMPENSABLES EN CUALQUIER ZONA GEOGRÁFICA Y ESTACIÓN DEL AÑO UTILIZANDO GPS, PARA APROVECHAR LA MÁXIMA INCIDENCIA DE LUZ SOLAR EN PANELES FOTOVOLTAICOS.**

CAPÍTULO I: ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN

Información General

- **Título:**
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA SEGUIDOR DE LUZ SOLAR DE DOS EJES AUTOCOMPENSABLE EN CUALQUIER ZONA GEOGRÁFICA Y ESTACIÓN DEL AÑO UTILIZANDO GPS, PARA APROVECHAR LA MÁXIMA INCIDENCIA DE LUZ SOLAR EN PANELES FOTOVOLTAICOS.
- **Autor:**
Omar David Rosell Arce
- **Asesor Metodológico:**
Msc. Ing. Martín Nombera Lossio
- **Línea De Investigación:**
Tecnológico - Físico
- **Lugar:**
Chiclayo, Lambayeque.
- **Duración Estimada Del Proyecto:**
7 meses
- **Fecha De Inicio:**
Diciembre, 2020
- **Fecha De Término:**
Junio, 2021

Planteamiento De La Investigación

Síntesis de la situación problemática

En una época en la que vivimos en el uso de dispositivos eléctricos y electrónicos el consumo de energía se ha ido incrementando y con ello la búsqueda de fuentes de energía

que sean constantes en el tiempo, de fácil acceso y lo menos contaminantes posibles; encontramos tres que ahora son las más usadas: la energía eólica, la energía hídrica y la energía solar.

Cada una de estas fuentes de energía necesita ciertas condiciones para ser aprovechables, es el caso de la energía eólica que necesita una fuente de preferencia constante de viento que pueda mover las hélices para que un generador convierta ese movimiento en energía, similarmente ocurre con la energía hídrica en la cual se aprovecha las caídas de agua para mover los generadores de energía; sin embargo en casi todos los lugares del planeta existe incidencia de luz solar (al igual que el agua o el viento en mayor o menor medida) la cual la convierte en una fuente de energía altamente aprovechable haciendo uso de paneles fotovoltaicos; los paneles fotovoltaicos se encargan de convertir la incidencia de luz solar que recae sobre la superficie del panel solar en energía eléctrica y la eficiencia del panel solar se debe en gran medida a la perpendicularidad con la que recaiga el haz de luz solar sobre la superficie del panel solar.

Para lograr esta eficiencia en los paneles solares, se requiere hacer un estudio preliminar de, el lugar donde se instalarán dichos paneles (coordenadas), la época del año ya que de esto depende la translación del sol, y la hora para saber la altura del sol con respecto al panel. Todos estos factores tienen que ser considerados al momento de montar el panel mediante un sistema responsivo que se adapte a estos cambios, de manera automática y que permita la versatilidad de mover los paneles de una locación a otra sin necesidad de estar reajustando las configuraciones.

El sistema permitiría un tiempo de funcionamiento casi de inmediato, permitiendo auto adaptarse a cualquier zona geográfica donde haya una fuente de luz solar aprovechable, aumentando la cantidad de luz absorbida por el panel solar.

Formulación del problema de investigación

¿Cómo se puede aprovechar mejor la luz del sol para alimentar un panel fotovoltaico, en cualquier fecha, hora del día y posición geográfica de forma automática?

Formulación de la hipótesis

La solución podría llevarse a cabo mediante un seguidor de luz solar de dos ejes; el cual, un eje, permitiría la compensación de translación del sol dependiendo de la época del año y la posición global del seguidor, calculada por el sistema GPS. El otro eje, permitiría la compensación de la altura del sol a las diferentes horas del día trabajando junto a un

sistema retroalimentado de sensores de inclinación que en conjunto permitirían aprovechar la máxima incidencia de luz solar sobre el panel fotovoltaico.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema retroalimentado de seguidor de luz solar de dos ejes, permitiendo que los paneles puedan aprovechar mejor la luz del día, compensando automáticamente el movimiento de translación del sol en cualquier época del año y zona geográfica.

Objetivos específicos

- Diseñar e implementar un circuito electrónico para el seguidor solar retroalimentado.
- Desarrollar un software capaz de calcular la mejor posición en dos planos para el panel solar.
- Diseñar e implementar un sistema electromecánico para el posicionamiento del panel.
- Demostrar que los paneles del seguidor solar de doble eje absorben más luz que los seguidores solares fijos.

Diseño Teórico

Antecedentes

- **PAULO CESAR MANCCO LEANDRO**

Pontificia Universidad Católica del Perú – Junio del 2015.

SEGUIDOR SOLAR DE PANELES FOTOVOLTAICOS PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL AISLADA CON AVISO PREVENTIVO DE MANTENIMIENTO

RESUMEN: La falta de electrificación rural en el Perú ha sido uno de los problemas sociales más importantes y menos trabajados desde hace varios años. Debido a la difícil y costosa tarea de generar y distribuir electricidad por medio de torres de alta tensión, en ciertas zonas del país (zonas de electrificación aislada); se consideró

invertir en el uso de energías renovables que no sean costosas y permitan al poblador contar con la energía suficiente para mejorar su condición de vida. Una de las energías renovables de mayor uso es la energía solar por su fácil manejo y acceso. Ésta se puede recolectar por medio de paneles fotovoltaicos que generan electricidad, la cual se puede almacenar en un banco de baterías para su uso en caso de no disponer del sol. Además para mejorar el rendimiento de la generación de energía, se puede implementar un seguidor solar que permite orientar los paneles fotovoltaicos en dirección a la posición del sol la mayor parte del día. El presente trabajo tiene como finalidad, diseñar un sistema mecatrónico que permita situar dos paneles fotovoltaicos en dirección a la posición del Sol. Esto con el fin de aprovechar de la mejor manera los niveles de radiación que inciden en los paneles solares, buscando obtener mayor energía para el consumo del hogar. Además, el sistema es capaz de informar sobre los problemas típicos, como lo son la suciedad de los paneles y las fallas técnicas del inversor, que pueden o no ser solucionadas por el usuario. En caso estas fallas existan el sistema pasará a mostrar al usuario una señal que le informará que el sistema mecatrónico requiere de un mantenimiento lo antes posible. Se tiene como objetivo que el sistema mecatrónico no sea de un precio elevado para su producción e instalación en zonas aisladas del Perú.

- **JERIN KURIAKOSE T., ANDREW KEONG N.**

University of Glasnow – Singapure, Julio del 2017.

**DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC SOLAR TRACKER
(DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SEGUIDOR SOLAR AUTOMÁTICO)**

RESUMEN: La crisis energética es uno de los temas más importantes en el mundo de hoy. Los recursos energéticos convencionales no solo son limitados y costosos, sino también la principal causa de contaminación ambiental. La contaminación ambiental y el creciente costo de los combustibles fósiles han atraído una atención considerable hacia las fuentes de energía renovables. La energía solar, al ser la fuente de energía renovable más limpia y confiable, se utiliza ampliamente en los sistemas térmicos para calentar el agua y el aire. Ofrece una gran oportunidad para que las organizaciones públicas y privadas reduzcan las emisiones de carbono y reduzcan los costos de electricidad. Un enfoque viable para maximizar la eficiencia del panel solar es el seguimiento solar. Este documento, por lo tanto, propone un seguidor solar automático basado en un microcontrolador con un algoritmo híbrido para ubicar la

posición del sol. El algoritmo de seguimiento solar híbrido propuesto combina sensores y modelos matemáticos para determinar la posición precisa del sol, aprovechando así la energía solar óptima para todas las condiciones climáticas. Los resultados experimentales muestran consistentemente que el algoritmo de seguimiento solar híbrido puede producir una mayor potencia solar que los algoritmos tradicionales activos y cronológicos. También se desarrolló una página web para facilitar el monitoreo en tiempo real de los datos solares. Como tal, el proceso de seguimiento solar está completamente automatizado, lo que maximiza la recolección y gestión de la energía solar para los sistemas solares térmicos.

Definición Y Operacionalización De Variables

En el presente trabajo de tesis se distinguen las siguientes variables:

| VARIABLES | | DIMENSIONES | DEFINICIÓN OPERACIONAL | INDICADORES |
|--------------------|--|-----------------------------|---|---|
| DEPENDIENTE | Aprovechamiento eficiente de la radiación solar en celdas solares. | Ángulo de incidencia solar. | Absorber de la manera mas directa el haz de radiación solar que incide sobre la celda y/o panel solar, buscando la perpendicularidad entre el haz y la celda y/o panel. | Ángulo de elevación. |
| | | | | Ángulo Azimutal. |
| | | | | Ángulo Cenital. |
| | | | | Voltaje de Salida de Panel Fotovoltaico |

Tabla 1 - Cuadro de variables dependientes.

| VARIABLES | | DIMENSIONES | DEFINICIÓN OPERACIONAL | INDICADORES |
|----------------------|---|--|---|-----------------------|
| INDEPENDIENTE | Diseño e implementación de Sistema Seguidor Solar Retroalimentado con GPS | Sistema Seguidor Solar Retroalimentado con GPS | Dispositivo embebido que cuenta con Microprocesadores programables y sensores que permiten al panel solar posicionar de la mejor manera para aprovechar la luz solar. | Número de Interfaces. |
| | | | | Número de Sensores |
| | | | | Número de Ejes. |
| | | | | Número de Motores. |

Tabla 2 - Cuadro de variables independientes.

Diseño Metodológico

Diseño De Contrastación De Hipótesis

Para la comprobación de la hipótesis, se utilizará el modelo de consecuencias lógicas, detallando que, se procederá a construir una estructura mecánica para la implementación del seguidor solar, luego a revisar la bibliografía para definir las fórmulas necesarias que permitan calcular las variables dependientes de esta investigación, desarrollando el software para obtener la más precisa perpendicularidad de la incidencia solar sobre el panel fotovoltaico.

Luego del diseño del desarrollo de Software, se inicia la etapa de simulación en la cual se procederá a insertar de manera manual la data del GPS para diferentes partes del mundo (ejemplo en Europa que tiene más horas de día que de noche) posterior a eso continuamos con implementación de la estructura mecánica que permita el movimiento de la celda y/o panel, adhiriendo a ella los microcontroladores, sensores y actuadores necesarios para el fin de esta investigación. Finalmente, se recopilará información dos modos:

- Modo Fijo: Modo en el cual el panel permanece en una sola posición durante todo el día.
- Modo Eje Dual: Modo en el cual usaremos ambos ejes para la compensación de la traslación y altura del sol.

Luego de recopilar la información ambos modos, se procederá a compararla y dictaminar las conclusiones de la investigación.

Población

La población de esta investigación es cualquier zona geográfica con superficie estable y firme dónde el receptor GPS puede captar como mínimo la señal clara de 4 satélites.

Muestra

La muestra de esta investigación se llevará a cabo en 3 zonas distintas:

- Chiclayo, región de Lambayeque. (zona urbana)
- Pay Pay, región de Cajamarca (zona rural)
- Lima, región de Lima. (zona urbana)

CAPÍTULO II: DISEÑO TEÓRICO

Seguidor Solar

A lo largo de este proyecto de tesis vamos a ver muchas veces el término Seguidor Solar (SS), este dispositivo es la base del proyecto en el cual todos los componentes ya sean sensores, actuadores, etc., formarán una sola estructura para la implementación del Seguidor Solar.

El primer Seguidor Solar (SS) fue introducido por Finster (1962). Este sistema mecánico mostraba un pequeño incremento de desempeño sobre los sistemas fijos. Un año después, Saavedra(1963) presentó una versión mejorada mostrando una unidad automática electrónica de control y un pirheliómetro para medir la cantidad de radiación directa. McFee(1975) sugirió otro tipo de Seguidor Solar con un algoritmo diferente que era capaz de computar el total de potencia solar recibida y el flujo de densidad distribución en un sistema central de potencia solar(Lee et al., 2009). El sistema ofrecía un conjunto de espejos y la posición solar era calculada sumando las contribuciones de todas las unidades individuales. La tolerancia estimada de dicho sistema era de entre 0.5° y 1° . Años más tarde, Sema e Imanura(1980) usaron un microprocesador para ajustar adaptativamente la posición de los colectores solares de un concentrador solar Fotovoltaico. Después de eso, muchos otros investigadores siguieron muchos modelos matemáticos que fueron desarrollados para mejorar los algoritmos(Walraven, 1978). Mejoras significantes en la precisión de los seguidores solares fueron anunciadas en 1985, después del trabajo de Badescu(1985) en cual él demostró la influencia astronómica y parámetros constructivos en la concentración de la radiación solar en las superficies de sistemas fotovoltaicos.

La tierra rota alrededor del sol en una órbita elíptica con una inclinación de 23.441° con respecto al ecuador celestial (Sproul, 2007) y la posición instantánea del sol se describe como un ángulo llamado "Ángulo Horario (ω)" representando la distancia entre el meridiano que pasa a través del sol y el meridiano del lugar. Este ángulo es cero al medio día y se incrementa al este por la tarde. Se incrementa en 15° para cada hora siguiendo a la dirección longitudinal y se atribuye tanto valores positivos y negativos antes y por la tarde respectivamente (Mousazadeh et al., 2009). Por otro lado, el ángulo de latitud (ϕ) especifica la ubicación y toma valores positivos y negativos en los hemisferios norte y sur respectivamente. El ángulo entre la línea que une los centros de ambos el sol y la tierra y su proyección sobre el plano ecuatorial se llama "ángulo de declinación solar δ " (Michalsky, 1950). Existen muchos modelos para calcular la radiación solar, tanto la radiación directa y

la radiación difusa. La principal diferencia entre estos modelos reside en el concepto de que la radiación difusa está isotópicamente distribuida en el cielo o no (Gulin et al., 2013). Para una mejor comprensión de estos modelos, es importante entender otros dos ángulos importantes a saber. la altura y el azimut y sus medidas específicas las cuales están en función de la ubicación geográfica bajo consideración (Yilmaz et al., 2015). El ángulo de azimut solar (γ_s) indica el ángulo de inclinación entre la radiación solar y el norte siguiendo la dirección hacia las agujas del reloj. El ángulo de azimut de la superficie (γ) representa el ángulo de desviación entre las superficies verticales de la longitud local. Esta longitud local es igual a 0° para las superficies orientadas al sur y toma valores positivos y negativos para el este y el oeste frente con respecto a la superficie. El ángulo de elevación (α_s) define el ángulo entre la radiación solar y el horizonte. El ángulo de incidencia (θ) describe el ángulo entre la normal de la superficie y los rayos del sol. El ángulo cenital (θ_z) representa el ángulo entre el haz de radiación solar y la normal de la superficie horizontal. Por último, el ángulo de inclinación (β) designa la que existe entre la superficie y el horizonte y siempre toma valores positivos para la superficie que mira al ecuador. La Figura 1 a continuación describe todos los parámetros de ángulo definido anteriormente.

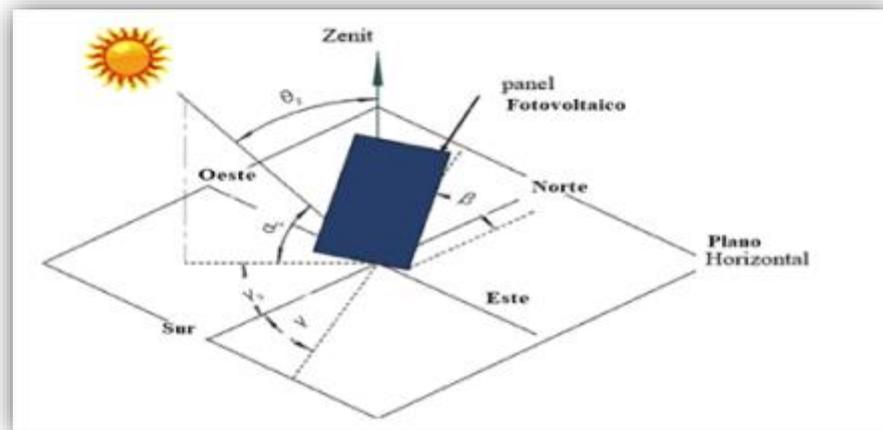


Figura 1 - Ilustración de ángulo azimutal, zenit y de elevación

Fuente: (Nsengiyumva et al., 2018)

El ángulo óptimo en el que el seguidor solar debe montarse depende tanto de la latitud del sitio y el propósito del sistema (Kaldellis & Zafirakis, 2012).

Los seguidores solares controlan la posición relativa del sol durante el día y la cantidad de electricidad generada es una medida directa de la cantidad de radiación solar recogida por la superficie sensible del sistema (Zhong et al., 2011). Los datos de la radiación

solar y la entrada de energía al sistema se dan a menudo en forma de radiación global y se calculan en tres pasos. Los datos del lugar se utilizan para determinar la difusión y componentes del haz de la radiación solar global instantánea mensual. Los resultados obtenidos anteriormente se utilizan a continuación, con la irradiación solar diaria extraterrestre para calcular el índice de claridad. Por último, se usa una dependencia angular apropiada de cada componente para determinar las partes difusas y de haz de la radiación solar en la superficie inclinada. Con un cierto margen para la reflectividad de la zona de los alrededores, el albedo también se puede trabajar fácilmente. La radiación solar diaria total recogida por la superficie inclinada se obtiene entonces mediante la suma de los tres componentes (Mousazadeh et al., 2009).

Los Seguidores Solares están diseñados para seguir al sol ya sean de uno o más ejes para mantener la superficie de detección del panel fotovoltaico perpendicular a la dirección del haz de radiación solar. Otros aspectos deseables incluyen, pero no se limitan al reposicionamiento nocturno del seguidor para anticipar la salida del sol, compensar los cambios de tiempo y la estación observados en altitud, latitud y azimut ángulos del sol. La intención principal es aumentar la cantidad de radiación solar recibida por el sistema, por lo tanto, la electricidad solar total recogida. Estudios (Yilmaz et al., 2015) revelan que los seguidores de eje dobles son más precisos y accesibles en comparación con sus homólogos simples y múltiples ejes. Son particularmente más atractivos y siempre rinden más del 98,5% de su eficiencia de seguimiento completo, incluso cuando el objetivo está 10° grados por debajo. A pesar de las pequeñas desviaciones del objetivo normalmente no causan grandes pérdidas en energía, pero pequeños errores de seguimiento todavía deben reducirse al mínimo para asegurar la máxima ganancia de energía en base a largo plazo. En general, buenas ubicaciones, la ganancia de energía anual total del seguidor solar de doble eje oscila entre 30% y 40%, pero incluso podría alcanzar 20% por debajo de sus capacidades de seguimiento máximo en los lugares más nublados e impredecibles.

Clasificación de seguidores solares

Seguidores solares basados en la unidad de seguimiento

Seguidores Solares Pasivos

Seguidores solares pasivos siguen al sol sin ningún tipo de accionamientos mecánicos para orientar sus unidades de detección hacia la dirección del haz de radiación

solar. Tienen estructuras menos complejas y no presentan ninguna limitación de implementación de hardware o desventajas(Poulek, 1994). Su funcionamiento es bastante simple, la mayoría de ellos tienen un par de actuadores, rellenos de gas expansible o de metales con efecto térmico de memoria(Clifford & Eastwood, 2004), Trabajando uno contra el otro y equilibrando por igual la iluminación. Esta última induce una expansión térmica del gas expansible o efecto térmico de memoria. Cualquier iluminación diferencial provoca fuerzas desequilibradas dentro de los actuadores, por lo tanto, una realineación de los dispositivos de detección hacia la dirección donde se restableció una iluminación igual de actuadores y de equilibrio de fuerzas. La Ilustración 02 indica un simple seguidor solar pasivo de dos tubos cilíndricos iguales rellenos de un fluido expansible.

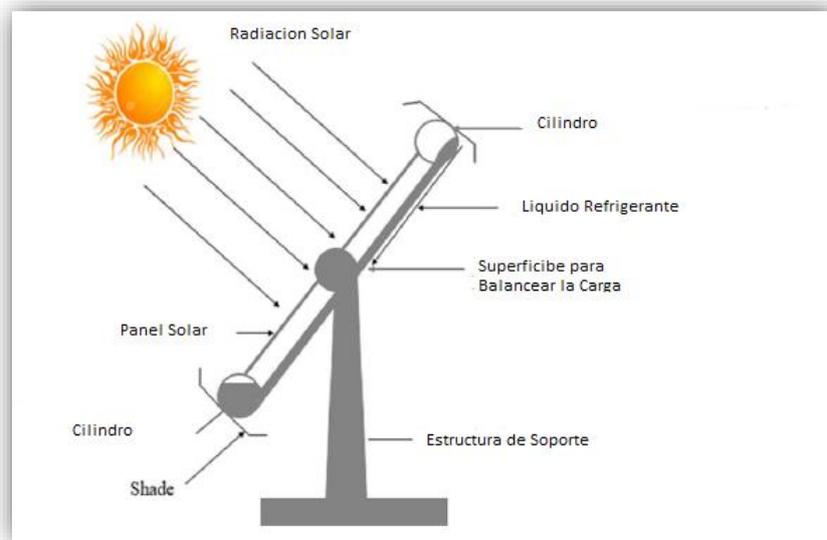


Figura 2 - Seguidor Solar Pasivo

Fuente: (Nsengiyumva et al., 2018)

A medida que se calienta el gas líquido en un lado (iluminación desigual), se expande y fluye hacia el otro lado del seguidor causando una fuerza gravitacional desequilibrada, por lo tanto, se consigue que el rastreador incline los paneles hacia el sol hasta alcanzar el punto de igual iluminación(Parmar et al., 2015). Estos seguidores solares pasivos utilizando el gas líquido son más ventajoso porque ellos no tienen la tensión alta torsión en sus ejes de chasis. El gas licuado crea un pequeño peso diferencial suficiente para desplazar todo el chasis a una posición relevante. Sus chasis están fuertemente soldados y no se pueden aflojar incluso después de periodos prolongados de viento, haciéndolos bastante confiable y costo eficiente. Por otra parte, sus piezas presentan una alta resistencia al desgaste; por lo tanto, no causan ningún alto costo de mantenimiento. Sin embargo, estos sistemas necesitan ajustes

estacionales del norte al sur del eje, retocar la pintura, y la lubricación anual de los rodajes para un desplazamiento suave(Mousazadeh et al., 2009).

Seguidores Solares Activos

Seguidores activos también se llaman seguidores continuos y usan sensores, así como los motores eléctricos para su funcionamiento. Los sensores (en su mayoría dos) ayudan a determinar continuamente la posición del sol en el cielo y utiliza los motores para ajustar la orientación de sus paneles. Sus algoritmos generales de diseño y control genérico se representan en las Ilustraciones 03 y 04, respectivamente.

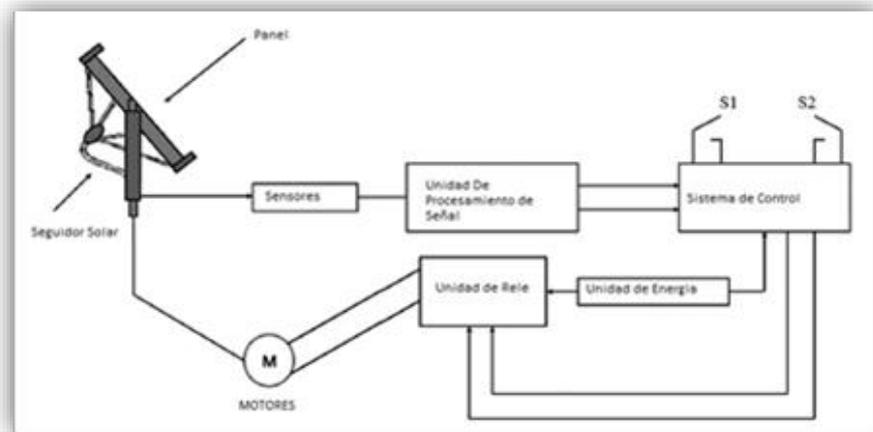


Figura 3 - Diagrama de Bloque de Seguidor Solar Activo

Fuente: (Nsengiyumva et al., 2018)

Los seguidores solares activos tienen un par de sensores que genera una señal compuesta que desencadena los motores o actuadores para mover sus paneles solares hacia el haz de radiación solar. Cuando el haz de radiación solar y el panel solar del rastreador no están normalmente alineados estos sensores son activados por una iluminación diferente creando una señal diferencial que se utiliza para determinar la dirección en la que el rastreador tiene que ser dirigido (Ver Ilustración 04). El movimiento del rastreador se detiene cuando los dos sensores están igualmente iluminados, es decir, el haz de radiación solar es perpendicular al módulo fotovoltaico. La literatura(Mousazadeh et al., 2009) indica que este método de seguimiento solar es bastante exacto, excepto en días muy nublados, cuando se hace muy difícil para los sensores para determinar con precisión la posición relativa del sol.



Figura 4 - Secuencia Lógica de Control de Proceso de un Seguidor Solar Activo

Fuente: (Nsengiyumva et al., 2018)

Seguidores solares activos suelen clasificarse como microprocesador y seguidores solares basados en sensores electroópticos, seguidores solares computarizados basados en tiempo y fecha, rastreadores de celda solar bifacial auxiliar, así como los rastreadores que ofrecen una combinación de los tres tipos anteriores. Todos los rastreadores electroópticos generalmente tienen como mínimo un par de fotosensores antiparalelas que están eléctricamente equilibrado (por la misma cantidad de luz de ambas unidades) para asegurarse de que haya señal de control pequeña para activar los motores. En celdas solares bifaciales auxiliar, la célula solar bifacial detecta la luz del sol y acciona el sistema en la posición deseada en la fecha y hora controlado por computadora, una computadora utiliza algoritmos de fecha y hora determinar la posición del sol y crean señales para el control del sistema.

Seguidores solares basados en el número de ejes.

Los mejores rendimientos en seguidores solares se logran a través de un número de dispositivos de control de seguimiento en cualquiera de los sistemas de doble o individual eje de seguimiento solar (Beckman & Duffie, 1991). Si no son optimizados, estos sistemas sufren de bajo rendimiento y poca precisión debido a su incapacidad para determinar la posición exacta del sol (Clifford & Eastwood, 2004). El seguidor solar de eje doble necesita al menos un par de motores, uno para azimut solar y otro para ángulos de inclinación solares de seguimiento. A pesar de que los seguidores solares de doble eje son más caros y requieren más trabajo para la aplicación, ofrecen un mejor rendimiento en comparación con sus homólogos de eje único (Mavromatakis, 2008). La cantidad de energía solar recogida por un seguidor solar es directamente proporcional a la cantidad de radiación solar que recibe. En este caso, es posible recoger el máximo de la energía solar, simplemente ajustando el colector

de radiación solar a los puntos de forma óptima al sol en todo momento (Abdallah & Nijmeh, 2004) que en la mayoría de los casos parece ser alcanzado por los seguidores de dos ejes más de cualquier otro tipo de rastreadores.

Seguidores Solares de Eje Individual.

Los seguidores solares simples, tienen un solo eje de rotación que y puede ser alineado en casi cualquier dirección si se utilizan sistemas de control avanzados. Sin embargo, estudios (Mousazadeh et al., 2009) revelan que, aunque la orientación más preferible es estar junto al eje del meridiano norte, la orientación del módulo con respecto al eje del rastreador es importante cuando en el diseño se priorizan las capacidades de rendimiento. Hay varias configuraciones de seguidores de eje único, incluyendo horizontal (HSAT), horizontales con módulos inclinados (HTSAT), vertical (VSAT), inclinado (TSAT) y alineación polar (PSAT). Helwa et al. (Helwa et al., 2000) llevado a cabo una amplia investigación sobre todos estos sistemas, llegó a la conclusión los seguidores solares de eje individual VSAT son los más eficientes en su clase. Sus estudios claramente establecieron algunas ideas innovadoras sobre cómo los seguidores de un sólo eje deben estar diseñados y configurados para una óptima recolección de radiación solar.

Seguidores Solares de Doble Eje.

Durante los últimos años, la investigación (Maatallah et al., 2011) se ha llevado a cabo para mejorar la eficiencia y promover el uso de seguidores solares de doble eje. Aunque los seguidores solares de eje simple son significativamente más barato y más fáciles de construir, pero su eficiencia es inferior a la de los seguidores solares de ejes dobles. Además, los estudios (Abdallah & Nijmeh, 2004) revelaron que algunos sistemas solares, tales como concentradores de punto de enfoque, requieren rastreadores doble eje a causa de sus ventajas tales como capacidad máxima de absorción de la radiación solar y la posterior producción de máxima energía entre otros.

De acuerdo con los autores anteriormente citados, Maatallah et al. (2011) reiteró que los seguidores solares de doble eje siempre han generado una mejor potencia de salida cuando se compara con los de un solo eje y/o paneles fijos. El estudio de Kacira et al. (2004) comparó el rendimiento de un panel fotovoltaico plano fijo y un seguidor solar de doble eje en la recolección de energía solar y se dió cuenta de que el seguidor de doble eje logró un 34,6% de ganancia de energía. Un estudio similar se llevó a cabo por Davis et al. (2008) con el rastreador de doble eje produjo 128 Wh (30%) y 413 Wh (44%) ganancia de energía en

invierno y verano días de solsticio respectivamente, en comparación con un rastreador de un solo eje. Un último estudio por Arturo y Alejandro(2010) propuso un seguidor solar de doble eje de alta precisión utilizando un algoritmo con capacidades de procesamiento de imágenes para estimar los errores de puntería del sistema, alcanzando $\pm 0,1^\circ$ precisión.

Seguidores solares basados en la estrategia de control.

La potencia suministrada por una célula fotovoltaica es directamente proporcional a la cantidad de energía solar que recibe(Algifri & Al-Towaie, 2001). Con el fin de mejorar las capacidades de dichos registradores de captación de energía solar, se proponen muchas estrategias para optimizar el ángulo de inclinación del colector solar y la posterior orientación del colector solar del rastreador. La razón principal de estas optimizaciones es diseñar un sistema de control que compense los cambios de las diferentes locaciones geográficas(Yakup & Malik, 2001) en el ángulo de altitud diario en compensación de latitud estacional y en el ángulo de acimut(Mousazadeh et al., 2009) del sol, entre otros. Ambos modelos matemáticos y resultados de análisis estadísticos indican la ganancia de energía, a menudo se elevan por 5% cuando el ángulo de inclinación y orientación del colector fotovoltaico está sintonizado de manera óptima en comparación con un seguidor solar no optimizado. La investigación(Algifri & Al-Towaie, 2001) añade, además, que esta mejora podría incluso alcanzar el 40% durante el verano para las cocinas solares con ángulos de elevación solar más altos y culminando en 70% para el ángulo de elevación más baja en las regiones con buenos recursos de energía solar.

Todas las características anteriores se pueden lograr utilizando algunos algoritmos seleccionados junto con buenas prácticas de control. Más importante aún, la implementación de un buen control/algoritmo de seguimiento(Yakup & Malik, 2001) es fácil gracias al desarrollo de tecnologías informáticas avanzadas y los sistemas de control posteriores. Estos sistemas son generalmente clasificados en bucle cerrado y los sistemas de bucle abierto, dependiendo del tipo de estrategia de control involucrado y el modo de funcionamiento de la señal.

Seguidores Solares de bucle cerrado.

Seguidores solares de bucle cerrado o lazo cerrado se basan principalmente en los principios de control de retroalimentación y reciben sus señales de entrada desde los sensores que detectan los parámetros apropiados de posición del sol. Una vez recibida por el controlador, las señales de entrada se manipulan y salidas se modifican para reorientar

precisión colectora del rastreador hacia el sol. La literatura (Alorda et al., 2015) sugiere que los rastreadores de bucle cerrado son flexibles y mejora los algoritmos comunes de seguimiento. La estructura genérica de configuración de un bucle cerrado de un seguidor solar se representa en la figura 5 abajo.

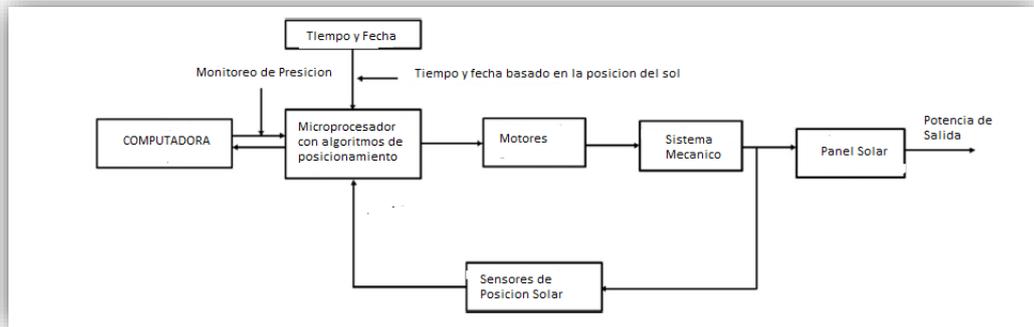


Figura 5 - Estructura Genérica de un Seguidor Solar de Lazo Cerrado

Fuente: (Nsengiyumva et al., 2018)

El uso de configuraciones de bucle cerrado, sugirieron soluciones (Berenguel et al., 2004) para corregir los errores de ajuste de los helióstatos y reflejar imágenes de radiación solar al receptor utilizando cámaras. Los métodos eran bastante fáciles, ya que imitan los procedimientos simples utilizados por los operadores de mantenimiento para resolver el error de ajuste. Esta técnica supervisa la proyección total de sol sobre el receptor y utiliza el controlador central para decidir la posición de cada helióstato que redujo el desplazamiento centroide del rayo de sol en la torre. Otras soluciones (Delgado Sesena et al., 1986) incluyen un sistema de control de bucle cerrado de helióstatos individuales basados en un dispositivo sensor del ángulo de radiación incidente, capaz de determinar la posición del sol usando el ángulo de los rayos del sol incidente. En este caso, la corrección de errores se realiza en el sistema de controlador de cada helióstato. La configuración de un circuito cerrado para el sistema de control de un seguidor solar mejora en gran medida la eficiencia del sistema. La salida de una estación de energía solar se mejoró a partir de 357 W a 500 W después de añadir un rastreador de bucle cerrado para las instalaciones de la estación.

Seguidores Solares de bucle abierto.

Un bucle abierto seguidor solar utiliza un controlador que calcula su entrada de los datos de estado actuales y el algoritmo del sistema por sí solo antes de su algoritmo de funcionamiento decide si su entrada ha alcanzado el objetivo deseado o no. Este tipo de sistema es más simple y más barato de implementar, en comparación con su contraparte de

bucle cerrado, pero requiere mucho trabajo preliminar para obtener los algoritmos correctos. Puesto que no observa los datos de salida de los procesos que está controlando, sino que también no puede corregir cualquier error en disfuncionalidad del sistema y no puede compensar las perturbaciones que se producen mientras el sistema está en funcionamiento. La estructura genérica de una configuración con bucle abierto de un seguidor solar se representa en la Figura 6 abajo.

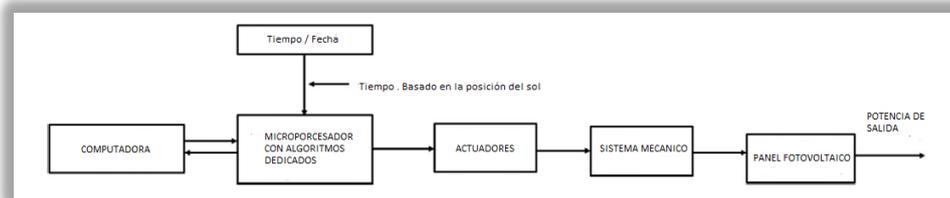


Figura 6 - Estructura Genérica de una Configuración de Seguidor Solar de Lazo abierto

Fuente: (Nsengiyumva et al., 2018)

Seguidores solares basados en la estrategia de seguimiento.

Seguidores Solares utilizando fecha y hora.

Estos sistemas se caracterizan por usar un sistema de control con un procesador, fórmulas/algoritmos escritos, sensores, información de ubicación geográfica, así como la hora/fecha. Todos estos datos son ingresados al sistema de control y se utilizan para generar señales que se envían a los motores/actuadores para la acción de seguimiento solar. Edwards(Edwards, 1978) sugirió usar un seguidor solar con un panel fotovoltaico parabólico . Usó un μC para controlar el movimiento de seguimiento solar del sistema cambiando la velocidad de los actuadores a intervalos constantes de tiempo y además establece la relación entre la velocidad de la unidad de control y el número de colectores fotovoltaicos. Koyuncu & Balasubramanian(1991) igualmente recogió la energía solar máxima mediante el control del movimiento del panel fotovoltaico. El sistema contó con un par de interruptores de limitación de otras posiciones este y oeste. Davies(1993) propuso un algoritmo novedoso que utiliza ejes ecuatoriales y eclípticas se cruzan entre sí en $23^{\circ} 30'$ (considerado el sol como un punto fijo respecto a la Tierra). Las principales ventajas de este sistema es que se utiliza con precisión motor de velocidad constante y con electrónica de control de sencilla configuración.

Seguidores Solares utilizando microprocesador y sensores electroópticos.

Estos rastreadores tienen una unidad de micro procesamiento, al menos un par de sensores electroópticos y su trabajo está basado en el principio de iluminación diferencial. Estos dos sensores electroópticos son alcanzados por la luz del sol y producen señales eléctricas que se transmiten al microprocesador. Este último evalúa las diferencias de iluminación a partir de estos dos sensores y genera una señal diferencial utilizada para accionar los motores/actuadores por lo tanto la reorientación del sistema en la dirección del haz de radiación solar hasta que los dos sensores están igualmente iluminados. El mismo proceso se repite cualquier momento de desigualdad de iluminación en los sensores. Aparte de la presencia de los sensores electroópticos, que de hecho es el requisito mínimo para este tipo de sistema, los fotodiodos y los dispositivos de sombreado también se pueden usar para un seguimiento preciso. El objetivo de estos fotodiodos es aumentar la sensibilidad de la fotocorriente, mientras que los dispositivos de sombreado deben evitar que el haz de radiación difusa interfiera directamente con las mediciones de los sensores (Luque-Heredia et al., 2007). Zogbi & Laplaze (1984) implementó un seguidor solar de doble eje de bajo costo de con algunas unidades electrónicas clásicas para realizar un seguimiento de los ángulos de elevación y azimut del sol. Cuatro sensores electroópticos se colocaron en cada cuadrante formado por dos planos rectangulares que se cruzan entre sí y los dos pares se conectan a la unidad de control de seguimiento. La comparación de las dos señales de los pares de los dos sensores produce una señal compuesta procesada por el controlador para activar los dos motores y desencadenar el modo de seguimiento del dispositivo. El sistema también contó con un retorno al este y un circuito de espera para detener el sistema por la noche y trae de vuelta para la operación del día siguiente.

Seguidores Solares utilizando combinación de sensores y de fecha y hora.

Como se sugiere en el subtítulo estos sistemas utilizan una combinación de todos los indicados tres elementos a saber: los sensores, fecha y hora. La literatura indica que hay una cantidad bastante importante de trabajos realizados sobre ellos, como se verá en la siguiente parte de esta sección. Hession & Bonwick (1984) analizaron el rendimiento de un seguidor solar electromecánico de un solo eje que utiliza varios sensores para controlar las posiciones de plato del colector siguiendo la dirección de este a oeste. Diferentes señales de los sensores se convirtieron en voltaje y lo amplificaron para accionar un motor 2.2WDC. Nueve sensores se usaron y se asignan diferentes funciones: uno para detectar la noche y día, seis para

detectar la gran angular y dos para detección de ángulo muy estrecho. Una respuesta deseada fue de $0,1^\circ$ la cual se logró fácilmente.

Energía Solar Fotovoltaica

La Célula Fotovoltaica

Fotovoltaico procede del vocablo foto que significa luz y voltaico que significa electricidad la cual juntas quiere decir electricidad a través de la luz. El efecto fotovoltaico es basado sobre la particularidad de algunos semiconductores, tales como el silicio de poder generar electricidad cuando la célula fotovoltaica está expuesta a la radiación solar.

El elemento principal de la transformación de la radiación solar en energía eléctrica es el panel solar. La luz está formada por partículas llamadas fotones los cuales llevan energía. Cuando unas de estas partículas llamadas fotones tienen contacto con la célula fotovoltaica, es absorbido por materiales semiconductores los cuales hacen que se libere un electrón. Dicho electrón una vez libre, deja detrás de él una carga positivamente cargada, nombrada hueco. Mientras mayor sea la cantidad de fotones que tengan contacto con la célula fotovoltaica, mayores serán las combinaciones electrón-hueco producidas por el efecto fotovoltaico por ende mayor corriente producida.

Composición De La Célula Fotovoltaica

La célula fotovoltaica está formada por una fina lámina de elementos semiconductores, en su mayoría de silicio. En la actualidad el elemento más utilizado es el silicio monocristalino, que presenta mejores cualidades y una durabilidad superior a otros tipos de silicio.

- Silicio monocristalino: Rendimiento hasta 17%
- Silicio policristalino: Rendimiento hasta 14%
- Silicio Amorfo: Rendimiento menor al 10%

La placa de silicio que compone a la célula fotovoltaica es generalmente de forma cuadrada, con una medida de 10cm de lado aproximadamente y un grosor entre los 0.25mm y los 0.35mm.

El Módulo Fotovoltaico

Las células solares forman parte de un módulo mayor, estas entregan valores de voltaje y corriente pequeñas, en comparación a los valores requeridos por los dispositivos a los que se van a conectar, estas son muy delicadas, no aisladas eléctricamente además no

cuentan con soporte mecánico. Cuando estas células fotovoltaicas se ensamblan en una única estructura dan como resultado al módulo fotovoltaico, que es una estructura sólida y manipulable.

Los módulos fotovoltaicos pueden presentarse en diferentes dimensiones, los más comunes están formados por un total de 36 células interconectadas serie, estas en conjunto forman una superficie que varía entre los $0,5m^2$ a los $1,3m^2$. Las células fotovoltaicas se conforman de una lámina superior de cristal y una lámina inferior de plástico. Todas estas láminas entran en un horno a alta temperatura, con vacío de alto grado. El producto final es un sólido módulo laminado en el que las células están sumergidas en el plástico fundido.

Luego de este proceso se añaden los marcos, en su mayoría de aluminio; con el propósito de añadir una resistencia mecánica para garantizar mucho tiempo de funcionamiento. Finalmente, en la parte posterior del módulo se inserta una caja de unión para los diodos de by-pass y los contactos eléctricos.

El Generador Fotovoltaico

El conjunto de módulos fotovoltaicos mecánicamente ensamblados entre sí forma un panel, mientras que un conjunto de módulos o paneles eléctricamente conectados formando un circuito en serie, constituyen la rama. Ahora el grupo de ramas conectadas formando un circuito en paralelo, para obtener una determinada potencia, constituyen el generador fotovoltaico. De esta manera el sistema eléctrico puede entregar los valores de voltaje y potencia requeridos para los diferentes usos.

Los módulos fotovoltaicos que constituyen el generador están ensamblados sobre una estructura mecánica lo suficientemente fuerte para sostenerlas y poder orientar su posición para optimizar la radiación solar. La energía que entrega un generador fotovoltaico puede variar en función de la incidencia de luz solar y de las coordenadas del panel en específico de la latitud.

La generación de energía eléctrica, que al depender de la incidencia de luz solar que no es constante, sino que, está condicionada por la duración del día (horas de luz solar), por las estaciones del año y por la variación de las condiciones climáticas.

Muchas veces estas características no cumplen a las necesidades de los usuarios finales que, por su mayoría, requieren de corriente eléctrica alterna, con valores constantes de tensión. Por lo tanto, la entrega de energía del sistema fotovoltaico al usuario final se mediante otros dispositivos intermedios necesarios para transformar y adaptar la corriente continua generada por los módulos a los requerimientos de uso, el dispositivo más

significativo para esta tarea intermedia es un inversor, que se encarga de transformar la corriente continua en corriente alterna.

Cálculo de Posición Solar

Son los conceptos básicos que se usarán con la información proveniente del GPS, tales como la posición, hora y fecha de la que se encuentra el seguidor solar, el objetivo para el seguidor solar es calcular el ángulo de elevación y el ángulo azimutal, ya que esta información será la que determine la posición del panel con el movimiento de los motores paso a paso.

Primero se tiene que calcular el año fraccional (γ), en radianes:

Ecuación 1:

$$\gamma = \frac{2\pi}{365} \left(\text{día_del_año} - 1 + \frac{\text{hora} - 12}{24} \right)$$

(Para año bisiesto se usa 366 en vez de 365 en el denominador)

De γ , podemos estimar la ecuación de tiempo (*eqtime*) en minutos y el ángulo de declinación solar (*decl*) en radianes.

Ecuación 2:

$$\begin{aligned} \text{eqtime} = & 229.18(0.000075 + 0.001868 \cdot \cos \gamma \\ & - 0.032077 \cdot \sin \gamma - 0.014615 \cdot \cos 2\gamma - 0.040849 \cdot \sin 2\gamma) \end{aligned}$$

Ecuación 3:

$$\begin{aligned} \text{decl} = & 0.006918 \\ & - 0.399912 \cdot \cos \gamma \\ & + 0.070257 \cdot \sin \gamma \\ & - 0.006758 \cdot \cos 2\gamma \\ & + 0.000907 \cdot \sin 2\gamma - 0.002697 \cdot \cos 3\gamma + 0.00148 \cdot \sin 3\gamma \end{aligned}$$

Luego, el verdadero tiempo solar es calculado por las siguientes 2 ecuaciones. Primero el desplazamiento del tiempo (*time_offset*) es encontrado y luego el verdadero tiempo solar (*tst*), en minutos.

Ecuación 4:

$$time_offset = eqtime + 4 \cdot longitude - 60 \cdot minutes$$

Donde la ecuación del tiempo es en minutos, la longitud es en grados y la zona horaria es en horas UTC.

Ecuación 5:

$$tst = hr \cdot 60 + mn + \frac{sc}{60} + time_offset$$

Dónde *hr* es la hora (0-23), *mn* son los minutos (0-59), *sc* son los segundos (0-59).

El ángulo solar horario (*ha*), en grados es calculado por:

Ecuación 6:

$$ha = (tst/4) - 180$$

El ángulo cenital solar (ϕ) puede ser encontrado por intermedio del ángulo solar horario (*ha*), la latitud (*lat*) y el ángulo de declinación solar (*decl*) usando la siguiente ecuación.

Ecuación 7:

$$\cos \phi = \sin lat \cdot \sin decl + \cos lat \cdot \cos decl \cdot \cos ha$$

El ángulo azimutal solar (θ grados en sentido horario desde el norte) es encontrado con la siguiente fórmula:

Ecuación 8:

$$\cos(180 - \theta) = -\frac{\sin lat \cdot \cos \phi - \sin decl}{\cos lat \cdot \sin \phi}$$

Todas estas ecuaciones finalmente serán computadas por el sistema embebido a cargo de procesar la información del GPS para el cálculo de la posición solar. Para el propósito de esta tesis se usa la librería de Python llamada Pysolar la cual hace uso de las fórmulas anteriormente mostradas. La librería puede encontrarse en la siguiente dirección: <https://pysolar.readthedocs.io/en/latest/>

Sistemas Embebidos

Un sistema embebido es un sistema basado en microprocesador o microcontrolador, que está diseñado para una función específica e integrado en un sistema mecánico o eléctrico más grande. (Bhunia & Tehranipoor, 2019) Ya que estos dispositivos se desarrollan para una lograr una tarea específica, en vez de ser un sistema de propósito general para múltiples tareas, son de tamaño limitado, bajo consumo energético y bajo coste costo. Los sistemas embebidos son utilizados en diversos fines, tales como aplicaciones comerciales, industriales y militares.

En su mayoría, un sistema embebido posee elementos de hardware y software de aplicación. Algunos sistemas embebidos tienen un sistema operativo en tiempo real (RTOS). Es posible que algunos sistemas embebidos pequeños no tengan RTOS. Por lo tanto, un sistema embebido se puede definir como un microprocesador o microcontrolador.

Poseen un sistema de control en tiempo real basado en software. La Figura 7 muestra un sistema embebido en una tarjeta enchufable tiene múltiples componentes como procesador, memoria, fuente de alimentación e interfaces externas.



Figura 7 - Sistema Embebido, Raspberry Pi 4 Modelo B

Fuente: (Foundation, s/f)

Hardware de Sistema Embebido.

Un sistema embebido contiene un microprocesador o microcontrolador que normalmente está diseñado para realizar cálculos para operaciones en tiempo real. Generalmente, un microprocesador es solo una unidad central de procesamiento (CPU). Por lo tanto, es necesario integrar otros componentes (por ejemplo, memorias, interfaces de

comunicación) y trabajar con el microprocesador como un sistema completo. En contraste, un microcontrolador es un sistema autónomo, que incluye una CPU, memorias (por ejemplo, RAM, memoria flash) y periféricos (por ejemplo, puertos de comunicación en serie).(Bhunia & Tehranipoor, 2019)

Software del Sistema Embebido

Los microprocesadores o microcontroladores utilizados en sistemas embebidos generalmente no son tan avanzados en comparación con los procesadores de propósito general diseñados para desempeñar múltiples tareas. A menudo trabajan con un entorno de programación sencillo y con menos memoria. Como resultado, el software del sistema embebido tiene requisitos y capacidades de hardware específicos. Se adapta al hardware en particular y tiene limitaciones de tiempo y memoria. Los programas y sistemas operativos generalmente se almacenan en la memoria flash dentro de los sistemas embebidos.

De manera similar, los sistemas operativos o plataformas de lenguaje se desarrollan para uso integrado, particularmente cuando se requiere RTOS. Actualmente, se adoptan generalmente versiones simples del sistema operativo Linux u otros sistemas operativos, como Embedded Java y Windows IoT.(Bhunia & Tehranipoor, 2019)

Características de los Sistemas Embebidos.

Las características de un sistema embebido se pueden resumir como se presenta a continuación.(Bhunia & Tehranipoor, 2019)

- **Función específica:** un sistema embebido generalmente está diseñado para una función específica.
- **Estrechamente restringido:** un sistema embebido está muy restringido en cuanto a recursos y tiempo. Por ejemplo, un sistema embebido tiene que ser rápido y tolerante a las tareas de ligeras variaciones en el tiempo de reacción (en tiempo real o casi en tiempo real), con memoria limitada y consumo mínimo de energía.
- **Tiempo real y reactivo:** en muchos entornos se debe prestar servicio en tiempo real o casi en tiempo real. Por ejemplo, un navegador del sistema de posicionamiento global (GPS) debe proporcionar continuamente información sobre la ubicación y la carretera, y enviar alertas al conductor para aumentar el conocimiento de la situación casi en tiempo real o, a veces, en tiempo real. Del mismo modo, se requiere un controlador de cruce para automóvil para monitorear y reaccionar continuamente a los sensores de velocidad y frenado, y también calcular la aceleración o

desaceleración en tiempo real. Cualquier retraso haría que el coche se saliera de control, lo que podría dar lugar a resultados catastróficos.

- Co-diseño de hardware / software: un sistema embebido es típicamente un sistema de hardware de computadora con software incrustado en él. El hardware está diseñado para el rendimiento y la seguridad, mientras que el software diseñado para más funciones y flexibilidad.
- Basado en microprocesador / microcontrolador: a menudo se implementa un microprocesador o microcontrolador en el corazón del sistema embebido y diseñado para realizar operaciones.
- Memoria: se requiere una memoria para un sistema embebido ya que los programas y los sistemas operativos son generalmente cargados y almacenados en la memoria.
- Periféricos conectados: se necesitan periféricos para conectar dispositivos de entrada y salida.

Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

GPS se entiende de Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System por sus siglas en inglés), y es un radio receptor especial que mide la distancia desde tu posición con los satélites que están en la órbita transmitiendo señales de radio. Los GPS pueden localizar tu posición en cualquier parte del mundo (McNamara, 2008).

Existen dos cosas importantes que debemos saber del GPS:

- Tienen un formato de datos y un método de comunicaciones con una red de satélites que envían información a los dispositivos que la solicitan.
- Cualquier dispositivo que envíe señales GPS, se le llama transmisor GPS, y cualquier dispositivo que recibe señales GPS se le denomina receptor GPS.

La mayoría de los dispositivos al alcance son receptores, ellos reciben información de solicitudes explícitas. Esto requiere menor consumo de energía y menor cantidad de componentes electrónicos.

El receptor calcula su posición con precisión midiendo el tiempo de las señales enviadas por los satélites GPS. Cada satélite envía mensajes que contienen el momento en que se envió el mensaje, la información sobre su ubicación actual en órbita, el estado general del sistema y de las órbitas en bruto de todos los satélites GPS. Cuando el receptor recibe un mensaje, se mide el tiempo de tránsito del mensaje y que utiliza para calcular la distancia a cada satélite. El receptor utiliza las distancias calculadas para crear una estimación precisa de la ubicación actual, llamado el punto de referencia del dispositivo.

El receptor utiliza la triangulación, combinando el tiempo que se tardó en recibir el mensaje con la ubicación de los satélites para determinar la ubicación del receptor. Los receptores GPS se componen generalmente de una antena que está sintonizado a las frecuencias transmitidas por los satélites, un procesador, y un reloj. Originalmente, los receptores están dotados de cuatro o cinco canales para recibir mensajes, pero este número ha aumentado, y en la actualidad la mayoría de los receptores suelen tener entre 12 y 20 canales en los que se reciben los mensajes(Noble, 2012).

Los receptores GPS envían los datos de posición a un PC u otro dispositivo que solicite esta información, y lo envían como cadenas de caracteres siguiendo el protocolo de la National Marine Electronics Association (NMEA). La mayoría de los receptores suelen enviar cuatro series de datos diferentes, estas pueden ser:

- GPGGA: Global Positioning System Fix Data
- GPGSV: GPS satellites in view
- GPGSA: GPS Dilution of Precision and active satellites
- GPRMC: Recommended minimum specific GPS/transit data

Las cadenas que contienen los datos son sentencias. Cada una de estas sentencias contiene una gran cantidad de datos, pero la parte más interesante para los propósitos de este proyecto de tesis es el último, GPRMC.

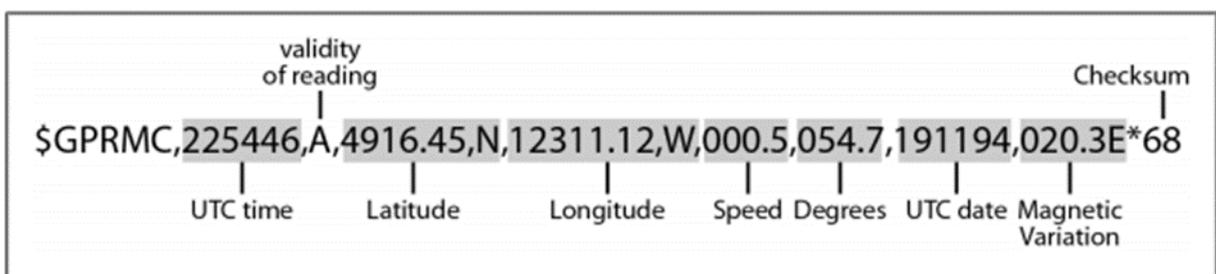


Figura 8 - Sentencia GPRMC

Fuente: (GPS - NMEA sentence information, s/f)

Lo mostrado en la anterior sentencia es una cantidad importante de información, todo mezclado en una sentencia pequeña, la cual usando las comas como separadores se interpreta de la siguiente manera:

| Segmento | Descripción |
|-----------|---|
| GPRMC | Tipo de sentencia |
| 225446 | Tiempo en el formato 22:54:46 |
| A | Advertencia del navegador. A= Posición Valida; V=Advertencia. |
| 4916,45N | Latitud 49grados 16.45 minutos Norte |
| 12311.12W | Longitud 123 grados, 11.12 minutos Oeste |
| 0.5 | Velocidad en nudos (1kn = 1.852 Km/h) |
| 54.7 | Orientación en grados |
| 191109 | Fecha UTC, 19/nov/2009 |
| 020.3E | Variación magnética, 20.3 grados Este |
| *68 | Suma de comprobación obligatoria |

Tabla 3 - Descripción de la sentencia GPRMC

Fuente: (GPS - NMEA sentence information, s/f)

En la presente tesis se usará también la sentencia GPGGA para la corroboración de la sentencia GPRMC y obtener adicionalmente la lectura de la altura.

Unidad de Medición Inercial.

La IMU es un sensor que mide la aceleración triaxial y la velocidad angular triaxial. La IMU consta de un acelerómetro, que puede emitir señales de aceleración lineal en tres ejes en el espacio, y un giroscopio, que puede emitir señales de velocidad angular en tres ejes en el espacio. La actitud del sensor en el espacio se puede calcular basándose en las seis salidas, lo cual es de gran valor de aplicación cuando se debe considerar el control de actitud. Dado que la IMU no puede dar un ángulo en la dirección horizontal, la IMU se utiliza a menudo en combinación con un magnetómetro triaxial para una mayor determinación de la actitud.

Los datos medidos por los sensores inerciales suelen tener ciertos errores. Un tipo de error es el error de compensación, lo que significa que los acelerómetros y giroscopios tienen salidas distintas de cero incluso cuando están estacionarios. En el proceso de uso de la IMU, generalmente se necesitan datos de desplazamiento. La integración de la salida del acelerómetro dos veces puede obtener un desplazamiento lineal, y la integración de la salida del giroscopio una vez puede obtener un desplazamiento angular. Sin embargo, con el paso del tiempo, los errores se irán acumulando y se producirán grandes errores. El ruido de fondo en el entorno de trabajo también interferirá con los resultados de la medición. Por lo tanto, en el uso real, la salida de datos de la IMU debe filtrarse y corregirse, lo que generalmente se puede lograr mediante el uso de un filtro de Kalman (KF). De hecho, en muchos campos

de aplicación, es difícil obtener resultados precisos utilizando solo los datos generados por la IMU, por lo que la IMU generalmente necesita realizar una fusión de datos con otros sensores para obtener mejores resultados. El KF también se puede utilizar para la fusión de datos (Corrales et al., 2008).

Estas unidades de medición inercial generalmente vienen con 3 dispositivos que son el acelerómetro, el giroscopio y el magnetómetro, pueden estar conectados al sistema embebido mayoritariamente a través de interfaces I2C o SPI, a las cuales se accede y se configura sus parámetros según la dirección de memoria que le haya asignado el fabricante, las lecturas crudas que se obtienen de estos dispositivos muestran la magnitud según el eje que se esté leyendo puede (X, Y o Z), y esta magnitud dependerá de la resolución del sensor (medida en bits). Para el propósito de esta tesis es importante el uso de 2 dispositivos ya que el seguidor solar va a constatar de 2 ejes cada dispositivo me medirá el ángulo de inclinación según el eje al que corresponda.

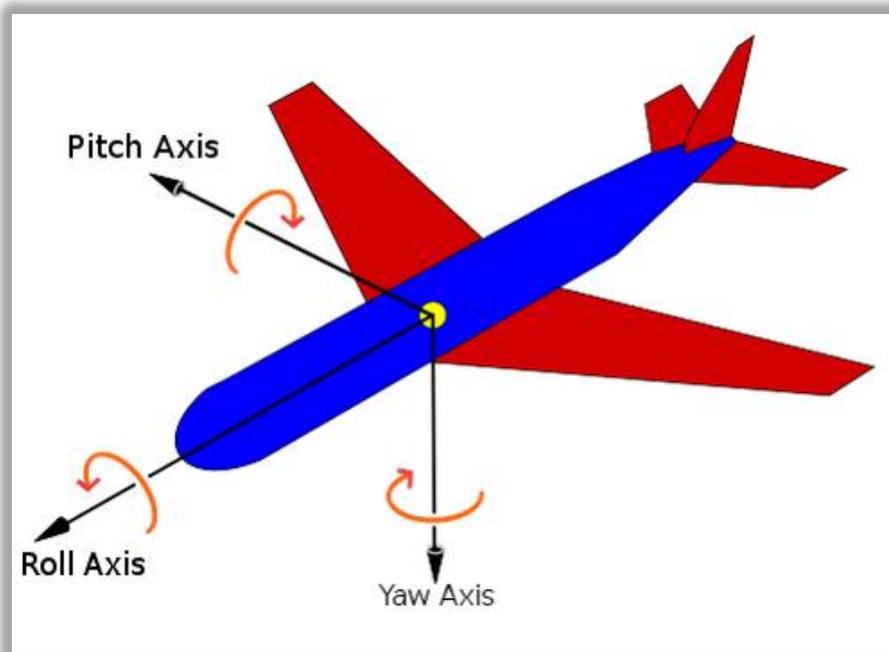


Figura 9 - Ángulos de rotación según su eje.

Fuente: (“Flight Dynamics (Fixed-Wing Aircraft)”, 2021)

Los ángulos de rotación a computar son Pitch y Yaw; Pitch es medido por el acelerómetro y representará la búsqueda del ángulo de elevación, Yaw es medido por el magnetómetro y representará la búsqueda del ángulo azimutal en el seguidor solar, con ello se conforman los 2 ejes del seguidor solar y están dados por las siguientes fórmulas:

Ecuación 9:

$$Pitch = \tan^{-1} \left(-Acc_x / \sqrt{Acc_y^2 + Acc_z^2} \right)$$

Dónde:

Acc_x = Magnitud del acelerómetro en el eje X.

Acc_y = Magnitud del acelerómetro en el eje Y.

Acc_z = Magnitud del acelerómetro en el eje Z.

Ecuación 10:

$$Yaw = \tan^{-1}(Mag_y/Mag_x)$$

Dónde:

Mag_x = Magnitud del magnetómetro en el eje X.

Mag_y = Magnitud del magnetómetro en el eje Y.

Ambas ecuaciones serán computadas en el sistema embebido recopilando la información que proviene de ambos sensores y poder posicionar el panel de forma optima hacia la incidencia de luz solar.

Distorsiones Hard-Iron & Soft-Iron

Las distorsiones del campo magnético de la tierra son el resultado de influencias magnéticas externas generalmente clasificadas como un efecto soft-iron o hard-iron. Si no hay efectos de distorsión presentes, al girar un magnetómetro un mínimo de 360° y trazar los datos resultantes como el eje Y frente al eje X, se obtendrá un círculo centrado alrededor de (0, 0), como se muestra en la Figura 10 .

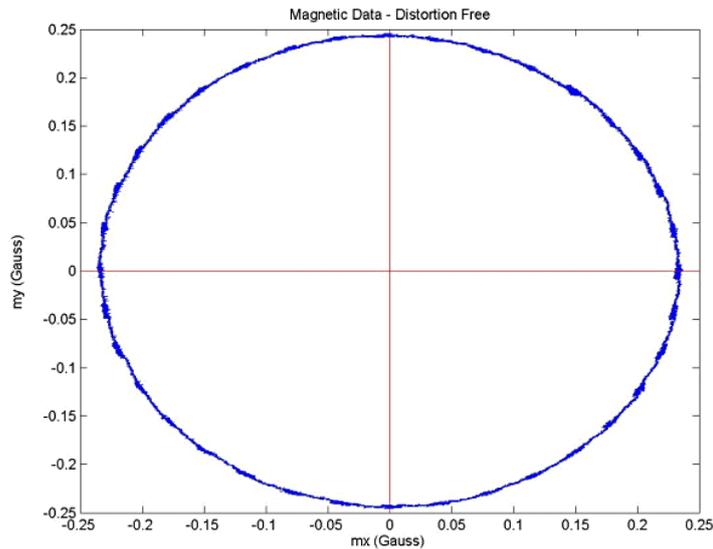


Figura 10 - Lectura magnética con distorsión mínima

Fuente: (Compensating for Tilt, Hard-Iron, and Soft-Iron Effects, s/f)

Sin embargo, la presencia de efectos de distorsión hard-iron y/o soft-iron puede producir una perturbación del círculo como un simple desplazamiento de (0, 0) en el caso de un efecto hard-iron, o deformar el círculo para producir una elipse en el caso de un efecto soft-iron. También es posible que ambos efectos se exhiban simultáneamente.

También es importante reconocer que la compensación efectiva de las distorsiones hard-iron y soft-iron depende de que el material distorsionador gire o se mueva con el sensor. Un ejemplo sería montar el sensor en un avión; cualquier material que forme parte de la aeronave que presente un efecto distorsionador se movería a medida que la aeronave y el sensor montado se mueven, y generalmente sería posible compensar los efectos asociados de las distorsiones hard-iron y soft-iron. En contraste, es mucho más difícil, si no imposible, compensar los efectos distorsionadores exhibidos por el material externo a la plataforma de la aeronave y sensor. Por lo tanto, es importante comprender no solo cómo se puede aplicar la compensación, sino también reconocer aquellas condiciones bajo las cuales las técnicas de compensación efectivas no son posibles.

Distorsión Hard-Iron.

La distorsión hard-iron es producida por materiales que exhiben un campo aditivo constante al campo magnético de la tierra, generando así un valor aditivo constante a la salida de cada uno de los ejes del magnetómetro. Un imán de altavoz, por ejemplo, producirá una distorsión de hierro duro. Siempre que la orientación y la posición del imán con respecto al sensor sean constantes, el campo y las compensaciones asociadas también serán constantes.

Una distorsión hard-iron se puede identificar visiblemente mediante un desplazamiento del origen del círculo ideal desde (0, 0), como se muestra en la Figura 11.

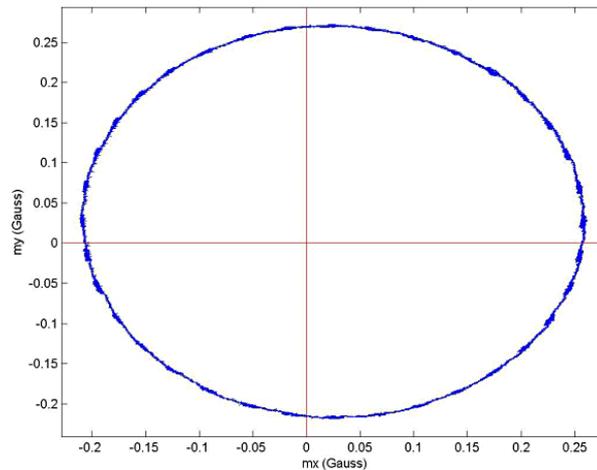


Figura 11 - Un gráfico de datos del magnetómetro que muestra la distorsión de Hard-Iron, exhibida por un desplazamiento constante tanto en X como en Y

Fuente: (Compensating for Tilt, Hard-Iron, and Soft-Iron Effects, s/f)

La compensación de la distorsión hard-iron es sencilla, se logra determinando las compensaciones X y Y y luego aplicando estas constantes directamente a los datos. Es importante tener en cuenta que la compensación de inclinación debe aplicarse antes de determinar las correcciones hard-iron.

Las correcciones de hard-iron generalmente se determinan girando el sensor un mínimo de 360 °, luego determinando la distancia desde (0, 0) al centro del círculo identificando el promedio de los valores máximo y mínimo para cada uno de los ejes. como se muestra en las Ecuaciones 11 y 12 , respectivamente,

Ecuación 11

$$\alpha = \frac{(x_{max} + x_{min})}{2}$$

Ecuación 12

$$\beta = \frac{(y_{max} + y_{min})}{2}$$

dónde:

α = Desplazamiento del eje X

| | | |
|---------|---|--------------------------|
| x max | = | Valor x máximo |
| x min | = | Valor x mínimo |
| β | = | Desplazamiento del eje Y |
| y max | = | Valor y máximo |
| y min | = | Valor y mínimo |

Estas compensaciones luego se restan de los datos brutos del magnetómetro X y Y, eliminando así en gran medida la distorsión hard-iron.

Los efectos hard-iron son constantes independientemente de la orientación o posición de la plataforma de detección. Estas compensaciones constantes se pueden almacenar una vez calculadas y restadas de los datos brutos del magnetómetro.

Distorsión Soft-Iron.

A diferencia de la distorsión hard-iron donde el campo magnético es aditivo al campo terrestre, la distorsión soft-iron es el resultado de un material que influye o distorsiona un campo magnético, pero no necesariamente genera un campo magnético en sí mismo y, por lo tanto, no es aditivo. El hierro y el níquel, por ejemplo, generarán una distorsión soft-iron. Si bien la distorsión hard-iron es constante independientemente de la orientación, la distorsión producida por los materiales soft-iron dependen de la orientación del material en relación con el sensor y el campo magnético. Por tanto, la distorsión soft-iron no se puede compensar con una simple constante; en cambio, se requiere un procedimiento más complicado. (*Compensating for Tilt, Hard-Iron, and Soft-Iron Effects, s/f*)

Como se muestra en la Figura 12 , una distorsión soft-iron se exhibe típicamente como una perturbación de círculo ideal en una elipse.

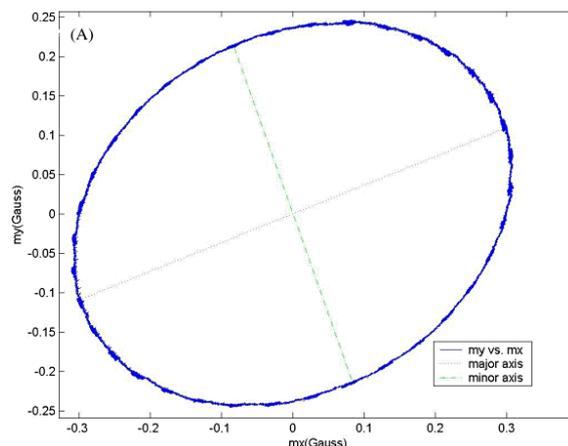


Figura 12 - Efecto de Soft-Iron que distorsiona el círculo ideal en una forma elíptica

Fuente: (Compensating for Tilt, Hard-Iron, and Soft-Iron Effects, s/f)

La compensación por la distorsión del soft-iron requiere más computación que la compensación por la distorsión del hard-iron, y puede ser más efectivo desde una perspectiva de costo y eficiencia, particularmente si se diseña o implementa un sistema embebido, para eliminar el material soft-iron de la proximidad del sensor. En muchos casos, esta no es una opción y se requiere implementar un método de compensación soft-iron.

Para simplificar la siguiente discusión, asumimos que todos los efectos de inclinación y distorsiones hard-iron no están presentes en el entorno de la aplicación, o que se han aplicado previamente métodos de compensación de inclinación y hard-iron. Además, si hay efectos de inclinación y hard-iron, se debe aplicar una compensación de estas distorsiones antes de corregir las distorsiones soft-iron. Como tal, es seguro asumir que el origen de la elipse está en (0, 0), como se muestra en la Figura 13 , y exhibe una rotación de θ grados desde el eje X.

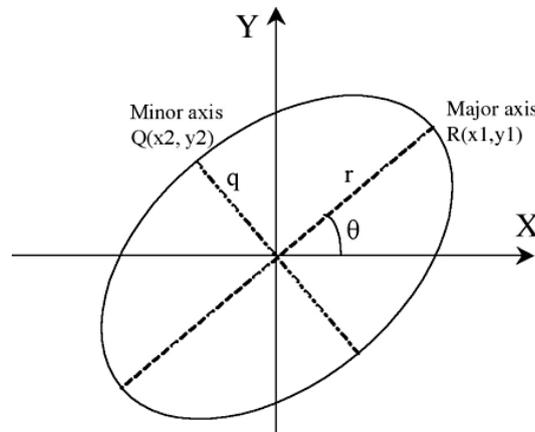


Figura 13 - Una elipse generada como resultado de la distorsión de Soft-Iron, centrada en (0,0) con rotación θ

Fuente: (Compensating for Tilt, Hard-Iron, and Soft-Iron Effects, s/f)

La identificación de θ en la Figura 13 se logra usando la Ecuación 13 para calcular la magnitud del segmento de línea r , seguida de la Ecuación 14 para determinar θ :

Ecuación 13

$$r = \sqrt{(x_1)^2 + (y_1)^2}$$

Ecuación 14

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{y_1}{r}\right)$$

Desde una perspectiva informática, y asumiendo datos relativamente limpios, un método para identificar r es calcular la magnitud de cada punto de datos y luego identificar el máximo de estos valores calculados; las coordenadas de este valor se corresponderán con el eje mayor. Asimismo, el valor mínimo corresponderá al eje menor, q . Una vez que se ha identificado θ , la matriz de rotación dada en la Ecuación 15 se aplica al vector de los valores X e Y del magnetómetro, v , usando la Ecuación 16.

Ecuación 15

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

Ecuación 16

$$v_1 = Rv$$

Después de la rotación, el eje mayor de la elipse se alinearán con el eje X del marco de referencia y el eje menor se alinearán con el eje Y , como se muestra en la Figura 14.

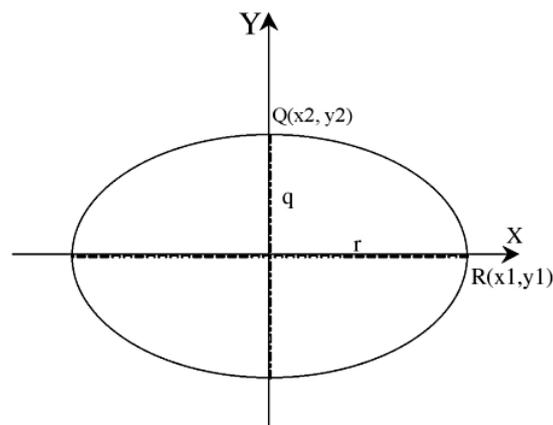


Figura 14 - Alineación de los ejes mayor y menor de la elipse con los ejes X e Y del sistema de coordenadas, respectivamente, después de la rotación

Fuente: (Compensating for Tilt, Hard-Iron, and Soft-Iron Effects, s/f)

Después de la rotación, ahora podemos escalar correctamente el eje mayor de modo que la elipse se convierta en un círculo aproximado. El factor de escala, σ , se determina mediante la Ecuación 17, y es la relación entre la longitud del eje mayor y la del eje menor.

Luego, cada valor x del magnetómetro se divide por este factor de escala para producir el círculo deseado.

Ecuación 17

$$\sigma = \frac{q}{r}$$

Una vez que se completa el escalado, se debe hacer una rotación final para rotar los datos a su posición original, compensando así la distorsión soft-iron. Esto se logra aplicando las Ecuaciones 15 y 16, pero con un θ negativo, para alinear los ejes del sistema de coordenadas y la elipse. (*Compensating for Tilt, Hard-Iron, and Soft-Iron Effects*, s/f)

Motores Paso a Paso.

El motor paso a paso o paso a paso produce una rotación en ángulos iguales, los llamados pasos, para cada pulso digital suministrado a su entrada. Por ejemplo, si con tal motor, 1 pulso de entrada produce una rotación de 1.8° , entonces 20 pulsos de entrada producirán una rotación de 36.0° , 200 pulsos de entrada una rotación de una revolución completa de 360° . Por lo tanto, se puede utilizar para un posicionamiento angular preciso. Al utilizar el motor para impulsar una correa continua, la rotación angular del motor se transforma en un movimiento lineal de la correa y, por lo tanto, se puede lograr un posicionamiento lineal preciso. Este motor se utiliza con impresoras de computadora, ploteadores bidimensionales, robots, y una amplia variedad de instrumentos para un posicionamiento preciso.

Hay dos formas básicas de motor paso a paso, el de tipo *imán permanente* con un rotor de imán permanente y el tipo de *reluctancia variable* con un rotor de acero blando. Ambas formas de motor paso a paso tienen un estator con varios pares de polos diametralmente opuestos, cada uno enrollado con una bobina. La Figura 15 muestra el tipo de imán permanente con dos pares de polos de estator. Cada polo es activado por una corriente que pasa a través del devanado de campo apropiado, siendo las bobinas tales que se producen polos opuestos en bobinas opuestas. La corriente se suministra desde una fuente de CC a los devanados a través de interruptores. Con las corrientes conmutadas a través de las bobinas de modo que los polos sean como se muestra en la Figura 15, el rotor se moverá para alinearse con el siguiente par de polos y se detendrá allí. Este sería, para la Figura 15, un ángulo de 45° . Si luego se cambia la corriente de modo que las polaridades se inviertan,

el rotor se moverá un paso para alinearse con el siguiente par de polos, en un ángulo de 135° y se detendrá allí. Las polaridades asociadas con cada paso son:

| Paso | Polo 1 | Polo 2 | Polo 3 | Polo 4 |
|------|------------------------|--------|--------|--------|
| 1 | Norte | Sur | Norte | Sur |
| 2 | Sur | Norte | Norte | Sur |
| 3 | Sur | Norte | Sur | Norte |
| 4 | Norte | Sur | Sur | Norte |
| 5 | Repita los pasos 1 a 4 | | | |

Tabla 4 - Tabla de Polaridades de motor

Por tanto, en este caso, hay cuatro posibles posiciones del rotor: 45° , 135° , 225° y 315° . Tenga en cuenta que el término *fase* se utiliza para el número de devanados independientes en el estator.

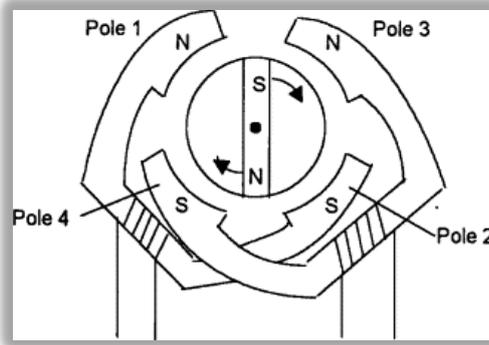


Figura 15 - Los principios básicos del motor paso a paso de imanes permanentes (2 fases) con un rotor que da pasos de 90°

Fuente: (Bolton, 2002)

La Figura 16 muestra la forma básica del tipo de motor paso a paso de reluctancia variable. Con esta forma, el rotor está hecho de acero blando y no es un imán permanente. El rotor tiene varios dientes, el número es menor que el número de polos en el estator. Cuando un par opuesto de devanados en los polos del estator tiene corriente conmutada hacia ellos, se produce un campo magnético con líneas de fuerza que pasan desde los polos del estator a través del juego de dientes más cercano en el rotor. Dado que las líneas de fuerza pueden considerarse como un hilo elástico y siempre tratando de acortarse, el rotor se moverá hasta que los dientes del rotor y los polos del estator se alineen. Esto se denomina posición de mínima desgana. Así, cambiando la corriente a sucesivos pares de polos del estator, se puede hacer que el rotor gire en pasos. Con el número de polos y dientes del rotor que se

muestran en la Figura 16, el ángulo entre cada paso sucesivo será de 30° . El ángulo se puede reducir aumentando el número de dientes del rotor.

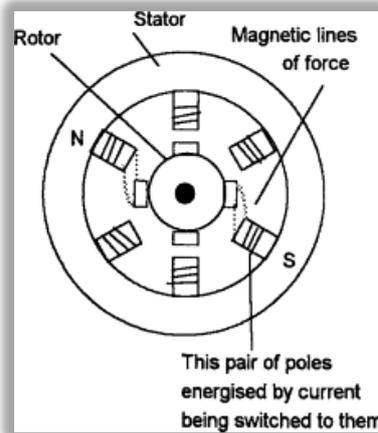


Figura 16 - Principios básicos de un motor paso a paso de reluctancia variable trifásico

Fuente: (Bolton, 2002)

Para impulsar un motor paso a paso, de modo que avance paso a paso para proporcionar rotación, se requiere que cada par de bobinas del estator se encienda y apague en la secuencia requerida cuando la entrada es una secuencia de pulsos. Los circuitos de controlador están disponibles para proporcionar la secuencia correcta y la Figura 17 muestra un ejemplo. El motor paso a paso girará un paso cada vez que la entrada del disparador pase de bajo a alto. El motor funciona en sentido horario cuando la entrada de rotación es baja y en sentido antihorario cuando es alta. Cuando el pin establecido se hace bajo, la salida se restablece. En un sistema de control, estos pulsos de entrada pueden ser suministrados por un microprocesador. (Bolton, 2002)

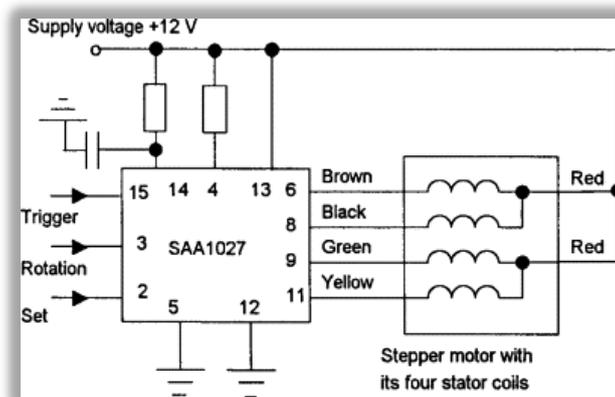


Figura 17 - Circuito controlador SAA 1027 para un motor paso a paso de 12V de 4 fases

Fuente: (Bolton, 2002)

Microcontroladores

Los microcontroladores son computadoras de un solo chip que incluyen como mínimo un microprocesador, memoria y módulo de entrada y salida. Dependiendo de la complejidad, algunos microcontroladores incluyen componentes adicionales como contadores, temporizadores, circuitos de control de interrupciones, módulos de comunicación en serie, convertidores de analógico a digital, módulos de procesamiento de señales digitales, etc. Por lo tanto, un microcontrolador puede ser cualquier cosa, desde un pequeño controlador integrado de un solo chip hasta un gran sistema informático con teclado, monitor, disco duro, impresora, etc. Un microprocesador es diferente de un microcontrolador en muchas formas diferentes, con la principal diferencia de que un microprocesador requiere varios chips de soporte externos adicionales, como circuitos de memoria y de entrada y salida, antes de que pueda usarse como un controlador digital. Este capítulo es una introducción a los principios de los microcontroladores donde se describen varios ejemplos de sistemas basados en microcontroladores. (Ibrahim, 2019)

Comunicación Serial

Los puertos serie se utilizan para conectar físicamente los dispositivos asíncronos con un sistema. Se encuentran en la parte de atrás de la unidad del sistema, integrados o utilizando un adaptador de varios puertos como, por ejemplo, los adaptadores asíncronos de 2 puertos, 8 puertos, 16 puertos y 128 puertos.

Para comprender el funcionamiento de un puerto serie, es necesario examinar primero las comunicaciones paralelo. Un puerto paralelo estándar utilizar ocho conectores o cables para transmitir los bits de datos de forma simultánea, formando un solo carácter. La ilustración siguiente muestra la transmisión en paralelo de la letra a.

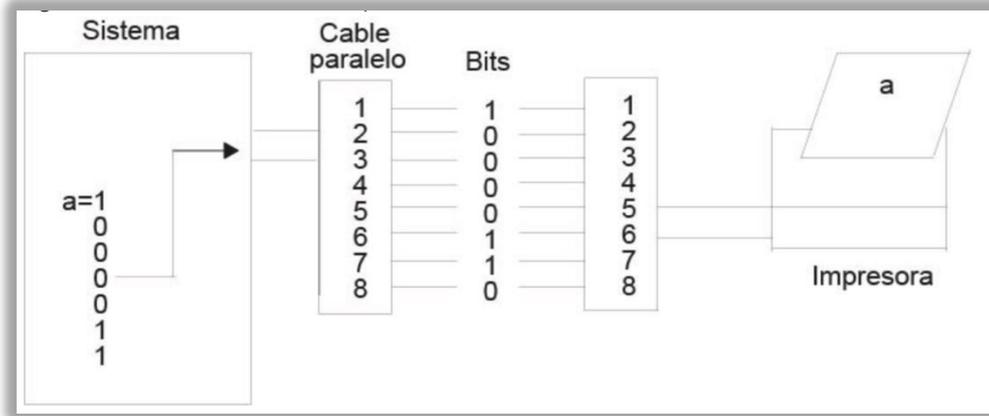


Figura 18 - Puerto de comunicaciones paralelo

Fuente: (IBM Docs, 2021)

Los puertos serie requieren un solo conector, o cable, para enviar el mismo carácter de datos al dispositivo. Para conseguirlo, los datos se convierten del formato paralelo (enviado por el sistema), a formato secuencial, en el que los bits se organizan uno tras otro en una serie. Los datos se transmiten entonces al dispositivo, enviando el bit menos significativo (o el bit cero) en primer lugar. Una vez que el dispositivo remoto recibe los datos, éstos se vuelven a convertir al formato paralelo. La ilustración siguiente muestra la transmisión serie de la letra a.

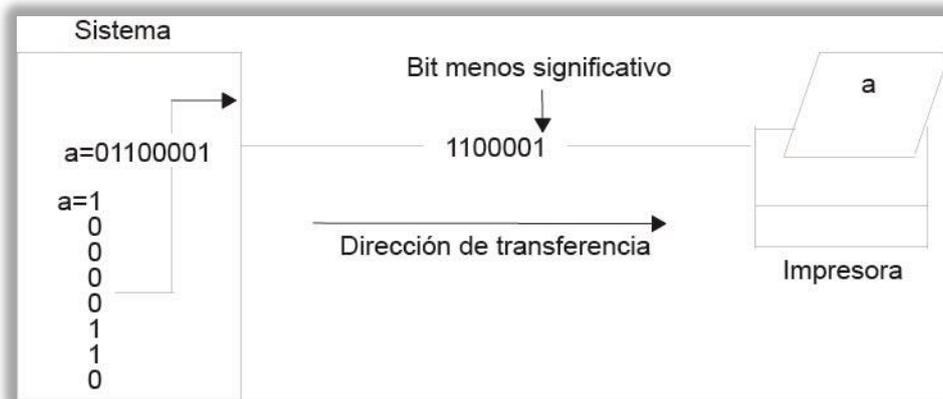


Figura 19 - Puerto de comunicaciones serie

Fuente: (IBM Docs, 2021)

Las transmisiones serie de un solo carácter son simples y directas; sin embargo, surgen complicaciones cuando se transmiten en series un gran número de caracteres tal como se muestra en la ilustración siguiente. El sistema receptor no sabe cuándo finaliza un carácter

y empieza el otro. Para solucionar este problema, ambos extremos del enlace de comunicación deben estar sincronizados o temporizados.



Figura 20 - Transmisión en serie

Fuente: (IBM Docs, 2021)

- Sincronización: La sincronización es el proceso de temporización de la transmisión serie para identificar los datos que se envían correctamente.
- Parámetros de comunicación serie: Entre los parámetros utilizados durante la comunicación serie se encuentran bits por carácter, bits por segundo (bps), velocidad en baudios, paridad y bits de inicio, detención y marca.
- El estándar EIA 232D: El estándar EIA 232D se desarrolló en 1.969 para especificar las conexiones entre un sistema y un módem.
- Métodos de comunicación asíncrona: Describe las dos formas de comunicación asíncrona, de una vía o de dos vías (donde se incluye la modalidad dúplex y semi-dúplex).
- Control de flujo: El dispositivo serie necesita cierto tipo de control de flujo de datos para limitar la cantidad de datos que el sistema transmite.(*IBM Docs, 2021*)

CAPÍTULO III: DISEÑO METODOLÓGICO

En este capítulo se verá el diseño del SS tanto en su estructura física(circuito electrónico y recinto de acrílico) como en su estructura lógica(diseño de software) así como también el procedimiento de calibración del IMU que es necesario para censar y tener retroalimentación del ángulo de elevación como el ángulo azimutal, se verá el proceso de funcionamiento con los diferentes posibles escenarios de medición, todo esto se contrasta con una herramienta web que ayudó a corroborar los datos resultantes del SS, finalmente se mostrará la estructura de costos del SS.

Para la parte física se utilizaron dos programas, cada uno según los requerimientos; el diseño electrónico esquemático y de la placa de circuito impreso fueron hechos en la herramienta EAGLE CAD 7.6.0 esta herramienta nos permitió tener previsualización en 2D de la placa de circuito impreso y diseñar los agujeros que mediante tornillos permitirían que se ancle al recinto de acrílico. Para el diseño del recinto se utilizó la herramienta SketchUP en su versión gratuita, es un programa CAD para modelado en 3D, en este caso se diseña una estructura usando el modo de 2D ya que el objetivo es cortar con láser la plancha de acrílico de 3mm de espesor.

El software fue escrito en el lenguaje Python 2.7, un lenguaje ampliamente usado y con mucha información en la nube para poder consultar, el IDLE elegido para este desarrollo es el Eclipse que con un plug-in adicional nos permite conectarnos al beaglebone black y ejecutar código de manera remota.

La calibración del SS es mediante una herramienta llamada Magneto 1.2 que usando la información en crudo que arroja el IMU nos permite calcular el bias y los factores de escalamiento.

El uso del SS y la corroboración de los resultados se verifican con la herramienta web suncalc.org; ello es fundamental para poder proceder a la recopilación de los voltajes arrojados por los paneles solares.

Beaglebone Black

La tarjeta Beaglebone Black es una plataforma de desarrollo que tiene un papel muy importante sobre el seguidor solar, sobre ella se programará y se conectarán todas las entradas y salidas a través de las diferentes interfaces que presenta el seguidor solar. Esta plataforma de desarrollo basada en un procesador ARM Cortex A8, además de ellos permite instalar sistema operativo ciertas distribuciones específicamente acondicionadas de Linux,

que facilita poder usar una gran diversidad de lenguajes de programación, siempre y cuando se tenga las dependencias necesarias para ejecutarlo, las principales características del son:

| Beaglebone Black | |
|--------------------------|-------------------------------|
| Procesador | ARM Cortex- A8 AM3359 de 1GHz |
| Memoria y Almacenamiento | RAM de 512mG DDR |
| | Flash de 2GB eMMC |
| | Slot para tarjetas MicroSD |
| Interface | Puerto host USB 2. Type A |
| | Puerto cliente mini-USB 2.0 |
| | Salida Audio/video micro-HDMI |
| Conectividad | 10/100 Ethernet |
| Headers de Expansión | 65 I/O Digitales |
| | 7 Entradas Analógicas |
| | 4 Interfaces Seriales |
| | 2 Interfaces SPI |
| | 2 Interfaces I2C |
| | 8 PWDM |
| | 4 Temporizadores |
| Consumo | (210-460)mA@5V |

Tabla 5 - Principales características de Beaglebone Black.

Fuente (Beagleboard, s/f)

Las principales razones por la cuales se elige esta plataforma de desarrollo son las siguientes:

- Bajo consumo de energía.
- Factor de forma pequeño (poco más grande que una tarjeta de crédito).
- Amplio rango de interfaces de entrada y salida.
- Compatibilidad con lenguaje de programación Python vía SO Debian.
- Procesador potente para realizar los cálculos de seguidor solar.
- Capacidad de programación remota vía USB WiFi Dongle.

Software EAGLE 7.6.0

Software CAD (diseño asistido por computadora por sus siglas en inglés) actualmente propietaria por la empresa AUTODESK, cuenta con una versión gratuita que se limita a 2 capas de ruteo y un área de trabajo de 80cm^2 , el software es compatible con los sistemas operativos Windows, Linux y MacOS.

La particularidad de este software es que nos permite hacer el diseño esquemático y el diseño de interconexiones físicas para la placa de circuito impreso según el número de capas que hayamos elegido.

La descarga del producto se puede hacer desde la siguiente dirección:
<https://www.autodesk.com/products/eagle/free-download>

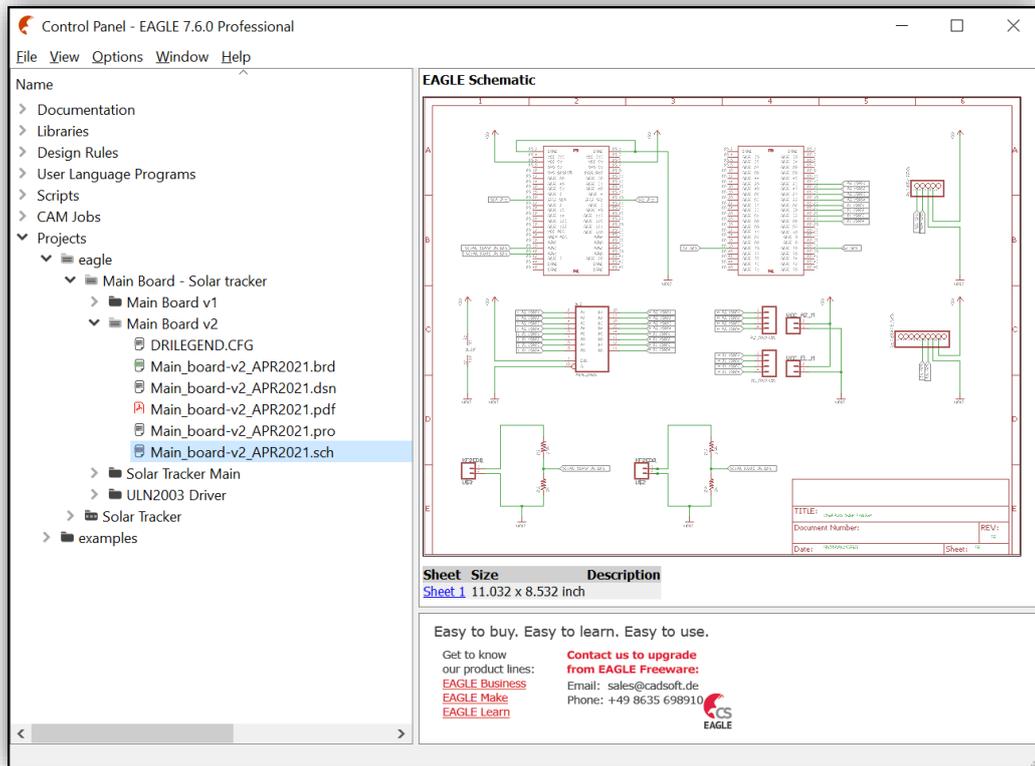


Figura 21 - Panel de Control del software EAGLE 7.6.0 con previsualización

Diagrama esquemático en software EAGLE 7.6.0

En esta ventana se diseña el circuito esquemático usando como principales herramientas las de inserción de componentes (“ADD”), la interconexión de los dispositivos (“WIRE”) y el etiquetado de las conexiones (“LABEL”).

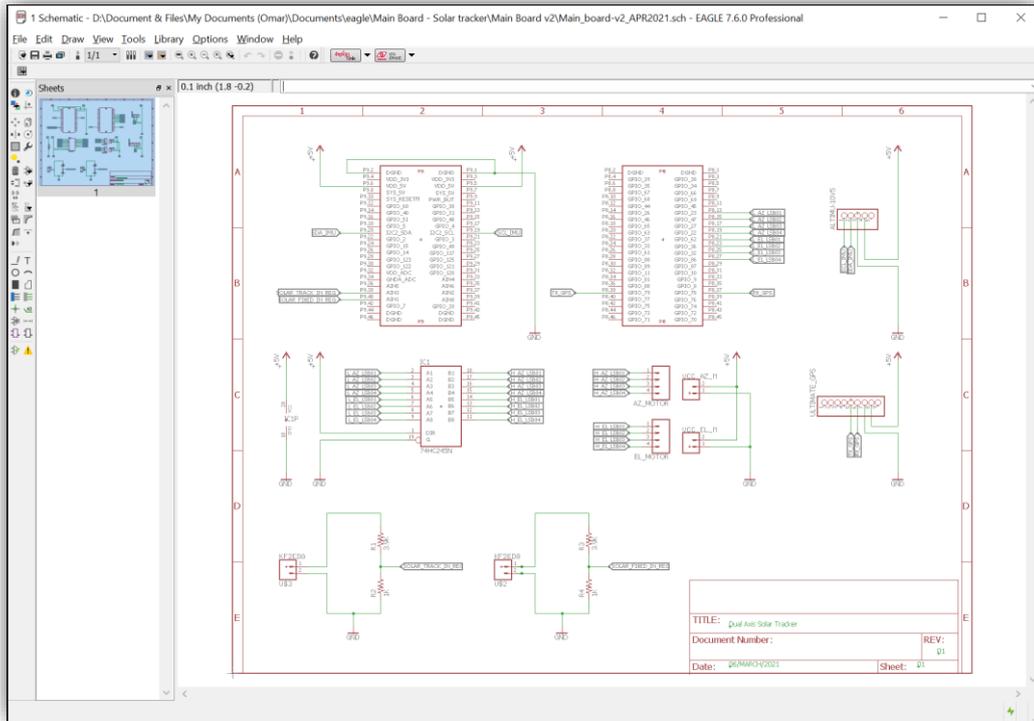


Figura 22 - Diseño esquemático del seguidor solar de doble eje

El diagrama esquemático fue desarrollado en el software EAGLE CAD en su versión 7,6; las librerías de los elementos electrónicos (resistencias, condensadores, IC, etc.) usadas para este diseño fueron un conjunto de las librerías estándar de EAGLE, diseños propios para ciertos dispositivos y librerías de Sparkfun Electronics liberada bajo licencia Creative Commons.

Diagrama PCB en software EAGLE 7.6.0

En esta ventana se diseña la distribución física de los elementos electrónicos dentro de la placa de circuito impreso, los elementos electrónicos son previamente importados del diseño esquemático de forma automática, la posición de los elementos dentro de la placa se hace de manera manual, y para la interconexión de los elementos se usó la herramienta “AUTOROUTE” para 2 capas la cual dio una primera versión del ruteo y luego de manera manual se reacomoda el ruteo con la herramienta “RIPUP” para luego completar la ruta con la herramienta “ROUTE”.

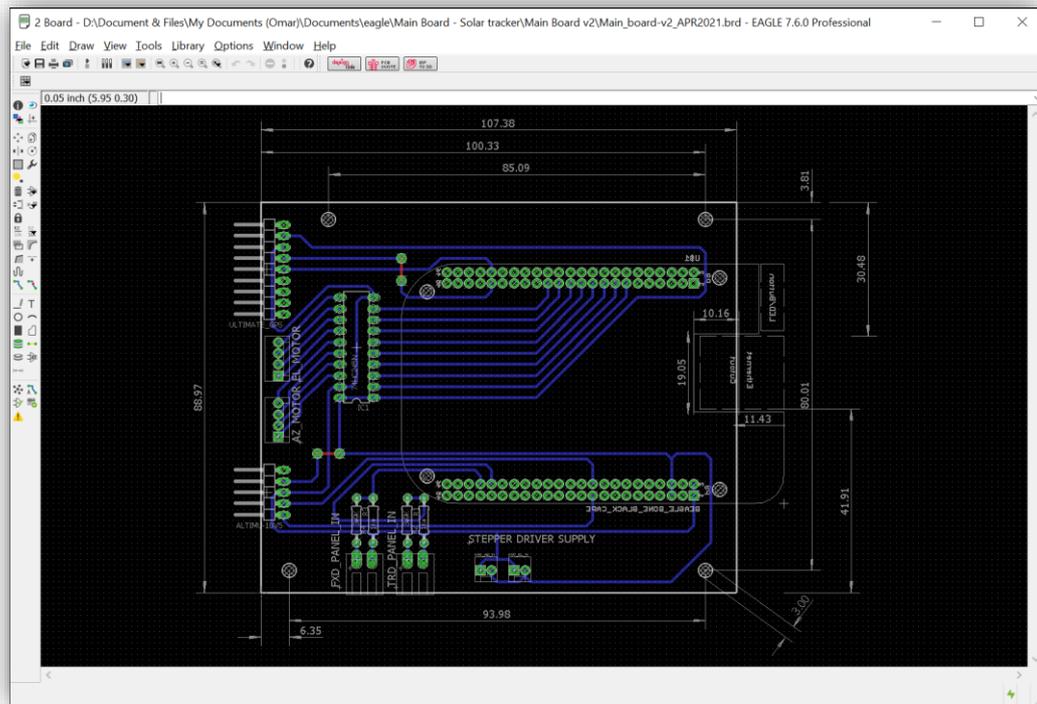


Figura 23 - Diagrama PCB del seguidor solar de doble eje

Módulo Adafruit Ultimate GPS v3

Este módulo diseñado por la empresa norteamericana Adafruit tiene un factor de forma pequeño y es de bajo consumo; permite leer las tramas GPRMC y GPGGA de las cuales no permite extraer hora, latitud, longitud para la trama GPRMC y la altura en m.s.m.m. para la trama GPGGA a través de la interface serial que se conecta con el Beaglebone Black.

El diseño del dispositivo el cual podemos ver en la Figura 24 está disponible en la página de Adafruit y se puede obtener bajo el siguiente enlace: <https://learn.adafruit.com/adafruit-ultimate-gps/downloads>

cada dispositivo mediante la interface I2C y la dirección destinada por el fabricante para cada sensor.

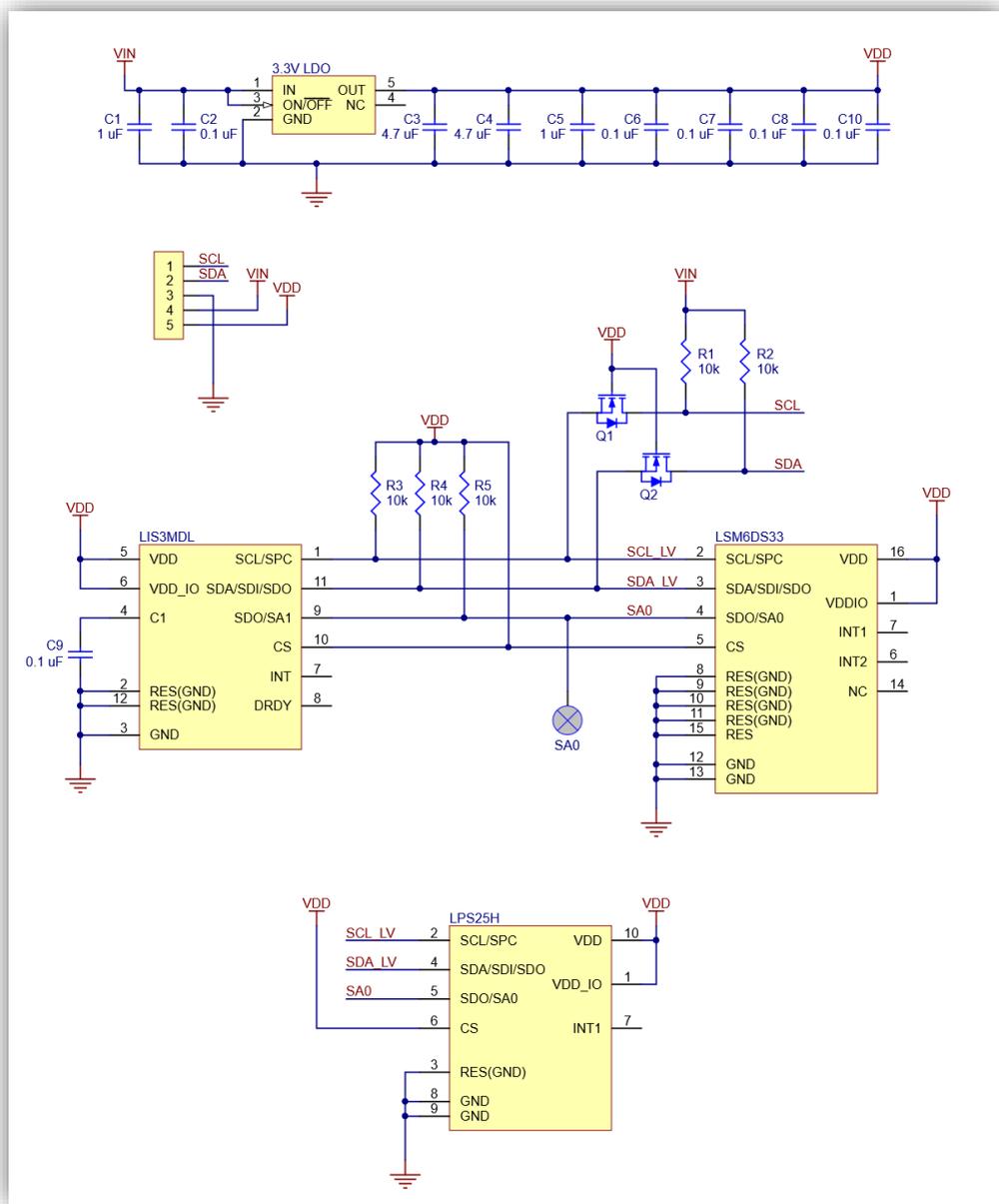


Figura 25 - Diagrama esquemático de AltiIMUv5 de Pololu.

Fuente: ((altimu-10-v5-schematic.pdf, s/f))

Las principales características de la elección del dispositivo fueron:

- Factor de forma compacto, en un único elemento se tienen 4 sensores.
- Bajo consumo energético (5ma@5V)

- Alta resolución 16 Bits para el acelerómetro, giroscopio y magnetómetro y 24 Bits para el altímetro.
- Amplio y altamente configurable rango de sensibilidad.

De este módulo extraeremos la información cruda sin ser procesada por filtros para luego mediante mecanismos de calibración que veremos más adelante podamos calcular el ángulo azimutal y el ángulo de elevación de sus usando las fórmulas 10 y 9 respectivamente.

Módulo de Control de Motor Paso a Paso.

El motor elegido para el SS es el 28BYJ-48, que es comúnmente usado para proyectos electrónicos pequeños, este motor funciona con un voltaje de alimentación de 5V, cuenta con 4096 pasos por vuelta lo cual nos da aproximadamente 0.088° por vuelta.

El Motor paso a paso es controlado por el controlador ULN2003, un circuito integrado muy accesible el cual fue adquirido como una placa de circuito impreso con los conectores molex específicos para el motor paso a paso (5 pines); este driver recibe la señal directamente del conversor lógico de nivel la cual a su vez recibe la señal de los puertos digitales del Beaglebone Black.

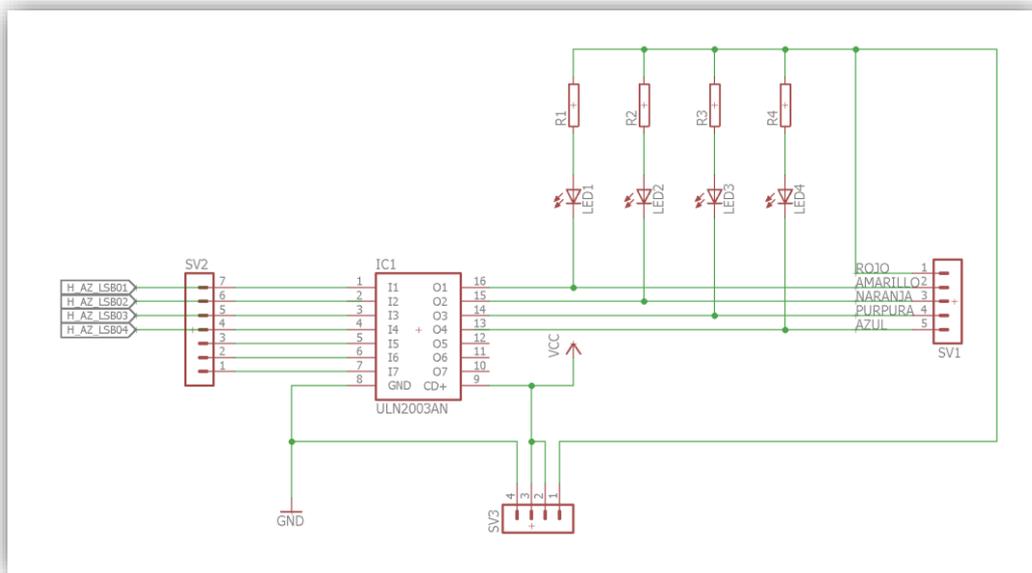


Figura 26 - Diseño esquemático del módulo controlador del motor paso a paso

Objetivo

- Establece una interfaz directa entre beaglebone black y los motores paso a paso.
- La misma interfaz es usada tanto para el motor de elevación como el motor de azimuth.

- El diseño no es de autoría propia y fue basado en el diseño del siguiente enlace https://www.elecrow.com/wiki/index.php?title=ULN2003_Stepper_Motor_Driver.

Convertidor Lógico de Nivel

El circuito integrado usado para el SS es el 74HC245 que sirve como un puente entre el Beaglebone Black y el controlador del motor paso a paso; este circuito integrado esta dentro de la placa principal del SS.

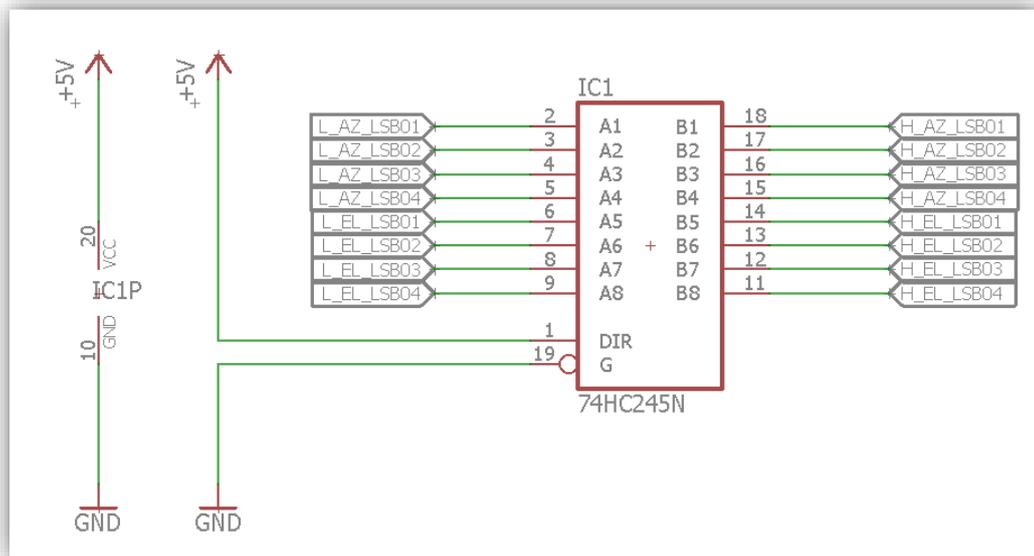


Figura 27 - Diseño esquemático del módulo convertidor lógico de nivel usando el circuito integrado 74HC245

Objetivo

- Convertir la señal digital (1/0) del Beaglebone Black la que funciona con 3.3v a 5v que es la que usa el controlador de los motores paso a paso.
- La alimentación de este circuito es con 5v.

Atenuador de Voltaje para Paneles Solares

Los puertos ADC (conversor analógico digital) del Beaglebone Black admite como voltaje máximo de 1.8V por lo que el voltaje de salida del panel solar podría quemar el puerto del Beaglebone Black, es por ello que usando el voltaje máximo de entrada y teniendo como referencia de voltaje máximo de salida se calcula las resistencias comerciales que para el diseño del atenuador, cabe resaltar que para tener las mediciones más parejas se adquieren varias resistencias del mismo valor y se eligen las que estén más cerca al valor que indican según su código de colores.

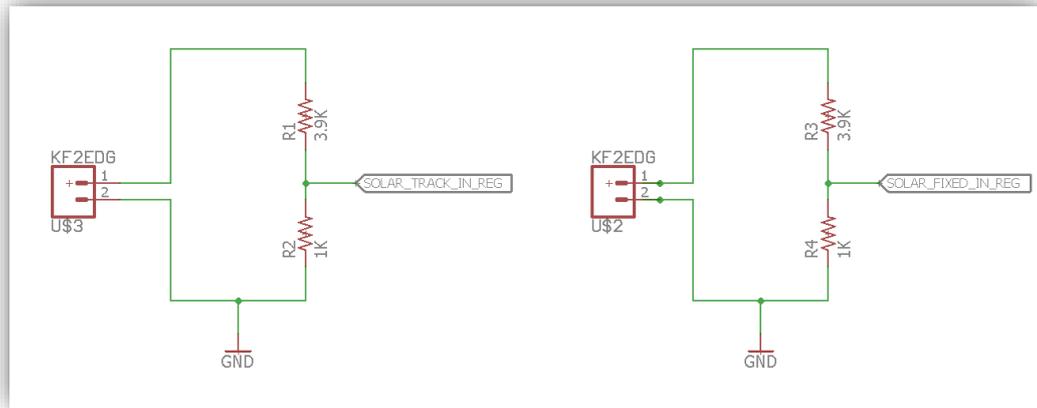


Figura 28 - Diseño esquemático del circuito divisor de voltaje

Objetivo

- Atenuador de voltaje o un divisor de voltaje para conectar a las entradas análogas del Beaglebone Black.
- El diseño es el mismo para ambos paneles que tienen un voltaje de salida máximo de 7.2V (Teóricamente el panel solar es de 7.5V sin embargo en las fechas de muestreo el voltaje máximo de salida es de 7.2V).

Diseño de Software.

Para el diseño de programación de software se utiliza la metodología ágil XP o también llamada extreme programming, la cual encaja con las características de este proyecto por ser a corto plazo, manteniéndose la simplicidad en las soluciones a implementar y basándose en una retroalimentación continua. (Letelier & Penadés, 2006)

El código del proyecto se escribió en lenguaje Python 2.7 por las siguientes razones:

- Compatibilidad con sistemas embebidos como Beaglebone y Raspberry.
- Sintaxis sencilla.
- Programación orientada a objetos.
- Amplio uso en la comunidad de programación.
- Funciona con licencia libre (Python Software Foundation License).

Eclipse IDE 2020-12.

El entorno de desarrollo integrado o también llamado IDE por sus siglas en inglés elegido para este desarrollo de software del presente proyecto es el Eclipse IDE 2020-12 inicialmente desarrollado por la empresa IBM bajo licencias de software libre específicamente la Eclipse Public License (“Eclipse (software)”, 2021), las razones más importantes por la elección de esta plataforma son las siguientes:

- Compatibilidad con Python 2.7.
- Software libre y de fácil acceso a la descarga.
- Amplio uso en la comunidad de programación.
- Herramientas de fácil uso.
- Soporta gestión de archivos por SFTP y terminales SSH.

El IDE Eclipse puede descargarse de manera gratuita desde el siguiente enlace: <https://www.eclipse.org/downloads/>

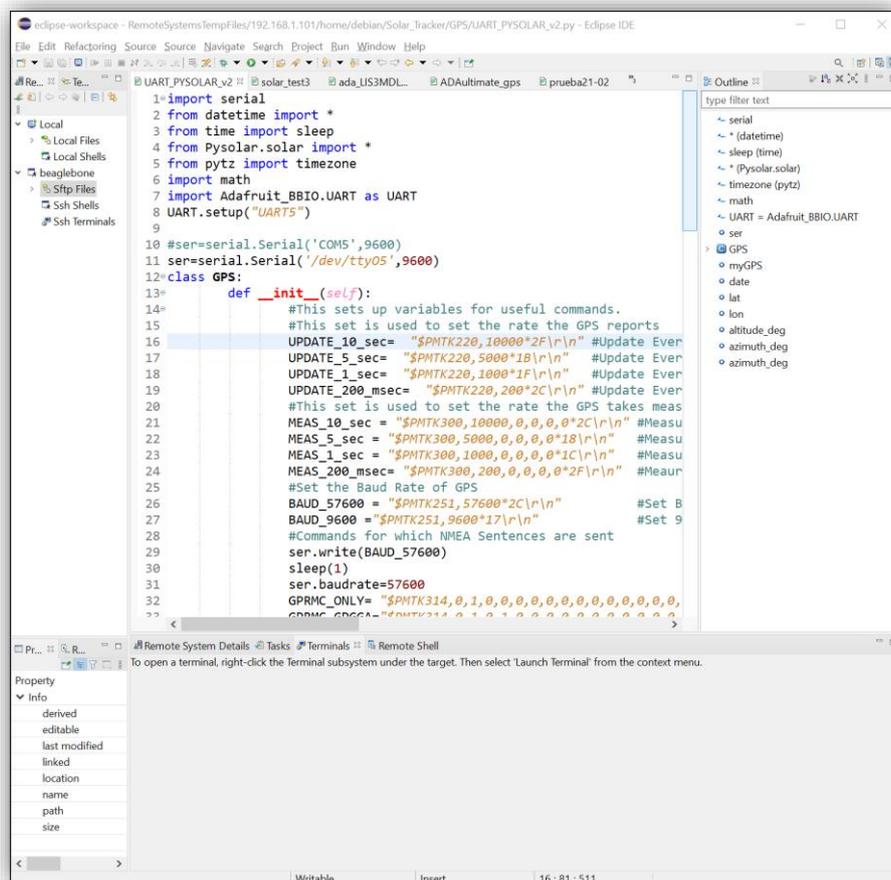


Figura 29 - Interfaz de principal del Eclipse 2020-12

Desarrollo de Software.

El desarrollo de software se hizo tomando en cuenta el siguiente diagrama de flujos:

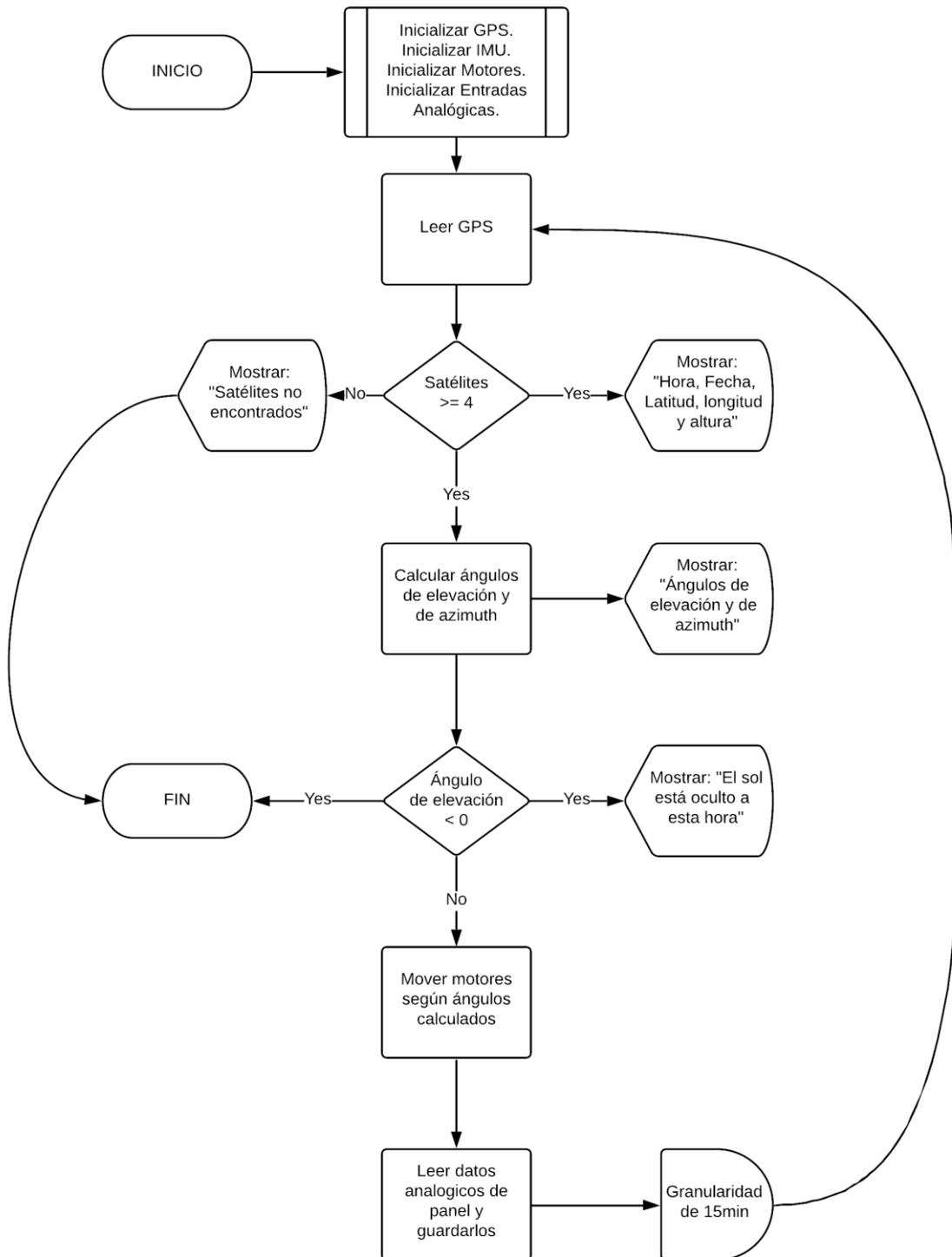


Figura 30 - Diagrama de Flujos del Seguidor Solar de 2 Ejes

Los principales módulos del programa son los módulos de GPS, módulos IMU, módulos actuadores y módulos de voltaje o de entrada analógica.

- **Módulo GPS:** Módulo encargado de procesar la información proveniente de los satélites como las coordenadas, la hora, la altura del seguidor solar, con aquella información se trabaja para calcular los ángulos azimutales y de elevación.
- **Módulo Actuator:** Módulo encargado de dar el array de bits para el movimiento y detención de los motores paso a paso.
- **Módulo de IMU:** Módulo encargado de sensar la información de el acelerómetro y magnetómetro, que posteriormente se convierten en los ángulos de elevación y azimutal según los dispositivos de los que provienen respectivamente.
- **Módulo de Entradas Analógicas:** Módulo encargado de activar entradas analógicas y de guardar en un archivo de texto los voltajes recibidos de los paneles solares (fijo y seguidor solar) cada 15 minutos para luego compararlos.

El programa empieza inicializando todos los módulos (GPS, IMU, motores, entradas analógicas); luego el módulo GPS se encargará de leer la trama GPRMS proveniente del satélite, y buscará dentro de ella información relevante para posteriormente procesarla, uno de los datos importante es el número de satélites los cuales sirven para tener una información más precisa y confiable, en este caso el mínimo número aceptado es de 4 satélites, se encontrar ese número mínimo podemos proceder con el programa de lo contrario el programa llega a su término.

Una vez que el número de satélites sea aceptable, se procede a trabajar con la información de las coordenadas provistas, con ello y mediante operaciones trigonométricos se procede a calcular los ángulos de elevación y azimutales, que son fundamentales para la colocación del panel y tener una incidencia solar directa o de 90° respecto de la superficie del panel, si es que el ángulo de elevación es negativo es debido a que no existe incidencia de luz solar en esas coordenadas a esa hora del día, lo cual sugiere que sea de noche para que eso ocurra, si eso pasa, el programa llega a su término.

Asumiendo que el sol no esté oculto y el ángulo de elevación sea mayor a cero, los motores empezarán a moverse teniendo como objetivo el los ángulos azimutales y de elevación, uno para cada motor y no en simultáneo, se buscará el objetivo por medio de retroalimentación simple trabajando con una precisión de $\pm 3^\circ$; la misma precisión se mantendrá en cada motor.

Una vez alcanzado el ángulo objetivo para cada motor lo cual toma un aproximado de 10 a 15 segundos en colocar el panel en posición se tomará una muestra instantánea del voltaje de ambos paneles (el fijo y el articulado por el seguidor solar) y se guardará en un archivo de texto simple para su posterior comparación.

Proceso de fabricación del Seguidor Solar de 2 Ejes

La fabricación del seguidor solar de 2 ejes fue hecha en 3 partes las cuales son:

- Fabricación de la placa de circuito impreso para todas las interfases.
- Fabricación de la estructura del seguidor solar.
- Ensamblado de los dispositivos mecánicos y eléctricos.

La fabricación duró 3 días sin considerar el proceso de diseño, en estos 3 días se ejecutó la placa de circuito impreso, el corte láser de la estructura y el ensamble de los dispositivos para el correcto funcionamiento del seguidor solar.

Fabricación de la placa de circuito impreso

Para la fabricación de la placa de circuito impreso se usa una placa de fibra de vidrio de 1 sola capa, la cual fue diseñada en EAGLE tal como se aprecia en la siguiente imagen:

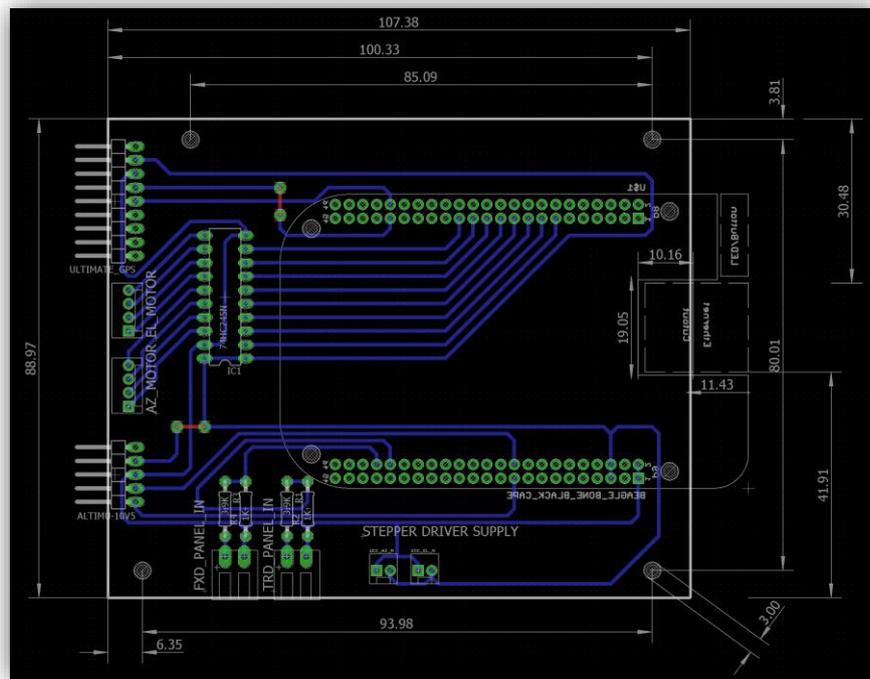


Figura 31 - Diagrama de ruteo para la placa de circuito impreso

En ella hemos obtenido las medidas de la placa y de los agujeros que nos servirán de anclaje a la estructura que sostendrá los paneles y los demás componentes del panel solar. La fabricación de la placa se hizo de manera artesanal usando la tradicional técnica de imprimir las rutas con tóner sobre couché, y luego aplacando la cara del papel con el tóner contra la cara de bronce de la placa de fibra de vidrio, y aplicando calor de una plancha doméstica por alrededor de 5 min hasta que el tóner quede impregnado sobre la placa de fibra de vidrio, luego en un recipiente preferentemente de plástico dónde pueda entrar con holgura la placa de fibra de vidrio se rellena de óxido férrico hasta que cubra completamente la placa, se espera por alrededor de 15 min, y se verifica que las partes de cobre que no han sido cubiertas por el tóner hayan desaparecido a causa del óxido férrico, paso siguiente se eliminan los rastros de óxido férrico se lava con agua la placa y se procede a hacer los huecos para los dispositivos que van a entrar en el PCB, finalmente se procede a soldar los dispositivos como resistencias, conectores e IC para luego testear el dispositivo, el resultado físico del PCB es el siguiente:

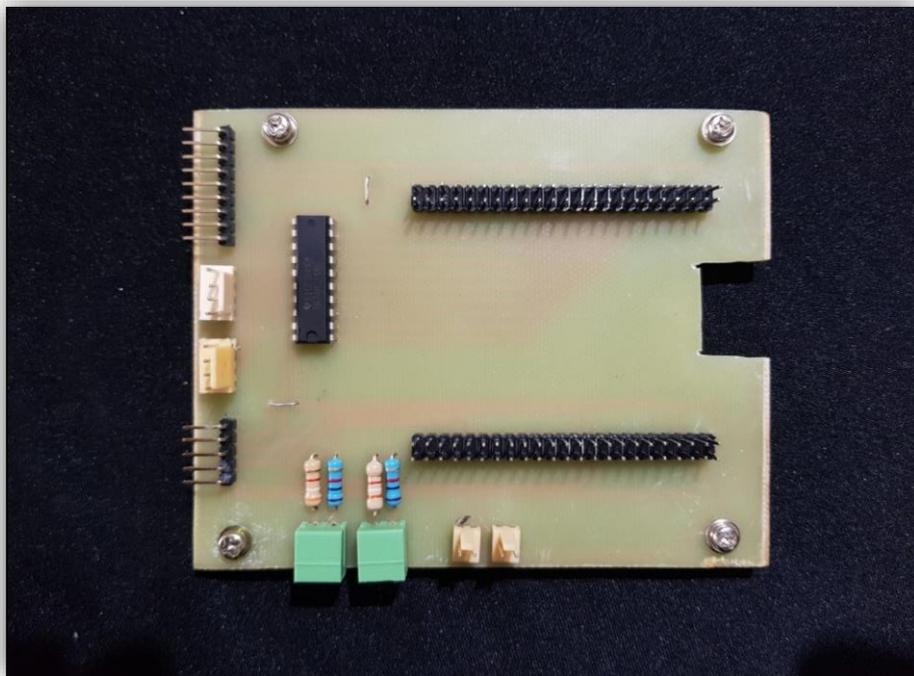


Figura 32 - Tarjeta Principal para entrada de interfaces del sistema seguidor solar de 2 ejes (anverso)

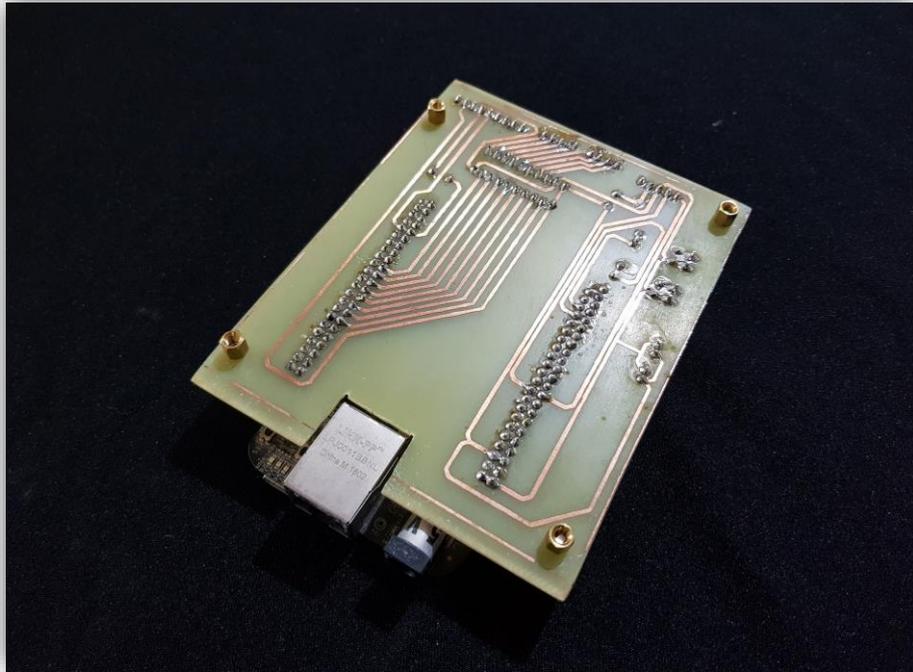


Figura 33 - Tarjeta principal para entrada de interfaces con Beaglebone Black (reverso)



Figura 34 - Tarjeta Principal para entrada de interfaces con Beaglebone Black instalado

Fabricación de la estructura del seguidor solar

La fabricación de la estructura del seguidor solar se elige el plexiglass o también llamado acrílico de 3mm de grosor el diseño inicialmente se plantea en la plataforma SketchUp en su versión gratuita, actualmente propiedad de Autodesk, la idea de esta estructura es que sea una caja de 81mm x 231mm x 131mm con los diferentes agujeros que permitan el anclajes de las placas de circuito impreso, de los motores y con es espacio suficiente para el desplazamiento de los cables, tal como se puede ver en las siguientes imágenes:

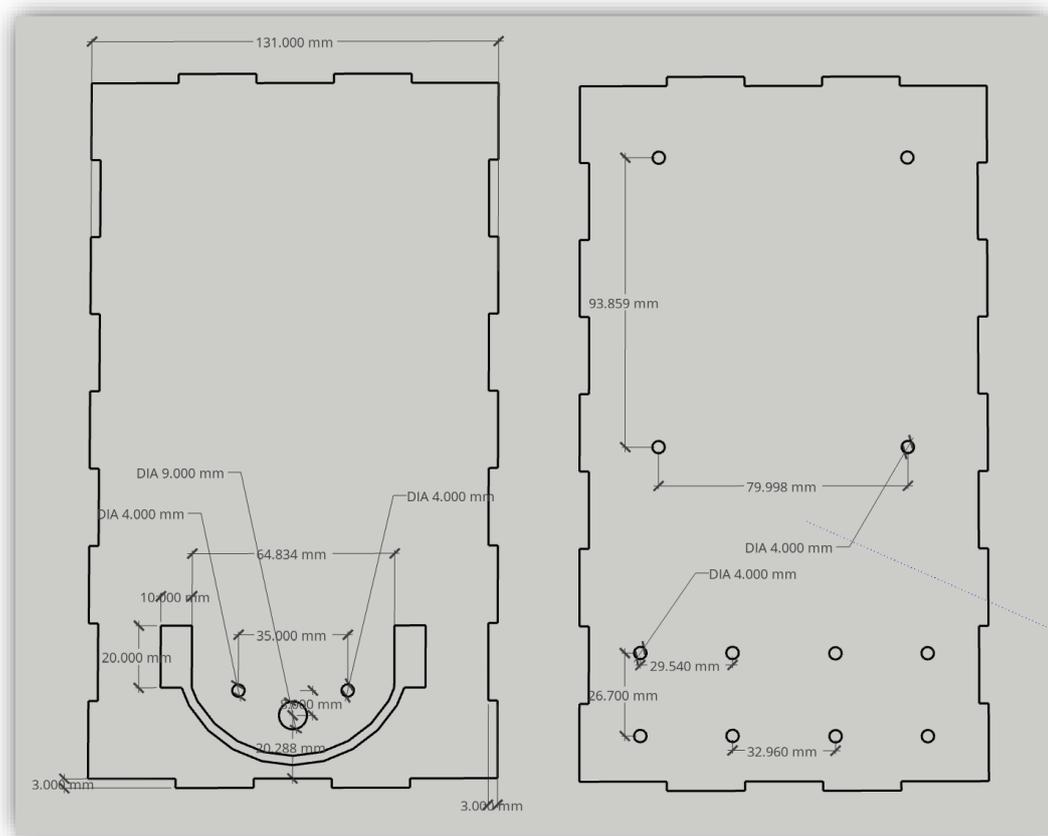


Figura 35 - Tapa superior con anclaje a motor PaP (izquierda) y Tapa inferior con anclaje para módulos controladores y tarjeta principal (derecha)

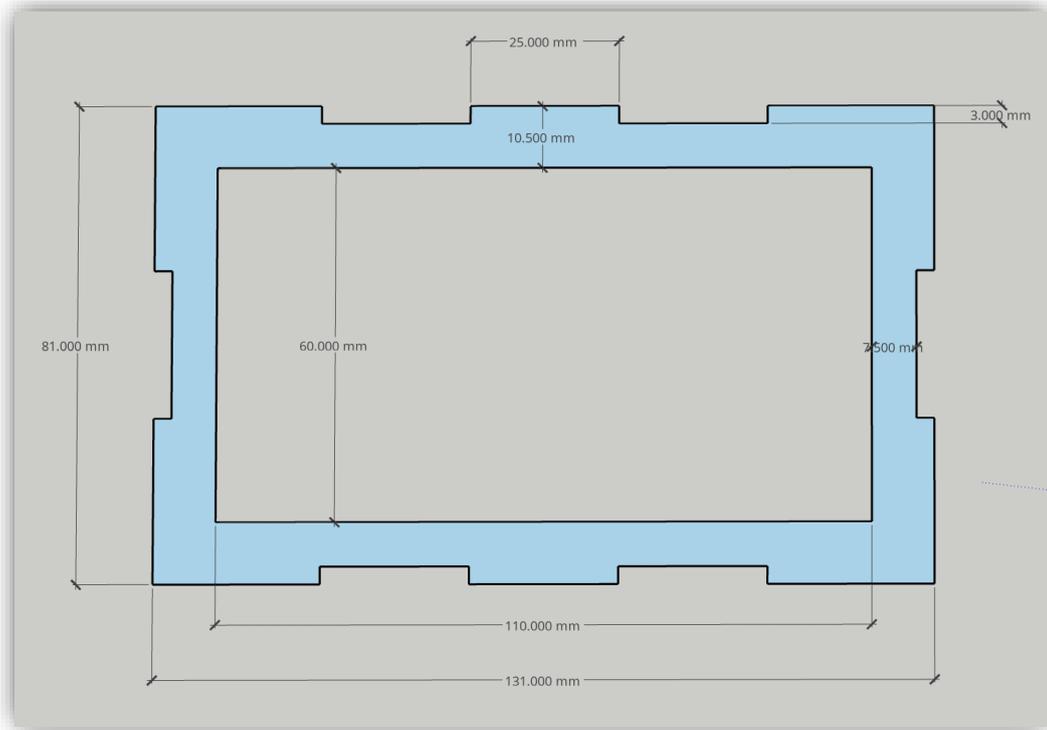


Figura 36 - Tapa lateral de la estructura del seguidor solar

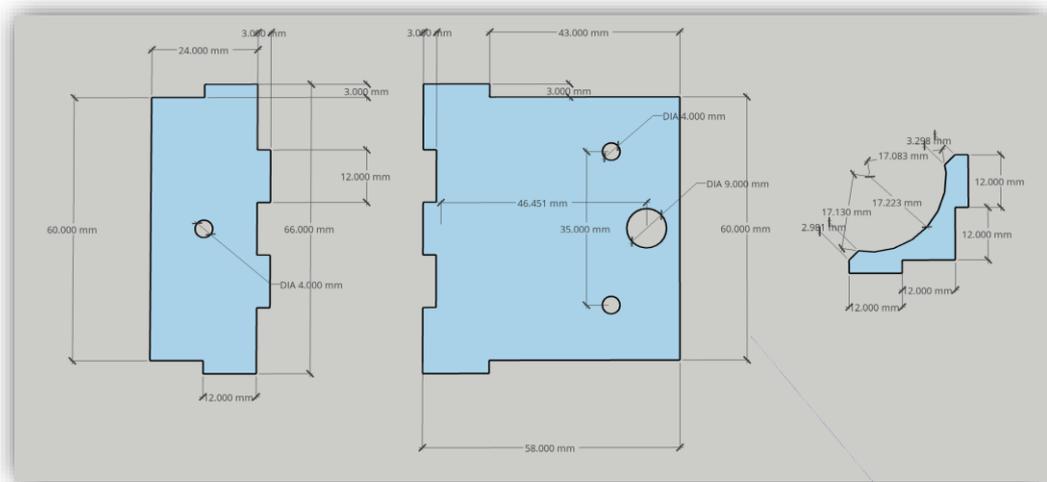


Figura 37 - Estructura de soporte para los motores paso a paso (PaP)

Luego del diseño de esta estructura se envía a una empresa especializada en corte láser para el moldeado de las partes, que finalmente se unirán con pegamento se secado rápido basado en cianocrilato.

En las siguientes imágenes podemos ver el resultado del corte láser y las estructuras pegadas con cianocrilato.

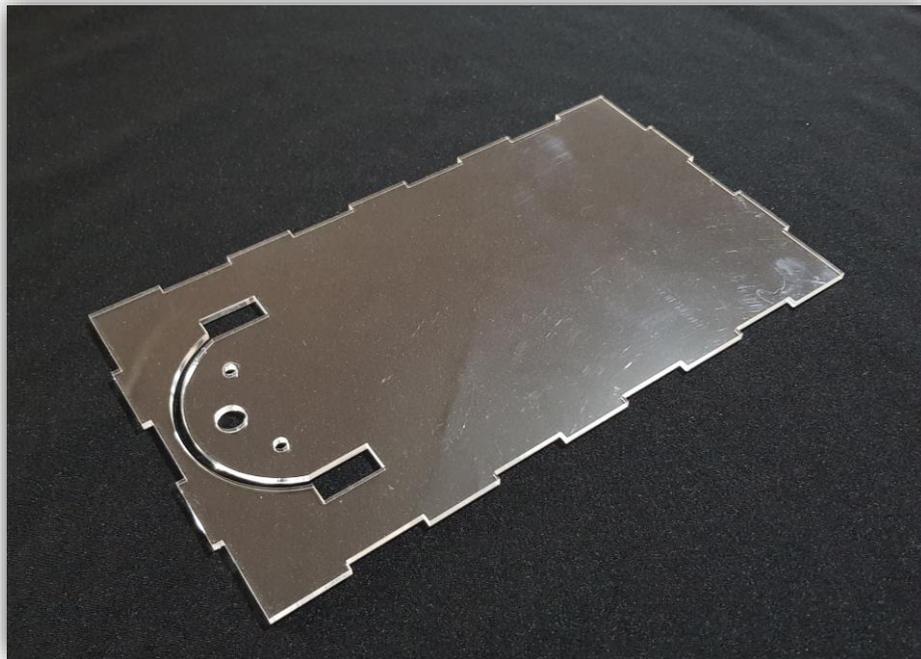


Figura 38 - Parte superior del seguidor solar con canales para el paso de cables hacia los motores

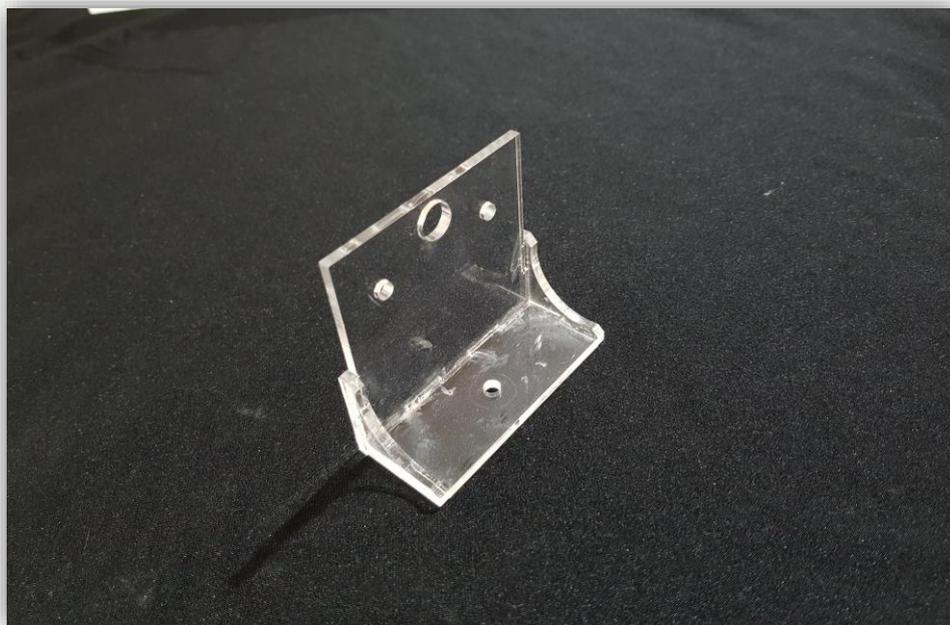


Figura 39 - Soporte para el motor de elevación

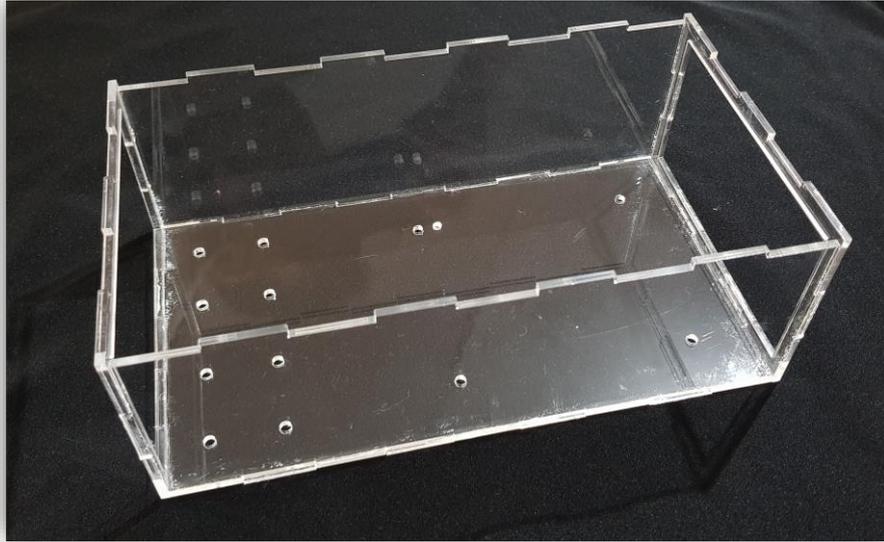


Figura 40 - Estructura inferior para anclaje de las tarjetas del seguidor solar

Ensamblado de los dispositivos mecánicos y eléctricos.

El ensamblado de todos los dispositivos electrónicos se hizo con conectores molex y headers estándar, los cables se cortaron y se ensamblaron a mano todas las piezas entraron a medida tal como se puede ver en las siguientes imágenes:

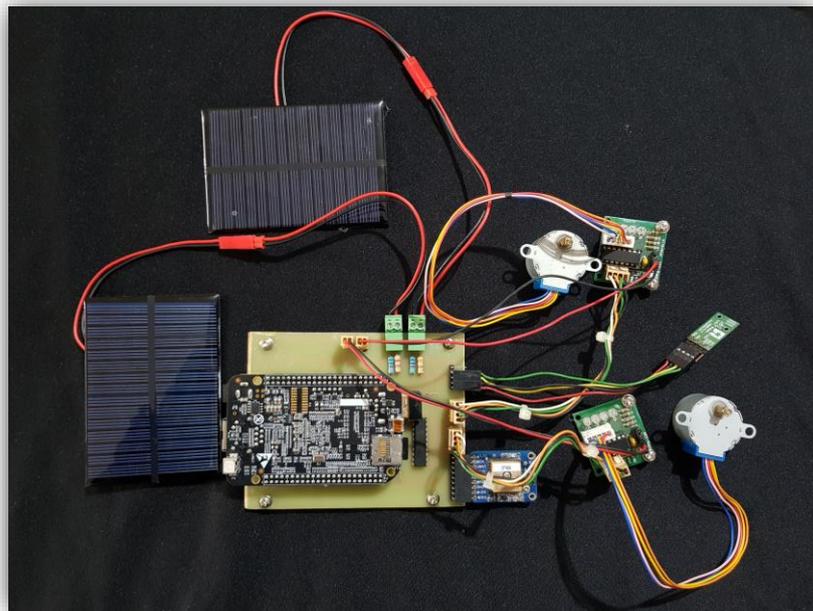


Figura 41 - Ensamblado eléctrico de los dispositivos a la tarjeta principal del seguidor solar

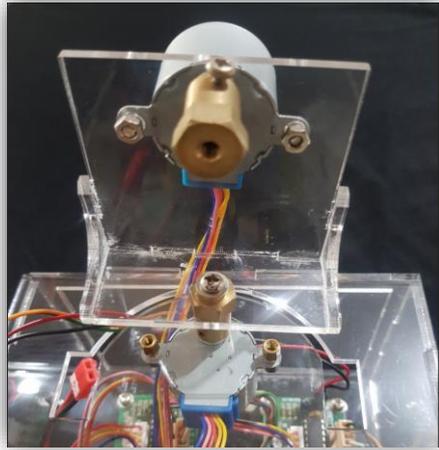


Figura 42 - Ensamblado de los soportes para los motores de elevación y azimuth

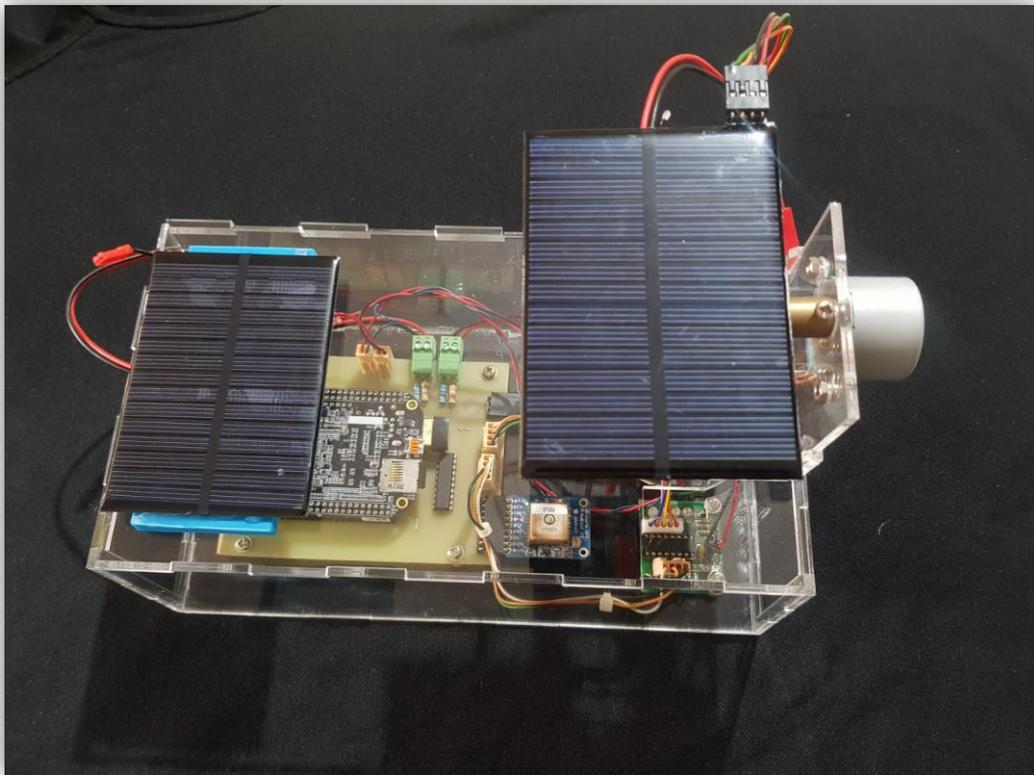


Figura 43 - Ensamblado total del seguidor solar de 2 ejes

Preparación del Beaglebone Black.

Luego de terminada y armada la estructura junto con el ensamble de los diferentes componentes hacia la tarjeta principal del seguidor solar, el primer paso es descargar la imagen o el sistema operativo para el Beaglebone Black los sistemas operativos se

encuentran disponibles en el siguiente enlace: <https://beagleboard.org/latest-images> paso seguido se procede a grabar la imagen del sistema operativo elegido en una tarjeta MicroSD para ello se puede utilizar diferentes programas, en este caso se usó BalenaEtcher, que es un programa de descarga gratuita y simple de usar, se puede descargar del siguiente enlace: <https://www.balena.io/etcher/>.

Una vez completado los pasos anteriores se procede a insertar la tarjeta MicroSD al Beaglebone Black y paso seguido se procede a energizar el seguidor solar, principalmente la distribución de la energía llega a través de la tarjeta Beaglebone Black, quien recibe 5V desde una batería externa y a través de ella y de manera directa energiza los demás componentes (motores, IMU, GPS).

La tarjeta Beaglebone Black también puede energizarse a través de su único puerto USB pero no brindaría la energía suficiente a los demás componentes (máximo 100mA) es por ello que se usa la primera opción.

Procederemos a iniciar sesión en el Beaglebone Black, para ello hay 3 opciones, las cuales son las siguientes:

- De manera local, conectando teclado, mouse y video al Beaglebone Black.
- Tethering USB, conectando el USB Client del Beaglebone Black a una PC.
- De manera remota, a través del puerto ethernet conectando un cable de red.
- De manera remota, insertando un WiFi Dongle al puerto USB Host del Beaglebone Black.

Para esta actividad se elige un WiFi Dongle, el cual tiene un chipset RTL8188EUS compatible con el SO Debian. El motivo de la elección del WiFi Dongle es que le proporciona mayor movilidad al seguidor solar que es básico para poder hacer las pruebas de calibración del sensor IMU.

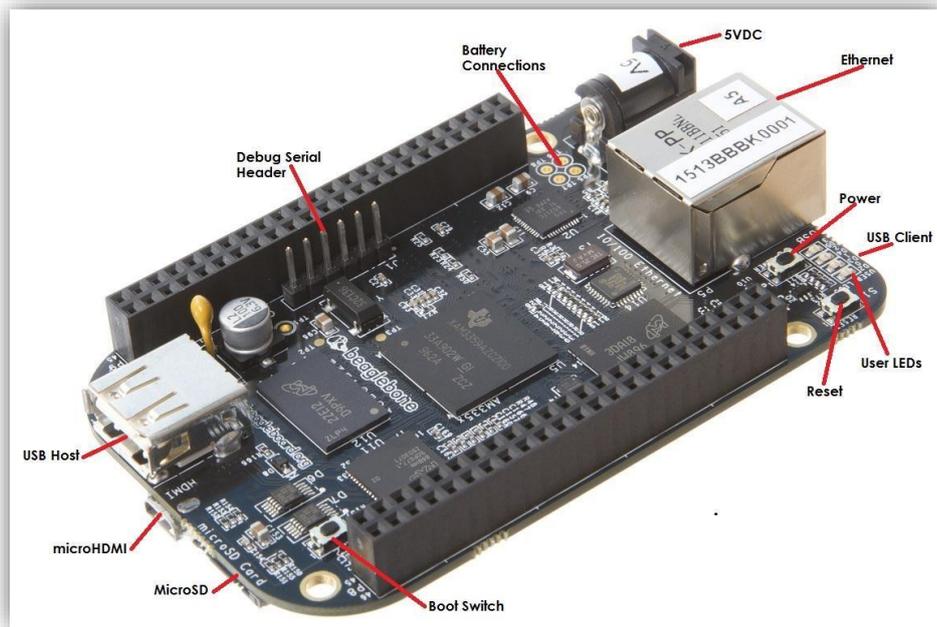


Figura 44 - Principales interfaces del Beaglebone Black

Fuente: (System Reference Manual · Beagleboard/Beaglebone-Black Wiki, s/f)

Luego de ello nos iniciaremos sesión por tethering o con periféricos (conectando teclado, pantalla y ratón al Beaglebone Black) para poder configurar la red inalámbrica a la que el WiFi Dongle tiene que conectarse y la IP que se le asignará al Beaglebone Black. Hecho todo lo anterior y dentro de la misma red del Beaglebone Black, abriremos una sesión en Eclipse y con la herramienta “Remote Systems” insertaremos la IP del Beaglebone Black, el usuario y la contraseña, para conectarnos a través de SSH con el dispositivo, con ellos podremos tener acceso remoto al sistema de archivos y al terminal del Beaglebone Black, para poder empezar a programar remotamente y con la facilidad del editor Eclipse. Es importante resaltar que deberán estar actualizados los repositorios de OS Debian, junto con todas sus librerías y dependencias para poder trabajar fluidamente dentro del entorno Linux en el Beaglebone Black.

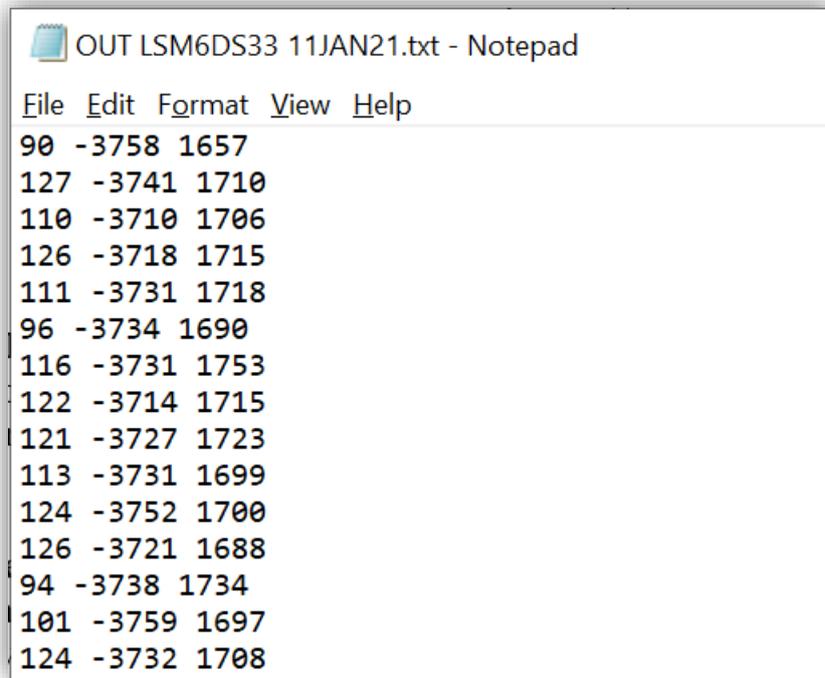
Preparación del IMU

Este paso es muy importante ya que de ello depende la posición del panel solar respecto a los rayos de sol o de la incidencia de la luz sobre el panel.

Como fuera mencionado anteriormente el IMU seleccionado para este proyecto es el AltIMU-10 v5, este dispositivo tiene que ser calibrado debido a las distorsiones que puede presentar dependiendo del entorno que rodea al seguidor solar y de la misma estructura del

seguidor solar, y se procede a tratar de mitigar las distorsiones de Hard Iron y Soft Iron explicadas en el apartado anteriores.

Para ello recolectaremos la mayor cantidad de datos en formato crudo (números enteros) tal como puede verse en la Figura 45 según el número de bits de resolución que tenga la salida del magnetómetro y del acelerómetro.



```
OUT LSM6DS33 11JAN21.txt - Notepad
File Edit Format View Help
90 -3758 1657
127 -3741 1710
110 -3710 1706
126 -3718 1715
111 -3731 1718
96 -3734 1690
116 -3731 1753
122 -3714 1715
121 -3727 1723
113 -3731 1699
124 -3752 1700
126 -3721 1688
94 -3738 1734
101 -3759 1697
124 -3732 1708
```

Figura 45 - Lectura magnética cruda salida del sensor

Con ello procederemos a usar una herramienta llamada Magneto desarrollada por el usuario Merlin, que nace como una mejora la herramienta MagCal.exe inicialmente desarrollada por PLAN Research Group en la Universidad de Calgary, Alberta, Canadá.

Esta herramienta nos permite hallar el Bias y los factores de escala combinados, desalineamientos y distorsiones de Soft Iron, (por ello es que es importante que al capturar los datos sea con toda la estructura del seguidor solar ya armada y no el sensor aislada de la estructura) en una matriz de 3x3 siendo cada columna valores que afectan a cada eje, la descarga de la herramienta se puede hacer de forma gratuita del siguiente enlace:

<https://sites.google.com/site/sailboatinstruments1/home>

Para obtener el bias y los factores de corrección debemos hacer el siguiente procedimiento:

- Grabar en un archivo de texto (*.txt) un conjunto de medidas estáticas tanto del acelerómetro como del magnetómetro, en un gran número de orientaciones tratando de dibujar una esfera, siendo la columna primera para los valores del eje “X”, la segunda para los valores del eje “Y” y la tercera para los valores del eje “Z”, tal como se muestra en la Figura 45, se recomienda que este proceso sea alejado de objetos metálicos ajenos a la estructura del seguidor solar así como también esté alejado de aparatos electrónicos o cables energizados.
- Procesar la información con la herramienta Magneto, subiendo el archivo de texto con la información recolectada (mientras más movimiento se recolecte y se trate de completar una esfera es mejor para tener coeficientes de escalamiento más precisos) tal como se aprecia en la Figura 46, y en el campo “Campo Gravitacional” se pone por defecto la unidad.
- Luego de ello se procederá a usar la siguiente Ecuación 18 dentro del algoritmo para tener la data ya finalmente calibrada.

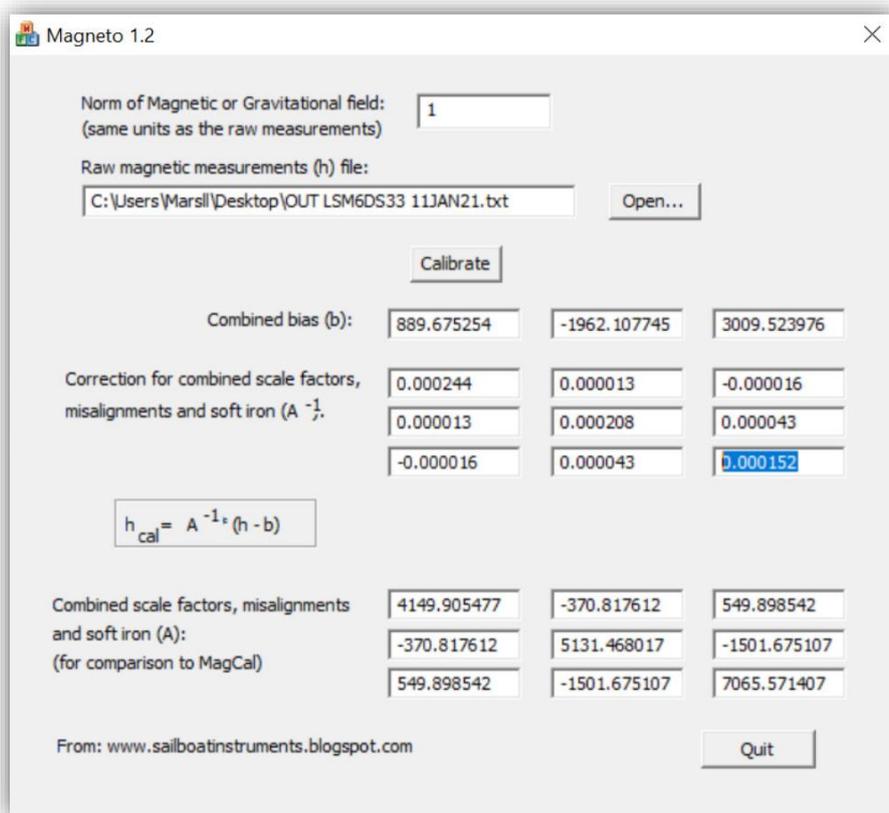


Figura 46 - Resultados de la calibración usando Magneto

Ecuación 18

$$h_{cal} = A^{-1} * (h - b)$$

Dónde:

h_{cal} = Data Calibrada.

A^{-1} = Matriz de 3x3 con factores de escalamiento.

h = Matriz de 3x1 con magnitudes del sensor en cada eje.

b = Matriz de 3x1 con valores del Bias

La herramienta Magneto se basa en líneas generales en el principio descrito en el apartado “Distorsiones Hard-Iron y Soft-Iron” descritas en este documento, en el cual principalmente para calcular la distorsión Soft-Iron primero se tiene que trasladar el centro a las coordenadas de referencia (0,0) usando el Bias y luego aplicar los factores de escalamiento para convertir la figura elíptica mostrada en la Figura 13, en lo más cercano a una esfera perfecta. El cálculo de las ecuaciones quedan por fuera de esta investigación sin embargo se cita que el autor de la herramienta Magneto 1.2 se basó en la investigación de (Gebre-Egziabher et al., s/f)

```
def readPitchCal(self):
    accData = self.readAccelerometer()
    accDataRow = np.array([[accData.x],[accData.y],[accData.z]])
    accInvertedMatrix = np.array([[self.acc11,self.acc12,self.acc13],[self.acc21,self.acc22,self.acc23],[self.acc31,self.acc32,self.acc33]])
    accBias = np.array([[self.accBiasX],[self.accBiasY],[self.accBiasZ]])
    accCalibratedMatrix = (accInvertedMatrix).dot(accDataRow - accBias)
    accData.x = accCalibratedMatrix[0]
    accData.y = accCalibratedMatrix[1]
    accData.z = accCalibratedMatrix[2]
    pitch = math.degrees(math.atan2(-accData.x, math.sqrt(accData.y*accData.y + accData.z*accData.z)))
    return pitch
```

Figura 47 - Ejemplo de código para calcular el ángulo de elevación calibrado usando la Ecuación 18.

En la Figura 47, muestra el código de ejemplo el cual usando la Ecuación 18, se toma como información de entrada la data en crudo (DataRow) proveniente del sensor, esa data es usada para restarla con los valores de bias y luego ese resultado multiplicarlo con la matriz inversa calculada con la herramienta Magneto 1.2.

CAPÍTULO IV: PRUEBAS Y RESULTADOS

Las pruebas se hicieron en cada módulo independiente, según los módulos mostrados en el capítulo anterior, cada prueba se hizo a nivel lógico como físico, a nivel físico se conectaba eléctricamente el módulo a probar (GPS, IMU, Motores, ADC) al tarjeta interfaz del Beaglebone Black luego, se realizaban las pruebas a nivel lógico con la programación creada específicamente para cada módulo usando programación orientada a objetos, la cual facilita mucho la tarea en vez de un lenguaje estructurada, finalmente se invocaron desde el programa principal según lo diseñado en la Figura 30. En este capítulo se abordará las pruebas del programa principal, mostrando los 3 casos de funcionamiento.

Funcionamiento del Seguidor Solar

Como fuera mencionado inicialmente el Seguidor Solar funciona bajo un entorno linux, específicamente debian, que, luego de habernos conectado remotamente al Beaglebone Black, ejecutamos con modo superusuario el código escrito en python que para este caso en particular se llama “STR_8-8-21.py” y para ello se nos va a presentar tres caso, los cuales son los siguientes:

- Caso 01: Este caso ocurre cuando el dispositivo, específicamente el GPS no encuentra satélites para poder recopilar la información de la hora, posición y altura, que con ello es fundamental para que pueda funcionar de manera automática, el seguidor solar está programado para que intente buscar al menos 4 satélites en 5 lecturas de las tramas con un espacio entre cada lectura de 30 segundos, tal como se puede ver en la Figura 48.

```
debian@beaglebone:~/Solar_Tracker/Maintracker_v2$ sudo python STR_8-8-21.py
GPS Initialized
WARNING: Very few satellites were found, 5 attemps left to exit, next try in 30sec.
WARNING: Very few satellites were found, 4 attemps left to exit, next try in 30sec.
WARNING: Very few satellites were found, 3 attemps left to exit, next try in 30sec.
WARNING: Very few satellites were found, 2 attemps left to exit, next try in 30sec.
WARNING: Very few satellites were found, 1 attemps left to exit, next try in 30sec.
WARNING: No satellites were found, try to move tracker to a clear sky place, and run program again.
debian@beaglebone:~/Solar_Tracker/Maintracker_v2$ █
```

Figura 48 - Muestra los mensajes de salida al no encontrar más de 4 satélite

Luego que de los 5 intentos de lectura fallida, se muestra un mensaje que dice “*No hay satélites encontrados, intente mover el seguidor a un espacio abierto y ejecute el programa nuevamente*” esto ocurre como advertencia para que el usuario verifique si es que el GPS no detecta una trama con información legible, puede ocurrir que el módulo GPS no esté funcionando sin embargo daría un error al momento de abrir el puerto serial.

- Caso 02: Este caso es otro común lo que lleva a una finalización de la ejecución del programa, y eso se ejecuta ya habiendo validado la hora y la posición en la que se encuentra el seguidor solar, luego de procesar la información y si el ángulo de elevación es negativo, denota que no existe incidencia de luz solar sobre los paneles del satélite, tal como podemos ver en la Figura 49.

```
debian@beaglebone:~/Solar_Tracker/Maintracker_v2$ sudo python STR_8-8-21.py
[sudo] password for debian:
GPS Initialized
*****

Universal Time: 03:44:17
Date ISO: 2021-08-09
You are Tracking: 7 satellites
My Latitude: -12.077037, My Longitude: -76.994458, My Altitude: 213.00
Elevation Angle: -68.06, Heading Angle: 282.37

At this time is not possible to track sun, because is hidden...
debian@beaglebone:~/Solar_Tracker/Maintracker_v2$ █
```

Figura 49 - Se muestra que el GPS ha inicializado pero el ángulo de elevación es menor a cero

Luego de la detección que el ángulo es menor a cero, nos mostrará el siguiente mensaje “*A esta hora no es posible seguir al sol, debido a que está escondido*” acto seguido el programa no guardará información del voltaje recibido por los paneles y la ejecución del programa llegará a su término.

- Caso 03: Este es el caso típico de funcionamiento del seguidor solar, en donde en las condiciones ideales de funcionamiento podrá recoilar información del GPS, las procesará, posicionará de manera realimentada el panel y grabará el voltaje de ambos paneles para luego compararlos, mostrará los siguientes resultados en pantalla, según la Figura 50.

```
debian@beaglebone:~/Solar_Tracker/Maintracker_v2$ sudo python STR_8-8-21.py
[sudo] password for debian:
GPS Initialized
*****

Universal Time: 22:59:23
Date ISO: 2021-08-09
You are Tracking: 9 satellites
My Latitude: -12.076997, My Longitude: -76.994507, My Altitude: 207.70
Target elevation Angle: 0.52, Target heading Angle: 285.95

>>>CURRENT ELEVATION: 11
>>>CURRENT HEADING: 211
Starting to find heading angle...
Done!, Current Heading: 281
Starting to find elevation angle...
Done!, Current Elevation: 2
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
Done!, next tracking in 1X minutes...
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

*****
```

Figura 50 - Funcionamiento ideal del Seguidor Solar

Como podemos ver en la imagen anterior, es una captura que se da a las 05:59:23 PM (GMT -05:00, Lima) y el ángulo de elevación esta cerca a cero pero aún es positivo, el programa seguirá recopilando información y guardando las medidas de los voltajes de los paneles cada 15 minutos, hasta que el ángulo de elevación sea negativo, luego de ello terminará la ejecución del programa.

Para fines comparativos y corroborar que la data que se calcula es la correcta respecto los cálculos de los ángulos de azimuth y de elevación, se usa una herramienta web que con la misma información de entrada (latitud, longitud y hora) calcula los ángulos específicos para ese punto en particular, se puede acceder a la herramienta desde la página <https://www.suncalc.org/>, dicha herramienta no es de mi autoría fue publicada por Torsten Hoffmann y Robert-Schumann de Alemania. Corroboraremos los datos usando la misma información que recibe el GPS en la Figura 51, y a continuación se muestra el resultado:

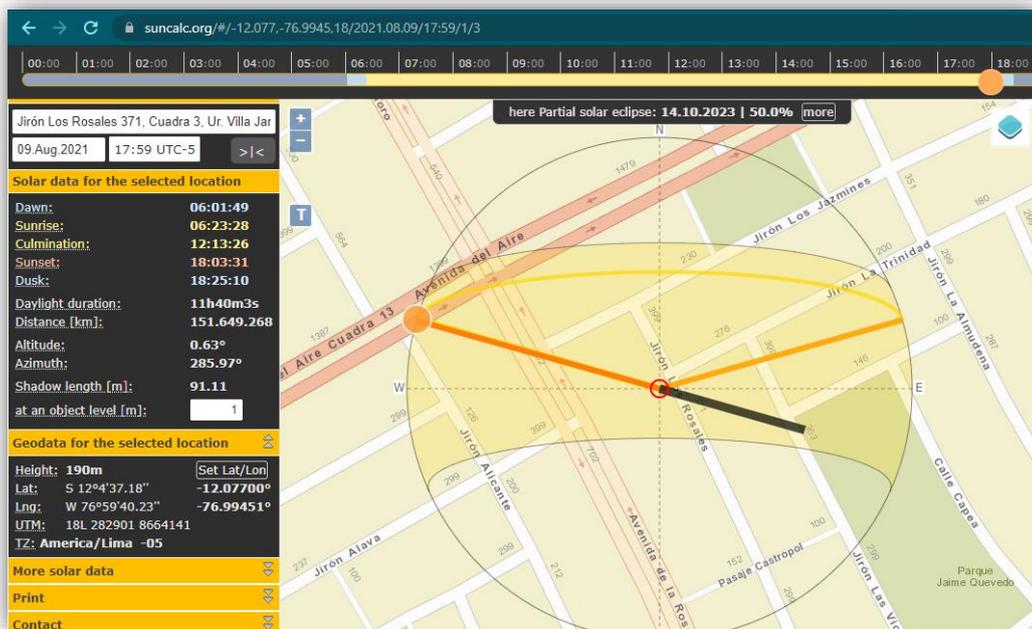


Figura 51 - Uso de la herramienta SunCalc.org

Fuente:(SunCalc Sun Position- Und Sun Phases Calculator, s/f)

De la imagen se puede corroborar que la diferencia es décimas con respecto a lo calculado en el algoritmo del Seguidor Solar, el detalle comparativo se puede ver en la Tabla 6.

| INFORMACIÓN DE ENTRADA (GPS) | | | |
|---|------------|-------|---------|
| Latitud | -12.076997 | | |
| Longitud | -76.994507 | | |
| Tiempo UTC | 5:59:23 | | |
| Fecha ISO | 09-08-21 | | |
| INFORMACIÓN DE SALIDA (HARDWARE Y SOFTWARE) | | | |
| Angulos | SS SW | SS HW | SUNCALC |
| Elevación | 0.52 | 2 | 0.63 |
| Azimuth | 285.95 | 281 | 285.97 |

Tabla 6 - Comparativa entre cálculo de seguidor solar vs herramienta SunCalc.

En la tabla 6 se puede apreciar la parte de software del seguidor solar (SS SW) la cual es calculada según los datos proporcionados por el GPS y también se observa el resultado del posicionamiento de los paneles del seguidor solar osea la parte electromecánica (SS HW). El seguidor solar está configurado para tener una tolerancia de 2 grados en el ángulo de elevación y 5 grados en el ángulo azimutal mientras que en la comparativa de los

cálculos hechos por el algoritmo del seguidor solar (SS SW) vs los hayados por la herramienta SUNCALC son prácticamente iguales.

Toma de muestras

Las muestras se tomaron en tres días distintos, uno para cada localidad en el mes de mayo del 2021 para los puntos de:

- San Luis, Lima, Lima. (Lat.: -12.076997, Lon.: -76.994507)
- Pay Pay, Yonán, Cajamarca. (Lat.: -7.256191, Lon.: -79.236392)
- Chiclayo, Chiclayo, Lambayeque. (Lat.: -6.776933, Lon.: -79.837082)

Para ello se esperó el día con el cielo más despejado, con la finalidad de tener la mejor incidencia de luz solar sobre el panel. En este caso sólo se hizo medición de voltaje debido a que sólo se tienen dos entradas ADC para la medición automatizada del voltaje de los paneles, y se trató de poner el seguidor solar un punto alto dónde no afecte las sombras ni tampoco haya contaminación por paneles publicitarios o alumbrado eléctrico que pueda arrojar mediciones erróneas especialmente cuando el ángulo de elevación es negativo. Cabe resaltar que las mediciones mostradas son las arrojadas directamente del panel fotovoltaico de ambos modelos (seguidor solar y panel fijo horizontal) y no se le ha restado el consumo de los dispositivos electrónicos que forman el seguidor.

Los resultados de medición de voltaje vs la hora del día son los siguientes:

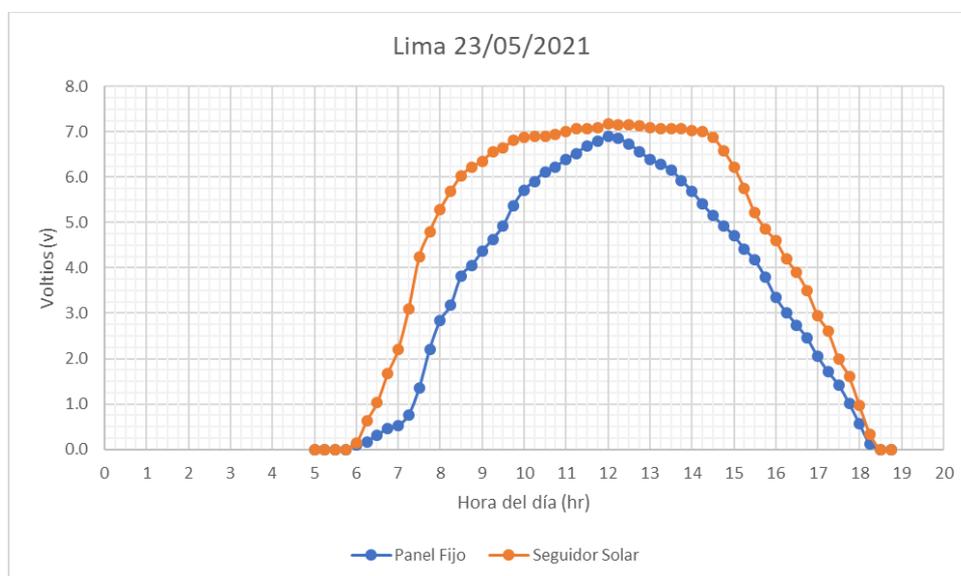


Figura 52 - Gráfica comparativa entre seguidor solar y panel fijo (horizontal) para Lima

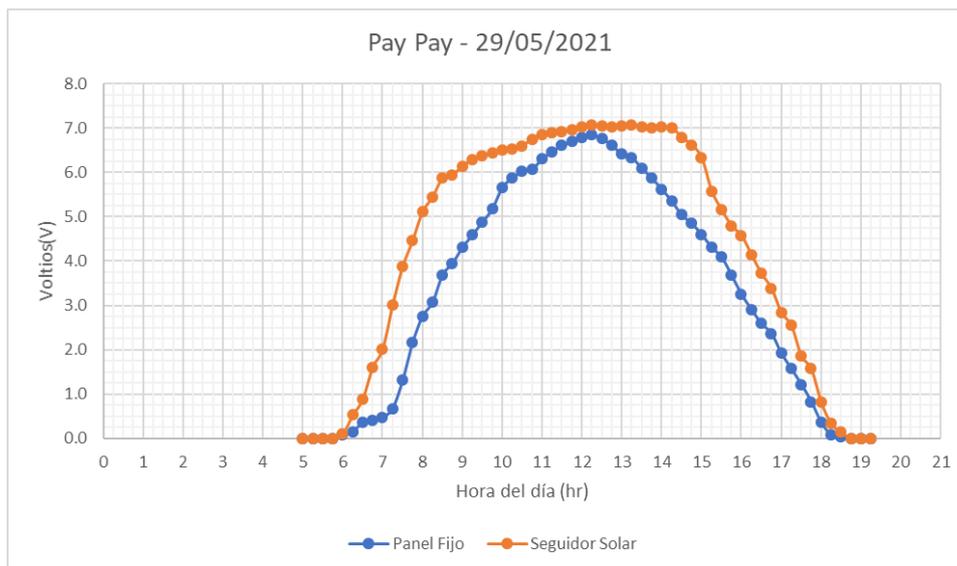


Figura 53 - Gráfica comparativa entre seguidor solar y panel fijo (horizontal) para Pay Pay

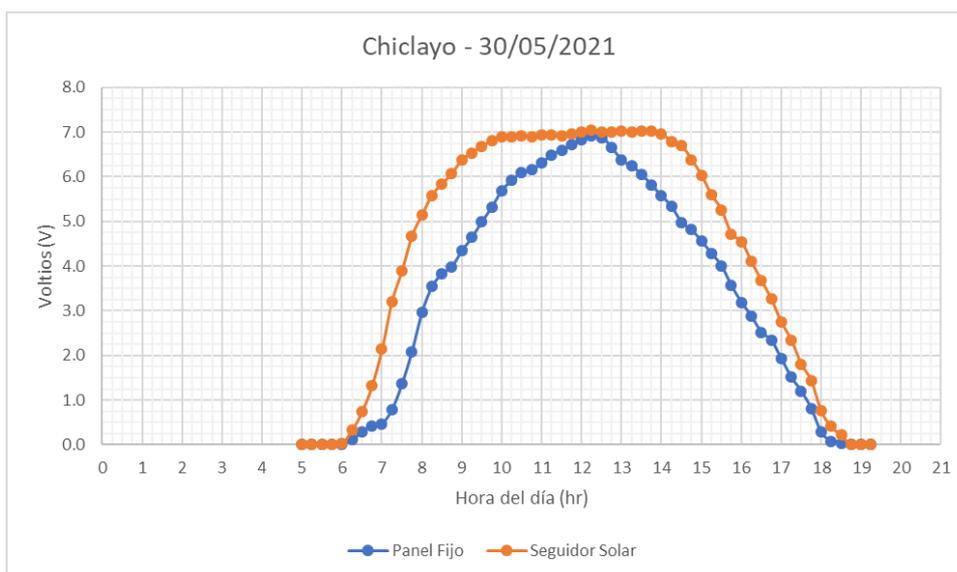


Figura 54 - Gráfica comparativa entre seguidor solar y panel fijo (horizontal) para Chiclayo

Los resultados comparativos de los voltajes acumulados por día son los siguientes:

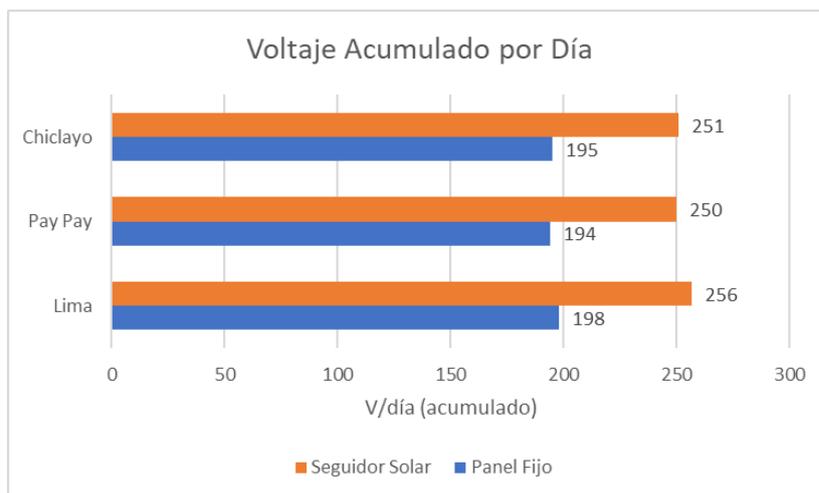


Figura 55 - Gráfica comparativa entre cada localidad según lo censado del seguidor solar vs el panel fijo

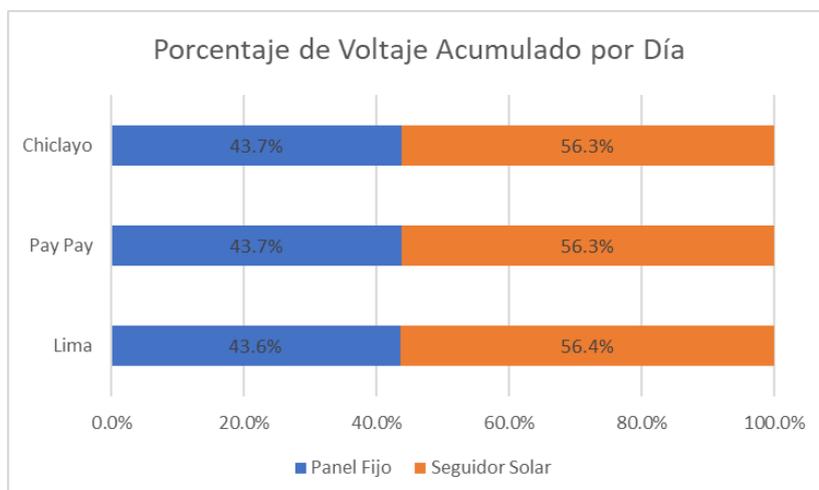


Figura 56 - Gráfica comparativa entre cada localidad según el porcentaje de voltaje acumulado en el día por el seguidor solar vs el panel fijo

Alcances y Limitaciones

Alcances

- El seguidor solar es capaz de calcular los ángulos azimutales y de elevación.
- El seguidor solar es capaz de reajustar los paneles según la hora y posición en la que se encuentre.
- El seguidor solar puede tomar muestras de voltaje y almacenarlas para su comparación.

- El seguidor solar es altamente configurable, ya que por ejemplo puede aumentar o disminuir la granularidad para el muestreo de lecturas de voltaje.
- Las lecturas de voltaje del panel con seguidor solar muestran son mayores a las de paneles fijos.

Limitaciones

- El seguidor solar necesita de una fuente de energía para alimentar los motores y los dispositivos electrónicos.
- El seguidor solar no tiene permeabilidad ni protección contra agua, y para tomar las muestras depende de las condiciones meteorológicas idóneas.
- El seguidor solar no tiene implementado un medidor de corriente automático por lo que no se calcula la potencia.
- Es necesaria una calibración del seguidor solar dependiendo de su entorno.

Cálculo Presupuestal.

La mayoría de componentes fueron adquiridos localmente, sin embargo los componentes más sensibles tales como el módulo GPS, el módulo inercial IMU y el Beaglebone Black, fueron importados, todos los precios incluyen sus costos de importación.

| COSTO DE LAS HERRAMIENTAS | | | | |
|---------------------------|----------|-----------------|---------------|-------|
| Descripción | Cantidad | Precio Unitario | Subtotal | |
| Cautín | 1 | PEN 40.00 | PEN | 40.00 |
| Estaño | 1 | PEN 4.00 | PEN | 4.00 |
| Ácido Ferroso | 1 | PEN 4.00 | PEN | 4.00 |
| Cables | 4 | PEN 1.00 | PEN | 4.00 |
| Taladro de PCB | 1 | PEN 40.00 | PEN | 40.00 |
| Brocas | 5 | PEN 5.00 | PEN | 25.00 |
| Pelacables | 1 | PEN 9.00 | PEN | 9.00 |
| Multímetro | 1 | PEN 70.00 | PEN | 70.00 |
| Cianocrilato | 6 | PEN 1.00 | PEN | 6.00 |
| TOTAL | | PEN | 202.00 | |

Tabla 7 - Costo de herramientas

| COSTO DEMATERIALES PARA SEGUIDOR SOLAR | | | |
|--|----------|-----------------|---------------|
| Descripción | Cantidad | Precio Unitario | Subtotal |
| Beaglebone Black | 1 | PEN 260.00 | PEN 260.00 |
| Ultimate GPS | 1 | PEN 180.00 | PEN 180.00 |
| IMU AltIMU | 1 | PEN 180.00 | PEN 180.00 |
| Modulo UNL2003 | 2 | PEN 6.00 | PEN 12.00 |
| USB WiFi Dongle | 1 | PEN 60.00 | PEN 60.00 |
| Motor PaP 1:64 | 2 | PEN 7.10 | PEN 14.20 |
| Panel Solar | 2 | PEN 9.00 | PEN 18.00 |
| PCB Fibra de Vidrio | 1 | PEN 8.00 | PEN 8.00 |
| LC 74HC245 | 1 | PEN 0.70 | PEN 0.70 |
| Resistencias 1K ohm | 2 | PEN 0.20 | PEN 0.40 |
| Resistencias 3.9K ohm | 2 | PEN 0.20 | PEN 0.40 |
| Header doble | 2 | PEN 1.20 | PEN 2.40 |
| Header 90 grados | 1 | PEN 1.00 | PEN 1.00 |
| Molex 1x4 | 4 | PEN 0.50 | PEN 2.00 |
| Molex 1x2 | 6 | PEN 0.40 | PEN 2.40 |
| Láminas Acrílicas | 1 | PEN 13.00 | PEN 13.00 |
| Tornillo Soporte | 14 | PEN 0.50 | PEN 7.00 |
| TOTAL | | PEN | 813.50 |

Tabla 8 – Costo de materiales para seguidor solar.

| COSTO DE LA MANO DE OBRA | | | |
|--------------------------|----------|-----------------|-----------------|
| Descripción | Cantidad | Precio Unitario | Subtotal |
| Corte Láser | 1 | PEN 22.00 | PEN 22.00 |
| Diseño Estructura Acr. | 1 | PEN 180.00 | PEN 180.00 |
| Diseño PCB | 1 | PEN 220.00 | PEN 220.00 |
| Implementación | 1 | PEN 220.00 | PEN 220.00 |
| Programación | 1 | PEN 400.00 | PEN 400.00 |
| Pasajes | 1 | PEN 300.00 | PEN 300.00 |
| TOTAL | | PEN | 1,342.00 |

Tabla 9 - Costo de mano de obra y servicios.

| COSTO TOTAL DEL PROYECTO | |
|--|---------------------|
| Descripción | Subtotal |
| COSTO DEMATERIALES PARA SEGUIDOR SOLAR | PEN 813.50 |
| COSTO DE LAS HERRAMIENTAS | PEN 202.00 |
| COSTO DE LA MANO DE OBRA | PEN 1,342.00 |
| TOTAL | PEN 2,357.50 |

Tabla 10 - Cálculo total del proyecto.

El total del presupuesto ha sido financiado por el tesista, y el monto final está en soles (PEN).

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Basado en la situación problemática, se diseña, programa e implementa el circuito el sistema seguidor solar de 2 ejes para aprovechar la máxima incidencia de luz solar.
- Basado en las pruebas el seguidor solar de 2 ejes es capaz de reajustar la posición del panel solar dependiendo de la hora y las coordenadas de dónde se encuentre.
- Se observa una lectura mayor de voltaje en las líneas que representan al seguidor solar vs las del panel fijo horizontal, en un aproximado de 30% más respecto a las mediciones recopiladas por el panel fijo horizontal en las 3 localidades.
- Se diseña e implementa la estructura electromecánica para que los actuadores puedan posicionar al panel fotovoltaico del seguidor solar.
- Se observa según las gráficas comparativas en las 3 localidades que, al amanecer, al cenit y al crepúsculo, tanto el seguidor solar como el panel fijo, tienen lecturas muy similares, por lo que se infiere que el mayor aprovechamiento de un seguidor solar de 2 ejes respecto a un panel fijo es en las horas anteriores y posteriores al cenit.

Recomendaciones

- En una versión mejorada del seguidor solar se deberá incluir un medidor de corriente para poder calcular la potencia de salida del panel, así mismo se deberá configurar un algoritmo de auto calibración del magnetómetro y acelerómetro, para evitar la edición manual del código de programación modificando los valores de Bias y factores de escalamiento.
- Una versión mejorada también debe incluir una estructura opaca que no permita el paso de la luz solar y así evitar el calentamiento de los dispositivos electrónicos por radiación y también deberá incluir un sistema de enfriamiento para el Beaglebone Black y drivers de motores.
- Se debe tener en cuenta el clima que incida sobre el seguidor solar, se recomienda un clima seco debido a que no es a prueba de agua y una lluvia haría que se pueda presentar un cortocircuito, así mismo el seguidor solar recalienta en especial el procesador del Beaglebone Black por lo que es recomendable instalarle un disipador de calor y una fuente de ventilación externa.

- Se debe tener en cuenta los objetos que rodean al seguidor de calor en su mayoría deben ser elementos metálicos o cables energizados (externos al seguidor solar) para ya que estos pueden distorsionar las lecturas del sistema microelectromecánico y llegar a posicionar mal el panel.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdallah, S., & Nijmeh, S. (2004). Two axes sun tracking system with PLC control. En *Energy Convers Manag* (Vol. 45, pp. 1931–1939).
- Adafruit Ultimate GPS. (s/f). Adafruit Learning System. Recuperado el 6 de septiembre de 2021, de <https://learn.adafruit.com/adafruit-ultimate-gps/downloads>
- Alejandro, GP., & Arturo, MM. (2010). High-precision solar tracking system. *Proceedings of the World Congress on Engineering*.
- Algifri, A. H., & Al-Towaie, H. A. (2001). Efficient orientation impacts of box-type solar cooker on the cooker performance. *Sol Energy*, 70, 165–170.
- Alorda, B., Pujol-Nadal, R., Rodriguez-Navas, G., Moia-Pol, A., & Martinez-Moll, V. (2015). Collaborative distributed sun-tracking control system for building integration with minimal plant area and maximum energy-conversion efficiency. *Int J Electr Power Energy Syst*, 70, 52–60.
- Altimu-10-v5-schematic.pdf. (s/f). Recuperado el 28 de septiembre de 2021, de <https://www.pololu.com/file/0J1109/altimu-10-v5-schematic.pdf>
- Badescu, V. (1985). The influence of certain astronomical and constructive parameters on the concentration of solar radiation with plane heliostats fields. *Rev Phys Appl*.
- Beagleboard. (s/f). *BeagleBoard.org—Black*. Recuperado el 19 de septiembre de 2021, de <https://beagleboard.org/black>
- Beckman, W. A., & Duffie, J. A. (1991). *Solar engineering of thermal processes*. Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons Inc.
- Berenguel, M., Rubio, F. R., Valverde, A., Lara, P. J., Arahall, M. R., & Camacho, E. F. (2004). An artificial vision-based control system for automatic heliostat positioning offset correction in a central receiver solar power plant,". *Sol Energy*, 76, 563–575.

- Bhunias, S., & Tehranipoor, M. (2019). Chapter 2—A Quick Overview of Electronic Hardware. En S. Bhunia & M. Tehranipoor (Eds.), *Hardware Security* (pp. 23–45). Morgan Kaufmann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812477-2.00007-1>
- Bolton, W. (2002). 1—Control systems. En W. Bolton (Ed.), *Control Systems* (pp. 1–36). Newnes. <https://doi.org/10.1016/B978-075065461-6/50001-5>
- Clifford, M. J., & Eastwood, D. (2004). Design of a novel passive solar tracker. *Solar Energy*, 77, 269–280.
- Compensating for Tilt, Hard-Iron, and Soft-Iron Effects*. (s/f). FierceElectronics. Recuperado el 4 de septiembre de 2021, de <https://www.fierceelectronics.com/components/compensating-for-tilt-hard-iron-and-soft-iron-effects>
- Corrales, J. A., Candelas, F. A., & Torres, F. (2008). *Hybrid tracking of human operators using IMU/UWB data fusion by a Kalman filter*. 193–200.
- Davies, P. A. (1993). Sun tracking mechanism using equatorial and ecliptic axes. *Solar Energy*.
- Davis, M., Lawler, J., Coyle, J., Reich, A., & Williams, T. (2008). Machine vision as a method for characterizing solar tracker performance. En *Photovolt Spec Conf* (Vol. 33, pp. 1–6).
- Delgado Sesena, F. J., Quero Reboul, J. M., Ortega, G., de la Cruz, J., Lopez Tarrida, C., & Ortega, P. R. (1986). *Accurate and wide-field-of-view MEMS-based Sun sensor for industrial applications*.
- Eclipse (software). (2021). En *Wikipedia, la enciclopedia libre*. [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Eclipse_\(software\)&oldid=136445513](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Eclipse_(software)&oldid=136445513)
- Edwards, BP. (1978). *Computer based sun following system*.
- Finster C. (1962). *El Heliostato de la Universidad Santa Maria*.

Flight dynamics (fixed-wing aircraft). (2021). En *Wikipedia*.

[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Flight_dynamics_\(fixed-wing_aircraft\)&oldid=1036160618](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Flight_dynamics_(fixed-wing_aircraft)&oldid=1036160618)

Foundation, T. R. P. (s/f). *Buy a Raspberry Pi 4 Model B*. Raspberry Pi. Recuperado el 6 de septiembre de 2021, de <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/>

Gebre-Egziabher, D., Elkaim, G. H., Powell, J. D., & Parkinson, B. W. (s/f). *Calibration of Strapdown Magnetometers in the Magnetic Field Domain*. 45.

GPS - NMEA sentence information. (s/f). Recuperado el 20 de septiembre de 2021, de <http://aprs.gids.nl/nmea/#rmc>

Gulin, M., Vasak, M., & Peric, N. (2013). Dynamical optimal positioning of a photovoltaic. *Panel in All Weather Conditions*, 108, 429–438.

Helwa, N. H., Bahgat, A. B. G., Shafee, AMRE., & Shenawy, E. (2000). Maximum collectable solar energy by different solar tracking systems. *Energy Sources*, 22, 23–24.

Hession, P. J., & Bonwick, WJ. (1984). Experience with a sun tracker. *Sol Energy*, 1(3–11).

IBM Docs. (2021, septiembre 2). <https://prod.ibmdocs-production-dal-6099123ce774e592a519d7c33db8265e-0000.us-south.containers.appdomain.cloud/docs/es/aix/7.2?topic=communications-serial-communication>

Ibrahim, D. (2019). Chapter 1—Introduction. En D. Ibrahim (Ed.), *ARM-Based microcontroller projects using MBED* (pp. 1–7). Newnes. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102969-5.00001-X>

- Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y., & Demirkol, S. (2004). Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey. *Renew Energy*, 29, 1265–1275.
- Kaldellis, J., & Zafirakis, D. (2012). Experimental investigation of the optimum photovoltaic panels' tilt angle during the summer period. *Energy*, 38, 305–314.
- Koyuncu, B., & Balasubramanian, K. (1991). A microprocessor controlled automatic suntracker. *IEEE Trans Consum Electron*.
- Lee, C. Y., Chou, P. C., Chiang, C. M., & Lin, C. F. (2009). *Sun tracking systems—A review*. *Sensors* (Vol. 9).
- Letelier, P., & Penadés, C. (2006). Metodologías ágiles para el desarrollo de software: EXtreme Programming (XP). *Técnica Administrativa*.
- Luque-Heredia, I., Moreno, J. M., Magalhaes, P. H., Cervantes, R., Quemere, G., & Laurent, O. (2007). *Inspira's CPV sun tracking*. Conc Photovolt.
- Maatallah, T., Alimi, SE., & Nassrallah, SB. (2011). *Performance modeling and investigation of fixed single and dual-axis tracking photovoltaic panel in Monastir city*.
- Mavromatakis, F. (2008). Franghiadakis Y. A highly efficient novel azimuthal heliotrope. *Sol Energy*, 82, 336–342.
- McFee, R. (1975). Power collection reduction by mirror surface nonflatness and tracking error for a central receiver solar power system. *Appl Opt*.
- McNamara, J. (2008). *GPS For Dummies* (2nd Edition). Willey.
- Michalsky, J. J. (1950). The Astronomical Almanac's algorithm for approximate solar position. *Sol Energy*, 3(227–35).

- Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K., & Sharifi, A. (2009). A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renew Sustain Energy Rev.*
- Noble, J. (2012). *Programming Interactivity* (2nd Edition). O'Reilly.
- Nsengiyumva, W., Chen, S. G., Hu, L., & Chen, X. (2018). Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 250–279. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.085>
- Parmar, N. J., Parmar, A. N., & Gautam, V. S. (2015). Passive solar tracking system. *Int J Emerg Technol Adv Eng*, 5, 138–145.
- Poulek, V. (1994). Testing the new solar tracker with shape memory alloy actors. *Proceedings of the 24th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1.
- Saavedra, A. (1963). *Diseño de un servomecanismo seguidor solar para un instrumento registrador de la irradiación solar directa*. Diseño de un servomecanismo seguidor solar para un instrumento registrador de la irradiación solar directa.
- Semma, R. P., & and Imamura, M. S. (1980). Sun tracking controller for multi-kW photovoltaic concentrator system. *Proceedings of the 3rd International Photovoltaic Sol Energy Conf. Cannes -*, 27–31.
- Sproul, A. B. (2007). Derivation of the solar geometric relationships using vector analysis. *Renew Energy*, 32, 1187–1205.
- SunCalc sun position- und sun phases calculator*. (s/f). Recuperado el 6 de septiembre de 2021, de <https://www.suncalc.org>
- System Reference Manual · beagleboard/beaglebone-black Wiki*. (s/f). GitHub. Recuperado el 4 de septiembre de 2021, de <https://github.com/beagleboard/beaglebone-black>
- Walraven, R. (1978). Calculating the position of the sun. *Sol Energy*.

- Yakup, M. A. H. M., & Malik, A. Q. (2001). Optimum tilt angle and orientation for solar collector. En *Brunei Darussalam. Renew Energy* (Vol. 24, pp. 223–234).
- Yilmaz, S., Ozcalik, H. R., Dogmus, O., Dincer, F., Akgol, O., & Karaaslan, M. (2015). *Design of two axes sun tracking controller with analytically solar radiation calculations.*
- Zhong, H., Li, G., Tang, R., & Dong, W. (2011). Optical performance of inclined southern-north axis three-positions tracked solar panels. *Energy*.
- Zogbi, R., & Laplaze, D. (1984). Design and construction of a sun tracker. *Sol Energy*, 1984(33), 4–369.

