

POSGRADOS

Maestría en

**Electrónica y
Automatización, Mención Informática
Industrial**

RPC-SO-30-NO.507 -2019

Opción de Titulación:

PROYECTO DE DESARROLLO.

Tema:

DESARROLLO DE UN SEGUIDOR SOLAR
AUTOMATIZADO
USANDO UN SISTEMA EMBEBIDO Y ALGORITMO DE
POSICIONAMIENTO
SOLAR (SPA).

Autores:

JUAN ANDRÉS GUALOTO CACHAGO.

RICHARD ALEXANDER POTOSI DÍAZ.

Director:

MANUEL RAFAEL JAYA DUCHE.

QUITO – Ecuador
2022

Autor:



Juan Andrés Gualoto Cachago

Ingeniero Electrónico.

Candidato a Magíster en Electrónica y Automatización,
Mención Informática Industrial por la Universidad
Politécnica Salesiana - Sede Quito.

jgualoto@est.ups.edu.ec

Autor:



Richard Alexander Potosi Díaz

Bachelor of Science in Electrical Engineering. Candidato a
Magíster en Electrónica y Automatización, Mención Informática
Industrial por la Universidad Politécnica Salesiana - Sede Quito.

apotosi@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Manuel Rafael Jaya Duche.

Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Magíster en Redes de Información y Conectividad.

mjaya@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2022 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO – ECUADOR – SUDAMÉRICA

GUALOTO CACHAGO JUAN ANDRÉS

POTOSI DÍAZ RICHARD ALEXANDER

***DESARROLLO DE UN SEGUIDOR SOLAR AUTOMATIZADO USANDO UN
SISTEMA EMBEBIDO Y ALGORITMO DE POSICIONAMIENTO SOLAR (SPA).***

Índice general

Portada Gualoto,Potosi	1
Resumen	8
Abstract	9
1. Introducción	10
1.1. Organización del manuscrito	10
1.2. Descripción general del problema	12
1.3. Objetivos	12
1.3.1. Objetivo general	12
1.3.2. Objetivos específicos	12
2. Algoritmos de posicionamiento solar en seguidores de un eje y dos ejes mediante sistema embebido	14
2.1. Definiciones previas	15
2.1.1. Estado del Arte	15
2.2. Clasificación de seguidores solares	16
2.2.1. Seguidor de un solo eje	16
2.2.2. Seguidor de un solo eje horizontal	16
2.2.3. Seguidor de un solo eje vertical	17
2.2.4. Seguidor de un solo eje inclinado	17
2.3. Seguidor solar en dos ejes	18
2.3.1. Seguidor solar en un eje a utilizar	18
2.4. Introducción a Sistemas embebidos	19
2.4.1. Sistema embebido para seguidor solar	19
2.5. Formulación del Problema	20
3. Metodología y Diseño	21
3.1. Metodología	21
3.1.1. Coordenadas de Ubicación respecto al Ecuador	22
3.1.2. Trayectoria solar	22
3.1.3. Análisis del Algoritmo SPA	23
3.1.4. Irradiación solar en Pichincha	23
3.1.5. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico	24
3.1.6. Hora solar pico en Ecuador	25
3.1.7. Cálculo de potencia para el sistema fotovoltaico	25
3.1.8. Cálculo de la batería	26
3.1.9. Cálculo del controlador de carga	26

3.2.	Descripción de materiales a utilizar	26
3.2.1.	Motor DC WD1160	26
3.2.2.	Pantalla de Cristal Liquido LCD 2X16	27
3.2.3.	Convertor buck DC-DC	27
3.2.4.	Reloj a Tiempo Real RTC DS3231	28
3.2.5.	Sistema de Posicionamiento Global Gps Neo 6M	28
3.2.6.	Giroscopio MPU6050	29
3.2.7.	Fusible cilíndrico	29
3.2.8.	Placa de réles	30
3.2.9.	Sistema de alimentación fotovoltaico	30
3.2.10.	Controlador de carga	31
3.2.11.	Tablero de control	31
3.3.	Diagrama de bloques del Sistema Implementado	32
3.4.	Diseño de seguidor solar en un eje	34
3.4.1.	Despiece de seguidor solar en un eje	34
3.5.	Descripción del Sistema embebido para procesar el algoritmo SPA	35
3.5.1.	Raspberry pi 3B	36
3.6.	Noobs y Noobs Lite	36
3.6.1.	Raspberry Pi OS / Raspbian	37
3.6.2.	Raspbian Pi Os a utilizar	37
3.7.	Protocolos de comunicación a Utilizar	38
3.7.1.	Entradas y salidas Digitales	38
3.7.2.	Protocolo I2C	38
3.7.3.	Protocolo UART	39
3.8.	Diagrama de Flujo para Seguidor Solar Automatizado Usando un Sistema Embebido y Algoritmo de Posicionamiento Solar	39
3.9.	Instalación de Librerías	42
3.10.	Conexiones, habilitación de puertos y pines	42
3.11.	Habilitación de protocolos I2C (RTC) y UART (GPS)	43
3.12.	Configuración de RTC	44
3.13.	Programación del sistema embebido	45
3.14.	Código fuente del sistema embebido	45
4.	Resultados	51
4.1.	Obtención de datos	51
4.1.1.	Ubicación	51
4.1.2.	Tiempo de Operación	52
4.1.3.	Valores del Algoritmo SPA	53
4.1.4.	Pruebas con algoritmo SPA	59
4.1.5.	Pruebas con panel solar fijo	61
4.2.	Análisis y Resultados	64
4.3.	Conclusiones	66

Índice de figuras

2.1. Seguidor solar en eje horizontal [Gutiérrez and Chávez, 2012].	17
2.2. Seguidor solar en eje vertical [Gutiérrez and Chávez, 2012].	17
2.3. Seguidor solar en eje inclinado [Tapia Cruz, 2018].	18
2.4. Seguidor solar en dos ejes [Tapia Cruz, 2018].	18
2.5. Seguidor en un eje.	19
3.1. Arquitectura del seguidor solar automatizado usando sistema embebido y algoritmo de posicionamiento solar SPA.	22
3.2. Latitud y Longitud en la Esfera Terrestre [Nogales]	22
3.3. Latitud y Longitud en la Esfera Terrestre.	23
3.4. Irradiación Solar Global Horizontal - Pichincha	24
3.5. Motor Dc.	27
3.6. Conexión de raspberry y Lcd.	27
3.7. Conversor Buck DC-DC.	28
3.8. RTC.	28
3.9. Gps.	29
3.10. Giroscopio.	29
3.11. Fusible cilíndrico 10X38 mm.	30
3.12. Placa de relés para movimiento del seguidor.	30
3.13. Panel solar - despiece interno	31
3.14. Controlador de carga utilizado en el prototipo	31
3.15. Elementos del Tablero de Control.	32
3.16. Diagrama de bloques del Prototipo.	33
3.17. Seguidor en un eje.	34
3.18. Planos de seguidor solar en [cm].	35
3.19. Sistema Embebido a utilizar.	36
3.20. RaspberryPi 3B y S.O Raspbian.	37
3.21. Raspbian en tarjeta Rapberry.	37
3.22. E/S de Raspberry Pi 3B.	38
3.23. Protocolo I2C en Raspberry Pi 3B.	39
3.24. Protocolo UART en Raspberry Pi 3B.	39
3.25. Diagrama de flujo de algoritmo SPA en un Sistema Embebido.	41
3.26. Conexión Raspberry con RTC y Gps.	42
3.27. Configuración del archivo modules.	43
3.28. Conexión exitosa entre RTC y Raspberry.	44
3.29. Modificación de referencias ttyAMA0.	44
3.30. Visualización de fecha y hora con RTC.	45
3.31. Librerías para el algoritmo del seguidor solar en python	46
3.32. Variables con valores fijos para pruebas del seguidor solar.	46

3.33. Variables para el RTC.	46
3.34. Habilitación del puerto para comunicación serial.	47
3.35. Función para el display de la pantalla LCD, con texto desplazable.	47
3.36. Función para leer los datos del RTC	47
3.37. Habilitación pines GPIO.	48
3.38. Código de parámetros de fecha y hora.	48
3.39. Código de parámetros de longitud y latitud.	49
3.40. Función para el cálculo de ángulos.	49
3.41. Parametrización para el giro del motor.	50
4.1. Captura satelital de la ubicación del seguidor solar.	51
4.2. Datos obtenidos del GPS.	52
4.3. Datos obtenidos del RTC.	53
4.4. Formulas del algoritmo del seguidor solar.	54
4.5. Calculadora solar (suncalc.org).	55
4.6. Calculadora Dom (solartopo.com).	55
4.7. Tendencia del ángulo azimutal.	56
4.8. Tendencia del ángulo de elevación.	57
4.9. Porcentaje de error del ángulo azimutal.	58
4.10. Porcentaje de error del ángulo de elevación.	58
4.11. Orientación del seguidor en la mañana.	59
4.12. Orientación del seguidor al mediodía.	60
4.13. Orientación del seguidor en la tarde.	61
4.14. Panel Solar fijo.	62

Índice de tablas

1.1. Consumo de eléctrico de sensores y actuadores.	12
2.1. Algoritmos con sus respectivos parámetros.	15
2.2. Tasa de predicción de seguidor solar.	16
3.1. Consumo de eléctrico de sensores y actuadores	24
3.2. Descripción de tarjetas Raspberry.	36
3.3. Instalación de librerías.	42
3.4. Habilitación de protocolo I2C.	43
3.5. Habilitación de RTC	44
3.6. Configuración de RTC	45
4.1. Duración de la puesta de sol en Quito.	53
4.2. Parámetros obtenidos del seguidor solar en todo un día.	54
4.3. Ángulos de elevación y azimutal del seguidor solar y otras calcula- doras solares.	56
4.4. Datos de Voltaje y corriente del seguidor Solar y el panel fijo.	63
4.5. Datos de Voltaje y corriente del seguidor Solar y el panel fijo	63
4.6. Costo de seguidores solares en el mercado.	65

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo, optimizar el seguimiento de un sistema recolector de energía solar, mediante un sistema embebido y algoritmo de posicionamiento solar (SPA - Solar Position Algorithm), para lo cual, se utiliza el lenguaje de programación Python debido a la facilidad de uso y a sus librerías ya existentes para el diseño del prototipo capaz de seguir la trayectoria del sol durante 12 horas del día. El seguidor consta de una parte móvil, el cual permite seguir la trayectoria del sol, esto se logra mediante un sistema embebido y el algoritmo, que necesita de ciertos parámetros para el cálculo de la posición solar, de los cuales se utiliza un reloj en tiempo real (RTC - Real Time Clock) y un sistema de posición global (GPS - Global Positioning System) en la cual, permite que el panel solar se ubique de forma perpendicular al sol captando una mejor generación de energía solar.

El sistema embebido trabaja con el sistema operativo Raspbian Pi OS, que está basado en Linux, en el cual es necesario la habilitación y configuración de puertos de comunicación para la utilización de los componentes mencionados anteriormente. Por ejemplo, para la obtención de coordenadas como longitud y latitud se utiliza el sistema de posición global (GPS) que necesita una comunicación UART, por otro lado, para la obtención de tiempo y fecha se utiliza el reloj en tiempo real (RTC) que utiliza comunicación I2C y con ello se obtiene los parámetros necesarios para el funcionamiento del algoritmo SPA el cual entrega el ángulo de inclinación del sol con el cual se enviará una señal al motor DC para que este gire y siga su respectiva trayectoria.

Una vez desarrollado el hardware y software, se realizan pruebas de funcionamiento en sitio y a la intemperie, arrojando los siguientes resultados; se obtiene un valor de 5.2 horas de luz experimentalmente hasta el mediodía, por tanto, para los respectivos cálculos se aproximaron a 11h/día la recolección de energía solar por medio de los paneles. Con base lo anunciado en párrafos anteriores, se logró determinar que la recolección de la energía fue aproximadamente un 30 % más en comparación de la recolección energía de panel solar fijo en un lapso de medio día, por ende, en un día completo sin perturbaciones climáticas se podría recolectar hasta una 30 % más q los paneles fijos instalados tradicionalmente. Finalmente, esta herramienta permite optimizar la recolección de energía, generando beneficios económicos y ambientales de preferencia en sectores alejados donde no existe distribución de energía eléctrica.

Palabras clave- Sistema embebido, Algoritmo SPA, Seguidor solar.

Abstract

The aim of this work is to optimize monitoring of a solar energy collection system through an embedded system and solar positioning algorithm (SPA), for this, Python programming language is employed due to its ease of use and its existing libraries for the design of the prototype capable of following the path of the sun for 12 hours a day. The tracker consists of a mobile part that allows to follow the trajectory of the sun; this is achieved through an embedded system and the algorithm that needs certain parameters to calculate the solar position via real time clock (RTC) and a global position system (GPS) allowing the solar panel to be located perpendicularly to the sun and capturing a better generation of solar energy.

The embedded system works with the Raspbian Pi OS operating system, which is based on Linux, in which it is necessary to enable and configure communication ports to use the components mentioned above. For example, to obtain coordinates such as longitude and latitude, the global position system (GPS) is used, which requires UART communication; Likewise, to obtain time and date, the real time clock (RTC) is used, which uses I2C communication and with this, the necessary parameters are obtained for the operation of the SPA algorithm that will give us the angle of inclination of the sun for a signal to be sent to the DC motor and induce rotation that follows the trajectory of the sun.

Once the hardware and software have been developed, performance tests are carried out on site and outdoors, yielding the following results; a value of 5.2 hours of light is obtained experimentally until noon, therefore, for the respective calculations, the collection of solar energy by means of the panels was approximated to 12h/day. Based on what was announced in previous paragraphs, it was possible to determine that the collection of energy was approximately 30 % more compared to the collection of energy from a fixed solar panel in a period of half a day, therefore, in a full day without climatic disturbances, up to 30 % more could be collected than traditionally installed fixed panels. Finally, this tool makes it possible to optimize energy harvesting, generating economic and environmental benefits, preferably in remote sectors where there is no electricity distribution.

Keywords- Embedded system, SPA algorithm, Solar tracker.

Capítulo 1

Introducción

El propósito de los sistemas embebidos es cubrir necesidades específicas, pueden ser programados en distintos lenguajes, poseen acceso abierto y no necesitan de licencia, lo cual facilita su uso en diferentes proyectos. Se ha demostrado que el seguimiento de precisión en la localización de los ángulos solares mejora al utilizar un sistema embebido [Morales, 2019].

Combinar el sistema embebido y el algoritmo de posicionamiento solar significa aprovechar al máximo la energía térmica y eléctrica que el sol puede proporcionar. Debido a ello, es importante considerar el movimiento del sol, ya que, está sujeto a perturbaciones y mutaciones del eje terrestre [De Melo et al., 2019].

Por tanto, el algoritmo SPA (Solar Position Algorithm) captando la máxima cantidad de radiación con respecto a la posición del sol ya que solo utiliza formulas y cálculos astronómicos ya realizados. El proyecto permite monitorizar las distintas posiciones del panel solar, mismas que son establecidas por una caja de control y como una fuente de alimentación genérica, se utilizará los mismos paneles solares, los cuales permiten cargar una batería interna y a su vez transmitir energía a la etapa de control y potencia. Logrando así proveer energéticamente al actuador y micro controlador [Milea et al., 2010] .

El seguidor solar de un eje utiliza los recursos renovables, contribuyendo con la conservación del medio ambiente, generando costos bajos, alcanzando lugares lejanos, trabajando de manera autónoma y a cualquier hora del día, sin importar las condiciones climáticas. La máxima captación de energía solar se obtiene cuando el panel logra estar perpendicular con respecto al sol. Para conseguir esto, se debe agregar al sistema un seguidor solar, cabe indicar que el prototipo a utilizar es de un eje, el cual tiene movimiento horizontal, esto debido a la ubicación geográfica del Ecuador, tomando como referencia que el amanecer o atardecer es más corto con respecto al cenit.

1.1. Organización del manuscrito

El manuscrito inicia con un breve resumen del algoritmo de posicionamiento solar SPA, implementado en su sistema Raspberry Pi Os. A continuación, se trata del análisis de los sistemas de seguidores solares mediante algoritmos. Luego

se realiza el diseño e implementación del seguidor solar en un eje permitiendo seguir la trayectoria del sol, seguido de pruebas de campo en situ donde prototipo trabajará 11 horas ininterrumpidamente, finalizando con las conclusiones y recomendaciones.

1.2. Descripción general del problema

Informes del año 2019 revelan que la producción de energía renovable a nivel mundial fue de 600 Giga vatios de energía eólica y 500 Giga vatios de energía solar [Ochoa Malhaber and Ortega Romero, 2021].

El Ecuador, en los meses de enero a julio del año 2021, la demanda eléctrica creció el 8.13 % en comparación del año 2020, el crecimiento en industrias desarrolladas y actividades económicas permitieron este incremento. El CENACE en el Ecuador, entre enero y julio de 2021, se consumieron un total de 15.086 (GWh) [Vásquez et al., 2017].

Otro problema, es que existen prototipos de un eje y dos ejes a un costo elevado, los mismos que oscilan entre 3.000y 10.000 dólares de marcas reconocidas como Feina y Wattuneed respectivamente, como se observa en la Tabla 1.1 [Arpi Puga and Prado Bermeo, 2022].

Empresa	Costo (Dólares)	Descripción
Wattsun	9.187,00	Seguidor de un eje con un grado de libertad, soporta 6 paneles solares
Feina	3.000,00	Seguidor de dos ejes, soporta 2 paneles solares
Wattuneed	10.280,00	Seguidor solar mediante calculadora solar (no incluye panel)
Alibaba	3.385,00	Seguidor de dos ejes, soporta 18 paneles solares

Tabla 1.1: Consumo de eléctrico de sensores y actuadores.

También los paneles solares que se instalan de una manera fija, no permiten obtener una captación de radiación solar adecuada, utilizando más costos de inversión. Los paneles solares que poseen inclinación fija impiden que la luz del sol llegue de forma uniforme sobre la superficie de sol. Otro factor es el efecto sombreado que provoca perdidas en la captación de energía solar, impidiendo tener una salida de voltaje estable. El efecto sombreado corresponde a la obstaculización de luz solar, estas sombras se deben a elementos que se encuentran alrededor de panel como árboles, casas, o factores cercanos donde se encuentra trabajando dicho panel [Fonseca and Rachel, 2019].

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Optimizar el seguimiento de un sistema recolector de energía solar mediante sistema embebido y algoritmo de posicionamiento solar (SPA).

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar el estado del arte en sistemas de seguidores solares mediante la posición del sol utilizando el método de medición más adecuado.
- Determinar la factibilidad de hardware y software que satisfaga los requerimientos del algoritmo de posicionamiento solar (SPA) para el seguimiento de la trayectoria solar.

- Implementar un seguidor solar automatizado mediante sistema embebido y algoritmo de posicionamiento solar (SPA), capaz de calcular la posición del sol.
- Validar mediante pruebas de campo el seguidor solar automatizado y algoritmo de posicionamiento solar (SPA).

Capítulo 2

Algoritmos de posicionamiento solar en seguidores de un eje y dos ejes mediante sistema embebido

Este capítulo contempla la revisión de algoritmos de posicionamiento solar aplicados en seguidores de un eje y dos ejes en un sistema embebido. Finalmente, se describe el problema a resolver.

2.1. Definiciones previas

2.1.1. Estado del Arte

A continuación, se toma como referencia publicaciones con respecto al tema:

Los primeros en mencionar la importancia de algoritmos en sistemas de posicionamiento solar fueron Pitman y Vant-Hull. Como base se toma ecuaciones relacionadas al calendario astronómico y americano. Adicional mencionan de los fenómenos desatendidos afectando así a la posición del sol. Es así como el programa SUNLOC tiene precisión mediante el cálculo de coordenadas horizontales, esto da como resultado un error de 41 segundos de arco [Pitman and Vant-Hull, 1978].

En 1978 Walraven [Walraven, 1978], incorporó un algoritmo que determina el horizonte local mediante las coordenadas del sol. De igual forma, este algoritmo también se basa en ecuaciones astronómicas. Walraven menciona que el algoritmo estima la posición del sol con una relación de 36 segundos de arco como precisión. En el año de 1979 Erratum señala que en el algoritmo implementado en FOR-TRAN, existía un error en el algoritmo de Walraven, habiendo permanecido oculto. Este error se refleja en el cálculo en las entradas de días. Es decir, para el primero de enero inicia con 1, sin embargo, existen años bisiestos, por lo cual se debe restar 1 antes del primero de marzo. Es por esto que el algoritmo no funciona de manera correcta en el Hemisferio Sur [Spencer et al., 1989]. Para mejorar el uso del algoritmo de Walraven, Alcher lo realizó calculando el número de día, en el año, mes y día, mediante una subrutina que es válida entre 1901-2099 sin incluir sustracción [Archer, 1980; Michalsky, 1988].

Lamm en 1981 incorpora una expresión la cual permite hallar la ecuación de tiempo, mencionando un error de 3.6 segundos de tiempo [Lamm and LO, 1981]. Holanda y Mayer han realizado programas para determinar la posición del sol basándose en la método de Lamm. De estos análisis se llega a concluir que el error de 5 grados de la elevación solar sería el resultado de haber trabajado con el método de Lamm.

En base a lo descrito un seguidor solar debe conocer las coordenadas del sol mediante su longitud y latitud (fecha y tiempo universal), en la Tabla 2.1, se observa las variables por cada algoritmo.

Algoritmo	Declinación	Asención recta	Ecuación del tiempo	Azimutal	Elevación
Spencer	x	-	x	-	-
Swift	x	x	-	x	x
Walraven	x	x	-	x	x
Lamm	-	-	x	-	-
Michalsky	x	x	x	x	x

Tabla 2.1: Algoritmos con sus respectivos parámetros.

Arrieta y Puello [Arrieta Morelo et al., 2018], realizaron un diseño de un seguidor solar en dos ejes mejorando la captación del sol para el trabajo en un sistema de bombeo, los resultados obtenidos en un muestreo de 3 días determinó un aumento de rendimiento del 40 % diario de la bomba. Arrieta menciona que no es rentable construir un seguidor por unidad, al contrario al realizarse a gran

escala y utilizarlos en diferentes aplicaciones donde se pueda captar mas radiación aumentando la rentabilidad.

Al-Rousan, Ashidi y Khairunaz en el año 2020 [Nadia et al., 2020], realizan el análisis de eficiencia de un seguidor de un eje y un seguidor de doble eje mediante lógica difusa mejorando la incertidumbre y reduciendo el error de precisión, mediante el uso de este algoritmo los ángulos de inclinación y orientación se optimizan en seguidores mediante el principio ANFIS descrito en la Tabla 2.2.

Escenario	Seguidor en un eje	Seguidor en doble eje (inclinación)	Seguidor en doble eje (orientación)
1	37,91 %	83,01 %	58,82 %
2	82,35 %	98,04 %	93,46 %
3	100 %	100 %	100 %

Tabla 2.2: Tasa de predicción de seguidor solar.

En el año 2020 Jamroen [Jamroen et al., 2020], implementó un seguidor de 2 ejes mediante un panel cristalino de 20 [W] basándose en un circuito de lazo cerrado. Jamroen realiza una comparación en su seguidor propuesto (2 ejes) con un seguidor de placa fija, teniendo como resultado un aumento de eficiencia energética de 44.89 % en el seguidor propuesto, este experimento se llevo a cabo en Bangkok. En este contexto se recomienda y se menciona el beneficio de implementación del prototipo en paneles fotovoltaicos.

Mpodi, Tjiparuro y Matsebe [Mpodi et al., 2019], en su artículo científico realizan el estudio del como aumentar la captación solar. Esto realiza mediante un seguidor de doble eje en dos dimensiones. El análisis informa una mejora de 30 % global durante el periodo de 1997-2017. Posteriormente, se construye un seguidor solar activo y pasivo, el sistema pasivo (convierte la energía solar en energía mecánica) mejora la eficiencia de captación de energía solar en un 43 %, en el sistema activo (compuesto por sensores y motores) se basa en la precisión logrando un 38 %.

2.2. Clasificación de seguidores solares

2.2.1. Seguidor de un solo eje

El seguidor en un eje se mueve en una sola dirección. A continuación, se describe los 3 tipos de métodos existentes de seguidor solar [Gutiérrez and Chávez, 2012].

2.2.2. Seguidor de un solo eje horizontal

En la Figura 2.1, se observa el seguidor de un eje horizontal, alineado de Norte-Sur, el panel solar se mueve de Este-Oeste siguiendo el sol desde su salida hasta que se oculta [Gutiérrez and Chávez, 2012].

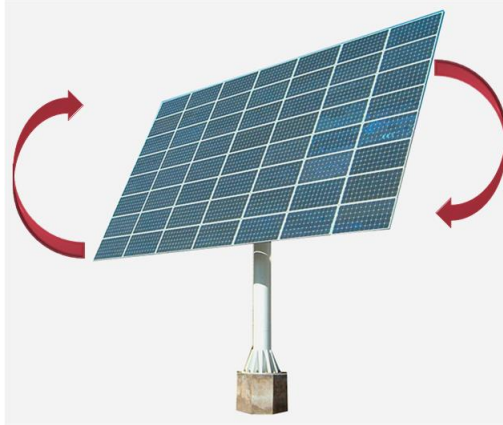


Figura 2.1: Seguidor solar en eje horizontal [Gutiérrez and Chávez, 2012].

2.2.3. Seguidor de un solo eje vertical

El seguidor de un solo eje vertical como se presenta en la Figura 2.2, se emplea en lugares con gran altitud, donde no llega el sol. En este tipo de seguidor el eje está situado vertical al suelo, al momento de girar forma un cono alrededor de dicho eje. El panel se orienta con un ángulo al respecto del eje rotacional [Gutiérrez and Chávez, 2012].



Figura 2.2: Seguidor solar en eje vertical [Gutiérrez and Chávez, 2012].

2.2.4. Seguidor de un solo eje inclinado

El seguidor de un solo eje inclinado como se observa en la Figura 2.3, se emplea en plantas de energía solar, debido a su gran rendimiento en latitudes bajas. Los paneles se colocan de forma inclinada con el mismo sentido de inclinación al eje, al realizar el giro el seguidor forma un cilindro alrededor de su propia base [Tapia Cruz, 2018].

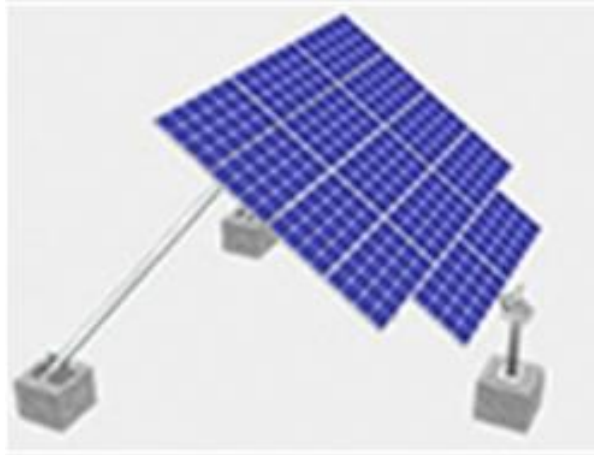


Figura 2.3: Seguidor solar en eje inclinado [Tapia Cruz, 2018].

2.3. Seguidor solar en dos ejes

El seguidor de dos ejes como se observa en la Figura 2.4, se utiliza en telescopios astronómicos. Posee dos movimientos de autonomía, este tipo de seguidor se desplaza tanto en el eje horizontal y vertical, conocidos como altitud y Azimut respectivamente captando la máxima radiación del sol desde su salida hasta que este se oculte [Tapia Cruz, 2018].

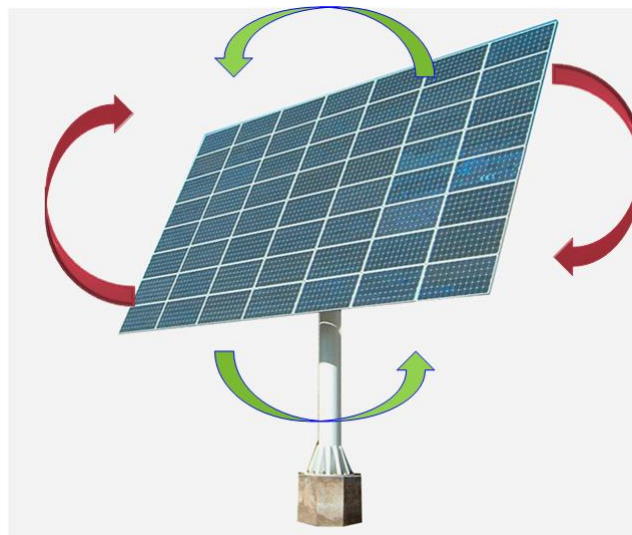


Figura 2.4: Seguidor solar en dos ejes [Tapia Cruz, 2018].

2.3.1. Seguidor solar en un eje a utilizar

Una vez analizados los diferentes tipos de seguidores solares, se utiliza el de un eje horizontal, descrito en la Figura 2.5. Esto debido que el sol emite de manera

perpendicular su radiación, la intensidad de los rayos solares es mas fuerte en el Ecuador con respecto al cenit de mediodía, es decir el Ecuador ve el amanecer o atardecer más corto. La trayectoria del sol pasa por la parte mas alta dentro de atmósfera, teniendo una radiación solar más alta en el Ecuador, siendo este el motivo el uso del seguidor solar en un eje [Franco Pallo, 2017].



Figura 2.5: Seguidor en un eje.

2.4. Introducción a Sistemas embebidos

2.4.1. Sistema embebido para seguidor solar

En el año 2014, Sidek [Sidek et al., 2014], presenta un seguidor en 2 ejes mediante una ecuación astronómica con un GPS para el movimiento y recolección de información para dicho seguidor. Este trabajo se basa en un PIC mediante un sistema embebido PID, su principio de funcionamiento se basa en controlar el eje azimutal y elevación con un microcontrolador μC pic 18f4431. Mediante este

sistema embebido se logra una precisión de ± 0.2 grados de ángulo. Haizai en el año 2013 incorpora un seguidor solar mediante dSPACE DS1104 R&D como controlador, el dSPACE utiliza la trayectoria de sol y seguimiento electróptico. Adicional, se utiliza un T-S fuzzy optimizando el sistema, es decir, en un día soleado el sistema opta por el seguimiento electróptico, caso contrario en un día de lluvia o nublado el sistema opta por el T-S fuzzy para la trayectoria del sol mejorando el sistema [Peng et al., 2013].

En el 2012, Engin [Engin and Engin, 2012], realizó un seguidor en 2 ejes mediante el μC LM3S811 incorporando un GPS. Esto consiste combinar un ciclo abierto y un ciclo cerrado el μC calcula el azimutal y elevación utiliza un motor DC y activa un actuador DC reduciendo el error de localización de 0.1° .

Abdallah en 2004 propone un seguidor en 2 ejes en lazo abierto mediante un PLC, controlando el seguidor solar y la trayectoria del sol. Es por esto que los seguidores dependen de la formulación y aplicación que se las vaya a dar. En conclusión, un seguidor de 1 eje va a requerir mayor precisión, esto a causa de la distancia entre el heliostático y el sol, debido a que la imagen solar es más sensible [Abdallah and Nijmeh, 2004].

El uso de algoritmos en seguidores solares tiene por objetivo realizar un seguimiento con precisión. En estos sistemas en caso de existir desalineación, este se reajustará mediante su algoritmo, se debe tener en cuenta que, en caso que los ejes de elevación y azimut se desalinearan, la programación implementada realizará la alineación con el cambio de valores phi (ϕ -tiempo), lambda (λ -azimutal) y zeta ζ .

2.5. Formulación del Problema

La utilización de energías renovables es necesario debido al cambio climático, en la actualidad la generación de energía se basa en la quema de fósiles con emisiones de (CO_2). Debido a esto es necesario implementar seguidores solares como nueva alternativa para satisfacer las necesidades en industrias y hogares en la actualidad. El presente trabajo tiene como finalidad el diseño de un seguidor solar permitiendo la captación solar de manera eficiente, mediante un algoritmo SPA y un mecanismo automatizado mismo que este funcionando las 12 horas del día.

Capítulo 3

Metodología y Diseño

En el capítulo 3, se desarrolla la metodología seleccionada empleada en el algoritmo de posicionamiento solar, de igual manera se describe los materiales a utilizar, acompañado de los métodos empleados tanto en software como en hardware en el seguidor solar de un eje en un sistema embebido, para posteriormente obtener las respectivas validaciones y pruebas de campo.

3.1. Metodología

El seguidor de un eje funciona de manera automática mediante un panel solar que suministra energía al sistema de control y potencia alojados en un tablero principal. El tablero consta de dos fusibles de accionamiento rápido para proteger la etapa de control y potencia, De igual manera, aloja un sistema embebido donde de ejecuta el algoritmo SPA, al sistema embebido se conecta un GPS para adquirir coordenadas geográficas y un RTC para determinar la hora. El algoritmo empieza a trabajar en conjunto con los componentes eléctrico electrónicos de tal forma, que el prototipo sigue la trayectoria del sol, la cual es accionado por un motor, haciendo que la estructura mecánica trabaje de forma automática, funcionando 12 horas ininterrumpidamente. En la Figura 3.1, se observa la arquitectura a implementar. Es importante mencionar las coordenadas de ubicación y trayectoria solar en Ecuador, descritas en las Figuras 3.2 y 3.3. De igual forma se detalla la irradiación solar en Pichincha proporcionada por el NREL, como se observa en la Figura 3.4.

El siguiente paso es realizar el dimensionamiento del sistema fotovoltaico, al igual que la potencia del panel solar a utilizar, cálculo de la batería y cálculo del controlador de carga.

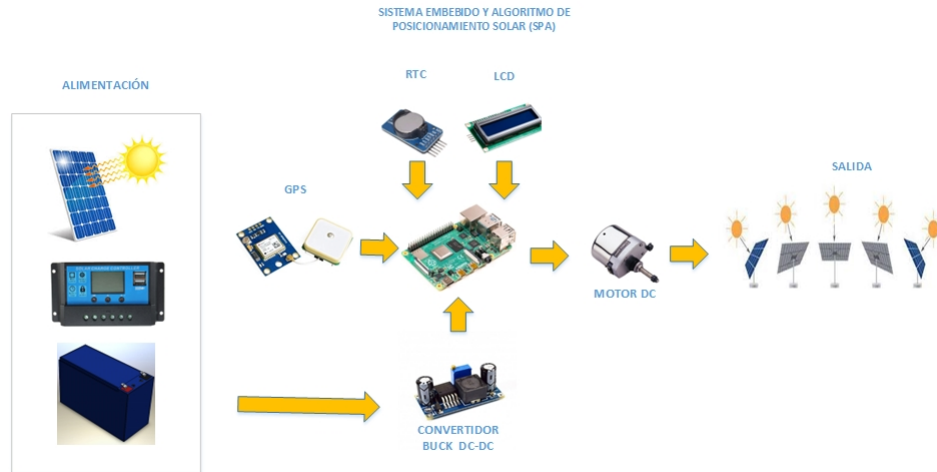


Figura 3.1: Arquitectura del seguidor solar automatizado usando sistema embebido y algoritmo de posicionamiento solar SPA.

3.1.1. Coordenadas de Ubicación respecto al Ecuador

Para la ubicación de lugares en la esfera terrestre se emplea coordenadas globales correspondientes a latitud y longitud. El equinoccio corresponde a la intersección del Ecuador con la eclíptica, es decir, existe 90° paralelos al Norte y al Sur referentes a latitud. Con respecto a la longitud existen 180° meridianos al Este y al Oeste [Nogales].

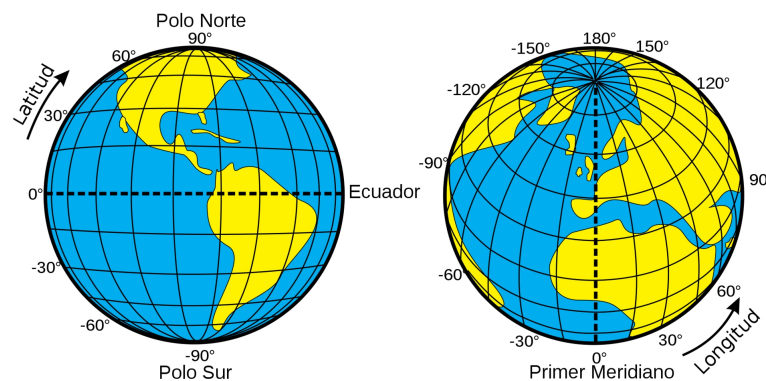


Figura 3.2: Latitud y Longitud en la Esfera Terrestre [Nogales]

3.1.2. Trayectoria solar

El sol sigue una misma trayectoria de forma circular coincidiendo que sale por el Este (Amanecer), y se oculta por el Oeste (Ocaso) con una duración de 12 horas tanto en la noche como en el día. Como referencia en el Ecuador el sol se ubica en el Cenit a 12:00 horas (mediodía) [Agila Díaz and Landázuri Ayala, 2021].

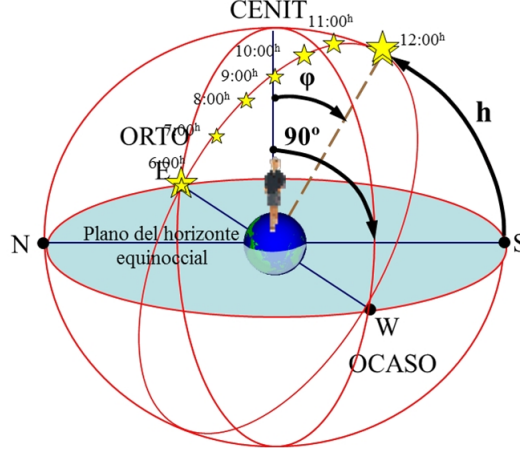


Figura 3.3: Latitud y Longitud en la Esfera Terrestre.
 [Agila Díaz and Landázuri Ayala, 2021]

3.1.3. Análisis del Algoritmo SPA

Para el cálculo de los ángulos en el algoritmo solar se usaron diferentes ecuaciones para cada uno de los parámetros de los cuales son:

Ángulo Azimut:

$$\psi = \arctan\left(\frac{\sin(Ha)}{\cos(Ha) \cdot \sin(Lat) - \tan(\delta) \cdot \cos(Lat)}\right)[\text{grados}] \quad (3.1)$$

Ángulo Altitud:

$$\alpha = \sin(Ha) \cdot \sin(\delta) + \cos(La) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(Ha)[\text{grados}] \quad (3.2)$$

Angulo de Hora:

$$Ha = agst + long - Ra[\text{grados}] \quad (3.3)$$

Donde:

ψ = Ángulo azimut.

Ha = Ángulo hora Local.

La = Latitud geográfica del observador.

δ = Declinación del sol .

α = Ángulo de altitud.

$agst$ = Tiempo sideral medio de Greenwich.

$long$ = Longitud.

Ra = Asención recta del sol.

Las ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3, fueron implementadas en el algoritmo de posicionamiento solar, en las cuales ayudaron a calcular los ángulos necesarios para el posicionamiento del panel solar con respecto al sol.

3.1.4. Irradiación solar en Pichincha

Vaca-Revelo y Ordoñez [Vaca Revelo and Ordóñez, 2020], realizaron el Atlas Solar en el Ecuador en el año 2019, el modelo NREL fue comparado con mediciones de 41 estaciones meteorológicas del DMQ, INAMHI, IIGE llegando a

determinar la que la radiación solar es casi constante durante el año, es así que la radiación del sol es alta para uso en seguidores solares, teniendo datos de 2.9 [kWh/m² día] hasta 6.3 [kWh/m² día]. En la Figura 3.4, se observa la irradiación global horizontal en la provincia de Pichincha lugar donde se ubica el seguidor solar para las pruebas respectivas.

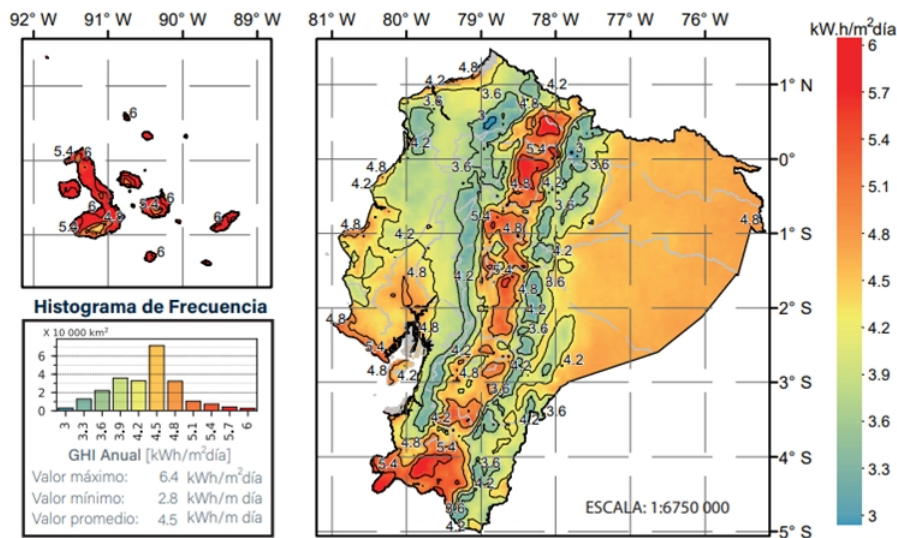


Figura 3.4: Irradiación Solar Global Horizontal - Pichincha [Vaca Revelo and Ordóñez, 2020].

3.1.5. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

Para el dimensionamiento de sistema de alimentación es necesario conocer la corriente [A] que consume cada sensor y actuador utilizados en el seguidor solar, una vez que se conoce estos parámetros se calcula la potencia nominal descrito en la ecuación 3.4.

$$P = V \cdot I [W] \quad (3.4)$$

En la Tabla 3.1, se muestra la corriente [A] que consume cada elemento del sistema durante las 12 horas, con fin de obtener el dimensionamiento del panel solar.

Dispositivo	Cantidad	Voltaje[V]	Corriente de consumo [A]	Potencia nominal [W]	Tiempo de operación[H]	WH/Día
Raspberry	1	5	0.25	1.25	24	30
Convertor Buck	1	12	0.03	0.36	24	8.64
Motor	1	12	1.8	21.6	0.5	10.8
Rtc	1	5	0.00065	0.00325	24	0.078
Gps	1	5	0.067	0.335	24	8.04

Tabla 3.1: Consumo de eléctrico de sensores y actuadores

La potencia nominal total que consume los sensores y actuadores en el sistema es de 57.55 WH/Día detallado en la ecuación 3.5.

$$30 + 8,64 + 10,8 + 0,078 + 8,04 = 57,55 \quad (3.5)$$

Ahora, se calcula la cantidad de energía consumida EDC [Vatio/Hora] diariamente debido a que la estación trabaja las 12 horas ininterrumpidamente.

$$E = P \cdot H \quad (3.6)$$

En la Tabla 3.1, se calcula la energía real total que consume el prototipo, como se observa en la ecuación. Mediante el dato obtenido, se procede a dimensionar la batería a utilizar. Se indica que la eficiencia de carga/descarga es de 0.95 [MARTÍNEZ JIMÉNEZ, 2012] .

$$E = \frac{c}{\eta} \quad (3.7)$$

$$E = \frac{57,55}{0,95} = 60,58[W] \quad (3.8)$$

3.1.6. Hora solar pico en Ecuador

La HPS (Hora Solar Pico) corresponde a la irradiación solar. Las horas irradiación constante que recibe la superficie esta dado por $1000[W/m^2]$ proporcionados por el atlas solar .Para determinar el valor de HPS se divide la irradiación incidente entre el valor de la potencia de irradiancia [Conecel, 2008] , por tanto, se dice que:

- Mediante el atlas solar, se obtiene la irradiación anual 4.5 [Kw/h por día].
- Para HPS corresponde el valor de 1000[K/H].

$$HPS = \frac{4,5}{1000} = 4,5[W/H] \quad (3.9)$$

Entonces, se obtiene que HPS es de 4.5[W/H] en el Ecuador.

3.1.7. Cálculo de potencia para el sistema fotovoltaico

Una vez que se conoce la potencia total mediante la ecuación 3.5, se procede a calcular en número de paneles totales para el trabajo continuo del seguidor solar, mediante la ecuación 3.10.

$$NT = \frac{ET}{Pp.HPS.Fg} \quad (3.10)$$

Donde:

NT =Número total de paneles.

ET = Energía total consumida.

Pp =Potencia Pico - panel solar de 50 [W].

Hps =Horario solar Pico.

Fg =Factor perdidas global (rango 0.65 hasta 0.90) .

$$NT = \frac{60,58}{50(4,5)(0,90)} = 0,30 \quad (3.11)$$

Se opta por el valor de 0.90 de factor de perdida global, teniendo un $NT=0.30$, entonces se utiliza el (30%) de panel cubriendo el consumo requerido por la estación.

3.1.8. Cálculo de la batería

Para que la estación trabaje ininterrumpidamente se procede al dimensionamiento de la batería en base a la capacidad del mismo, dado en amperios - hora [A/H].

$$Capacidad = \frac{D \cdot ET}{V_{bat} \cdot Pd} \quad (3.12)$$

Donde:

D = Días de autonomía.

ET = Energía consumida.

Hps = Voltaje de la batería.

Pd = Profundidad de descarga.

$$Capacidad = \frac{(0,5)(60,58)}{(12)(0,7)} = 3,60 \quad (3.13)$$

En la ecuación 3.13, se toma como valor 12 [V] debido al voltaje de trabajo de los componentes, de igual la máxima profundidad de descarga corresponde a 0.7 [Caluña Tisalema and Jordán Vargas, 2017]. Finalmente, se estandarizó la batería a 12 [V]/7 [A/H].

3.1.9. Cálculo del controlador de carga

Para el controlador de carga se toma los datos obtenidos del panel solar. Donde:

I_{reg} = Corriente total requerida.

P_{max} = Potencia máxima del panel solar.

V_{bat} = Voltaje de batería.

$$I_{reg} = \frac{P_{max}}{V_{bat}} \quad (3.14)$$

La corriente máxima requerida por la estación es de 4.16[A]. En este caso se utiliza un controlador de carga estandarizado de 10 [A].

A continuación, se detalla cada elemento empleado en el seguidor solar de un eje.

3.2. Descripción de materiales a utilizar

3.2.1. Motor DC WD1160

Se trata de un actuador que transforma la energía eléctrica en mecánica, realizando un movimiento rotatorio. Una vez que se tiene dimensionado el panel solar como se observa en la ecuación 3.5, corresponde a 50 [W], tiene un peso estimado de 5Kg. El motor WD1160 posee un torque de 8.5 - 10 [N.m], permitiendo mover el panel solar conjuntamente con la trayectoria del sol como se muestra en la Figura 3.5.



Figura 3.5: Motor Dc.

3.2.2. Pantalla de Cristal Liquido LCD 2X16

La pantalla de cristal liquido como se observa en la Figura 3.6, permite la visualización de los datos obtenidos mediante el algoritmo SPA, de igual forma, despliega la hora y fecha proporcionado por el RTC. La comunicación se realiza mediante el protocolo I2C, en este sentido se dice que, la tarjeta Raspberry trabaja modo Maestro y la LCD como esclavo.

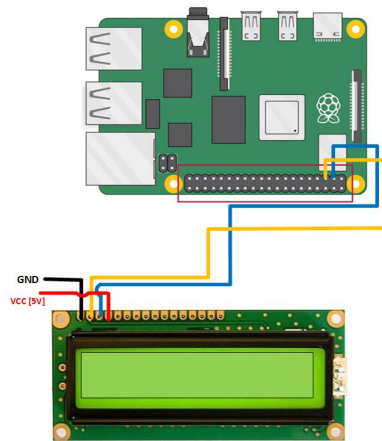


Figura 3.6: Conexión de raspberry y Lcd.

3.2.3. Conversor buck DC-DC

El conversor Buck como se muestra en la Figura 3.7, su principal función es de mantener la tension de salida inferior a su entrada. Se utiliza este conversor para reducir el voltaje de salida del mismo de 12[V] a 5[V] mismo que sirve para la alimentación de nuestro sistema embebido.

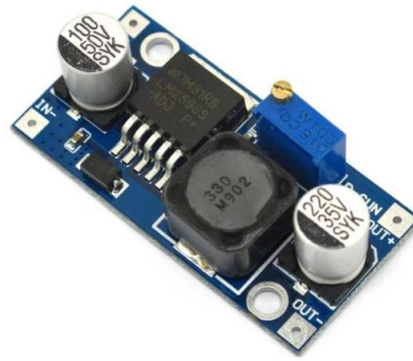


Figura 3.7: Conversor Buck DC-DC.

3.2.4. Reloj a Tiempo Real RTC DS3231

El real time clock detallado en la Figura 3.8, consiste en un circuito integrado alimentado por un batería, acompañado de un oscilador, generalmente corresponde a un cristal de cuarzo que permite contar los segundos, minutos, horas, días, meses, años

[Garmendia Gutiérrez et al., 2021].

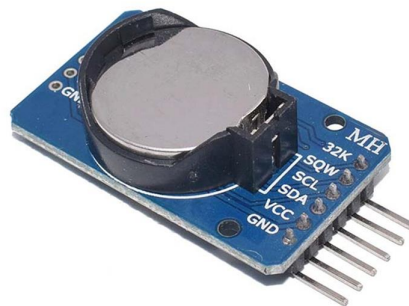


Figura 3.8: RTC.

3.2.5. Sistema de Posicionamiento Global Gps Neo 6M

El sistema de posicionamiento global se lo representa en la Figura 3.9, permite posicionar cualquier objeto sobre la tierra, la version 6M utiliza recepción simultanea de 3 Satélites de sistema de navegación global (GPS/Galileo junto con BeiDou o GLONASS). Compatible con interfaces Uart, I2C, Usb.



Figura 3.9: Gps.

3.2.6. Giroscopio MPU6050

Como se observa en la Figura 3.10, corresponde al módulo MPU6050, su unidad de medición inercial o IMU (Inertial Measurement Units) de 6 grados de libertad (DoF) ya que combina un acelerómetro y un giroscopio de 3 ejes que permite utilizarlo para navegación, estabilización etc.

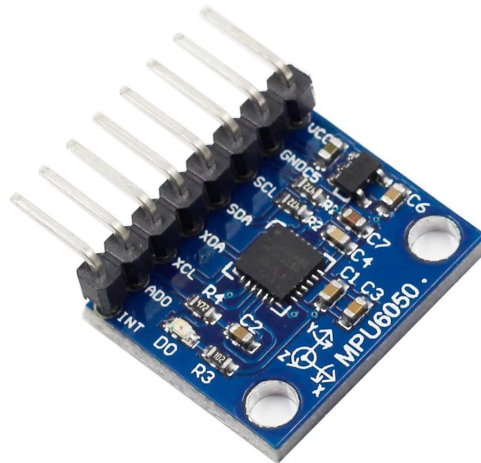


Figura 3.10: Giroscopio.

3.2.7. Fusible cilíndrico

Se utiliza para protección de circuitos frente a una alta intensidad. En nuestro sistema se utiliza dos fusibles como se observa en la Figura 3.11, el primero se utiliza para proteger la etapa de control y el segundo fusible proteja la etapa de potencia.



Figura 3.11: Fusible cilíndrico 10X38 mm.

3.2.8. Placa de relés

Para el movimiento del seguidor solar se utiliza una placa de relés descrito en la Figura 3.12, esta placa permite realizar el giro en el eje horizontal (Este - Oeste) siguiendo la trayectoria del sol. Para ubicar el panel solar a su posición inicial se emplea un segundo relé, permitiendo realizar una inversión de giro del motor.

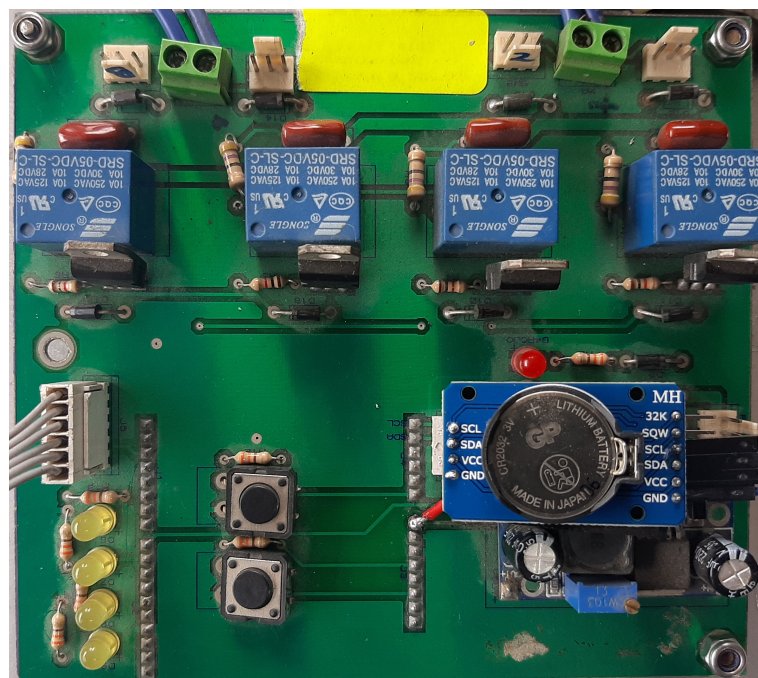


Figura 3.12: Placa de relés para movimiento del seguidor.

3.2.9. Sistema de alimentación fotovoltaico

También llamado panel solar, aprovecha la energía del sol para producir energía eléctrica esto mediante el efecto fotoeléctrico permitiendo sustraer la

energía del sol obteniendo un voltaje [DC] a su salida. Estos paneles están constituidos por células de silicio, dividiéndolos en monocristalinos y policristalinos [Vallina et al., 2010]. El panel solar es la fuente principal que suministra energía a todo nuestro sistema y movimiento del prototipo como se observa en la Figura 3.13.

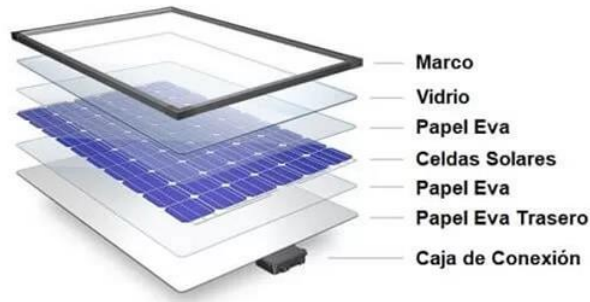


Figura 3.13: Panel solar - despiece interno [Vallina et al., 2010].

3.2.10. Controlador de carga

El controlador detallado en la Figura 3.14, se emplea para proteger las baterías, a su vez suministra energía estable a las cargas que se conecten a esta. El controlador consta de 3 etapas: medición, potencia y control. La etapa de medición consiste en medir la corriente que ingresa por el panel solar y la corriente que suministra a la carga. La etapa de potencia carga las baterías al estar conectado el panel solar. La etapa de control se encargará de desconectar la batería en caso de sobrecarga [Hoyos et al., 2011].

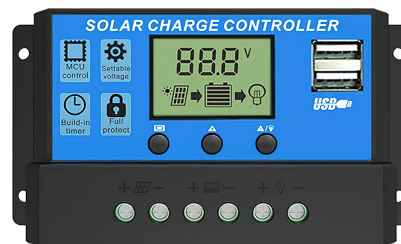


Figura 3.14: Controlador de carga utilizado en el prototipo [Hoyos et al., 2011].

3.2.11. Tablero de control

Es donde se encuentra alojado la etapa de control y de potencia sus dimensiones son de 30x40 [cm]. El tablero de control contiene, los fusibles de protección, controlador de carga, sistema embebido, gps, rtc, placa relés, convertidor buck, mismos que trabajan en conjunto el movimiento del seguidor solar. En la Figura 3.15, se detalla los componentes electrónicos empleados en el seguidor solar.

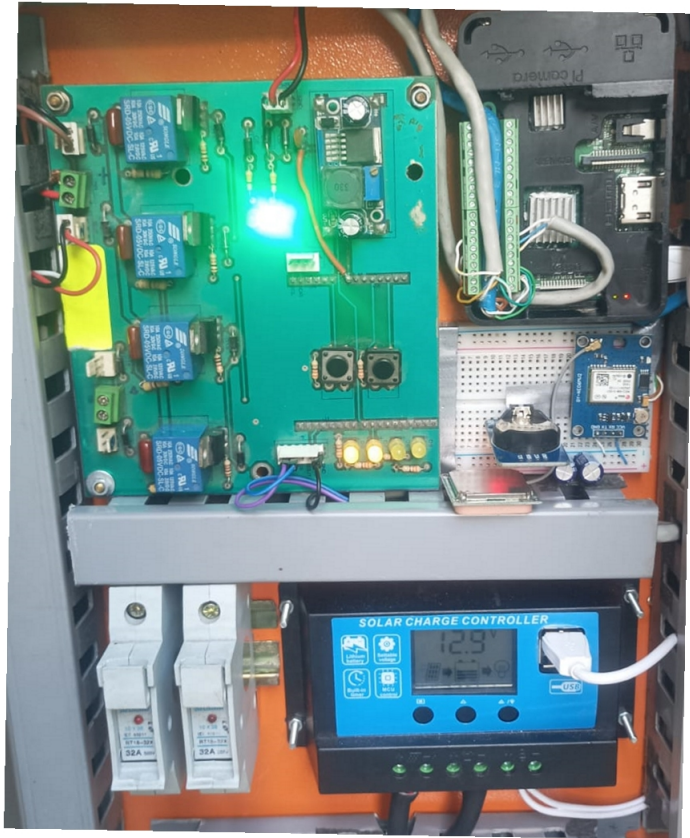


Figura 3.15: Elementos del Tablero de Control.

3.3. Diagrama de bloques del Sistema Implementado

Como se observa en la Figura 3.16, se detalla la comunicación con todos los componentes electrónicos utilizados para seguir la trayectoria del sol, al igual que los protocolos utilizados.

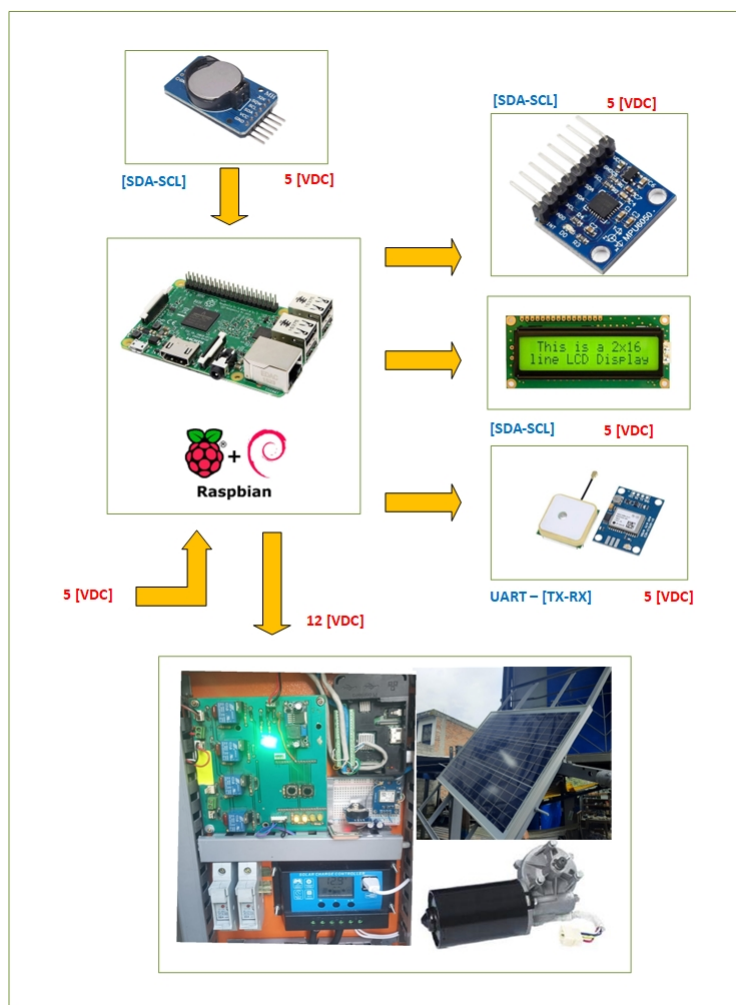


Figura 3.16: Diagrama de bloques del Prototipo.

El panel solar de la Figura 3.13, suministra energía al seguidor solar, para protección de la componentes electrónicos se emplea fusibles cilíndricos de accionamiento rápido detallado en la Figura 3.11. Se utiliza el controlador de carga descrito en la Figura 3.14, para carga la batería de respaldo. A continuación se reduce el voltaje a [5 VDC], mediante un convertidor buck descrito en la Figura 3.7. En la Figura 3.9, se muestra la adquisición de datos del gps mediante el protocolo Uart.

Para la visualización de los datos se utiliza una LCD descrito en la Figura 3.6, trabajando en conjunto con un RTC como se muestra en la Figura 3.8 y un giroscopio detallado en la Figura 3.10. El sistema embebido trabaja con el Raspbian Pi Os, se utiliza un puerto digital que se conecta a la placa de potencia para el giro de motor como se muestra en la Figura 3.5, esto se lo realiza mediante una placa de relés descrito en la Figura 3.12. Adicional el giroscopio detallado en la Figura 3.10, permite al panel solar se ubique perpendicular al sol. Finalmente en la Figura 3.17, se evidencia el prototipo ensamblado.

3.4. Diseño de seguidor solar en un eje

El tipo de seguidor utilizado corresponde al de un eje con movimiento horizontal como se muestra en la Figura 3.17. Este seguidor aloja un panel solar de 50 [W] en la parte superior, en la parte del mástil se ubica el motor para el movimiento del panel con relación al desplazamiento de sol. En la parte central se ubica el tablero de control. Finalmente en la parte inferior se ubica la batería de respaldo para su funcionamiento permanente.

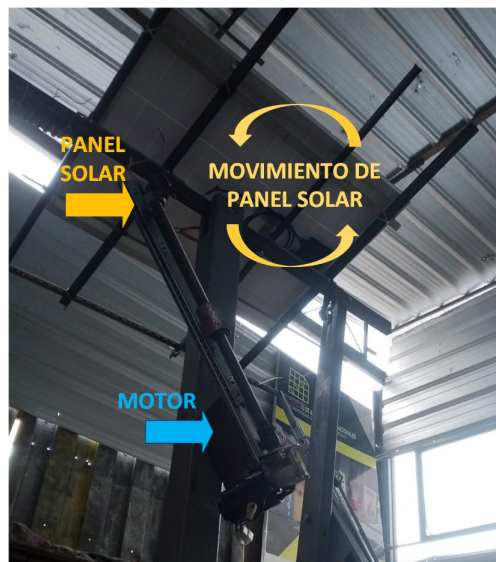


Figura 3.17: Seguidor en un eje.

3.4.1. Despiece de seguidor solar en un eje

El seguidor posee una estructura metálica de acero rectangulares galvanizado con pintura anticorrosiva con 2mm de espesor, en la parte central se ubica un tablero con dimensiones de 30X40 cm, en la parte interna consta el sistema embebido con el algoritmo SPA , placa de relés para el giro del motor, convertidor buck para la alimentación del gps y rtc, controlador de carga para cargar de energía a la batería de respaldo, todo el sistema posee protecciones con 2 fusible tipo cartucho de accionamiento rápido. En la parte superior se aloja el panel solar con soporte permitiendo el movimiento del mismo, adicional se emplea brazos expansibles con herrajes móviles permitiendo en desplazamiento de manera horizontal.

A continuación, se detalla el despiece de la estructura metálica de los elementos utilizados.

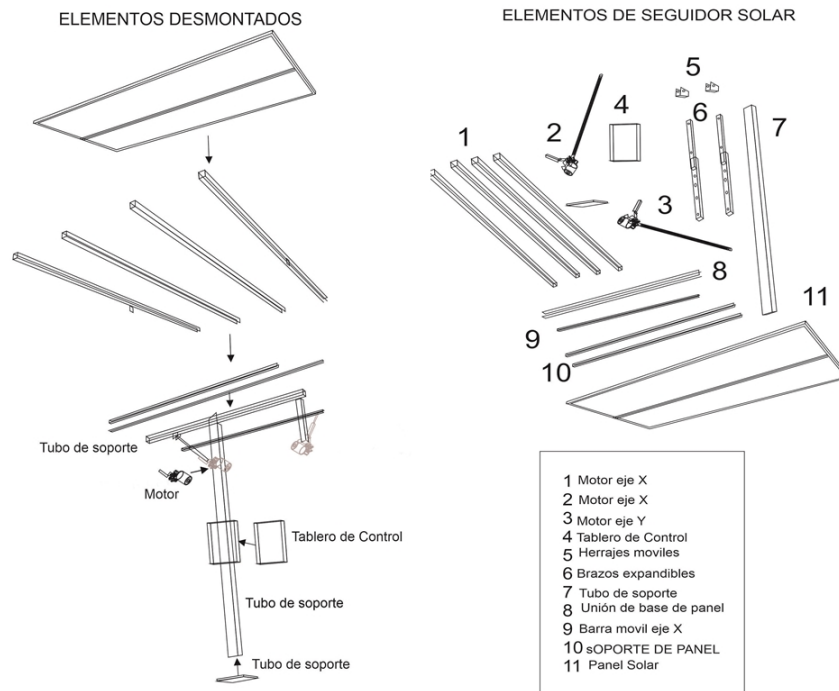


Figura 3.18: Planos de seguidor solar en [cm].

En la Figura 3.18, se muestra la representación gráfica de cada una de las piezas que conforman el seguidor solar de un eje automatizado.

3.5. Descripción del Sistema embebido para procesar el algoritmo SPA

La selección del sistema embebido se realiza en base a protocolos de comunicación, sistema operativo, entradas digitales, cpu, memoria ram, gpu, los cuales son necesarios para el seguidor solar. De igual forma para la implementación del algoritmo de posicionamiento solar SPA, se utiliza una tarjeta de placa reducida conocido como Raspberry Pi donde se ejecutara el algoritmo descrito anteriormente. A continuación, se realiza un análisis a las placas actuales que existen en el mercado para su posterior utilización [Alarcón Aguirre and López Estévez, 2019].

Descripción	Raspberry Pi 3B	Raspberry Pi 3B+	Raspberry Pi 4B
Procesador	Broadcom BCM2837	Broadcom BCM2837B0	Broadcom BCM2711B0
Cpu	1.2 Ghz Quad Core	1.4 Ghz Quad Core	1.5 Ghz Quad Core
Gpu	400 Mhz	400 Mhz	400 Mhz
Ram	1 GB	1 GB	1 GB /2 GB/4 GB
USB	4 USB 2.0	4 USB 2.0	2 USB 2.0/2 USB 3.0
Video	jack, HDMI	jack, HDMI	jack, 2 Micro HDMI
Audio	jack, HDMI	jack, HDMI	jack, micro HDMI
Memoria	Micro SD	Micro SD	Micro SD
Wireless	2.4 Ghz Bluetooth 4.1	2.4 y 5 Ghz Bluetooth 4.2	2.4 y 5 Ghz Bluetooth 5.0
Ethernet	ETH 10/100 Gbps	GETH 300 Mbps	GETH 100 Mbps
Alimentación	5 [V] ,2.5[A]	5 [V] ,2.5[A]	5 [V] ,3[A]
GPIO	40 pines	40 pines	40 pines

Tabla 3.2: Descripción de tarjetas Raspberry.

3.5.1. Raspberry pi 3B

Una vez realizado el análisis de las tarjetas raspberry actuales en la Tabla 3.2, se opta por trabajar con el modelo 3B correspondiente a la tercera generación. La tarjeta raspberry emplea un procesador BCM2837, dispone de 4 núcleos que trabaja con instrucciones de 64 bits. De igual forma contiene todos los periféricos E/S para trabajar como minicomputadora. En la Figura 3.19 se detalla los pines del sistema embebido a utilizar.

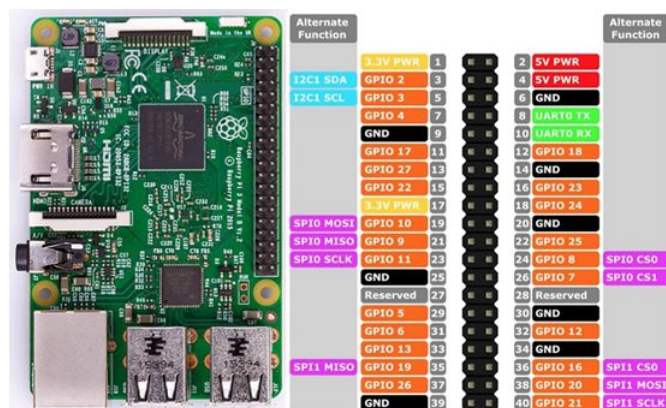


Figura 3.19: Sistema Embebido a utilizar.

3.6. Noobs y Noobs Lite

Noobs. Contiene Raspbian como sistema operativo, incluye la capacidad de seleccionar entre uno y otro sistema operativo. Se indica que raspbian es un Debian modificado.

Noobs Lite. Es una versión ligera, esté no incorpora sistemas operativos. Contiene el mismo menú para seleccionar Raspbian u otros sistemas operativos, con la diferencia que se debe descargar e instalar desde cero.

3.6.1. Raspberry Pi OS / Raspbian

El Raspberry Pi OS optimiza las funciones de ARM. La tercera generación usa LXDE como Desktop y Chromium como navegador principal. Adicionalmente posee herramientas de desarrollo como IDLE para interactuar con Python o Scratch, y diferentes módulos de juegos en Pygame descrito en la Figura 3.20.

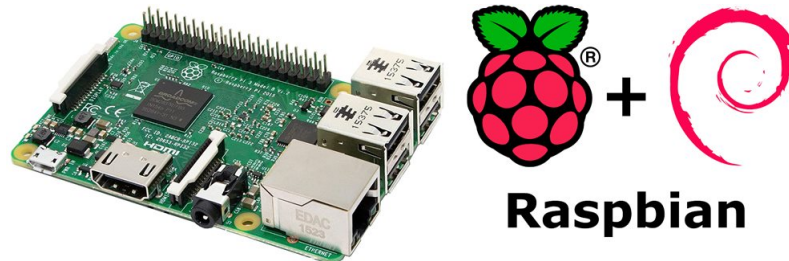


Figura 3.20: RaspberryPi 3B y S.O Raspbian.

3.6.2. Raspbian Pi Os a utilizar

De los sistemas descritos anteriormente, se opta por trabajar con Raspberry OS, debido a su rendimiento mejorado en su microprocesador ARM64 obteniendo características especiales a un ordenador convencional. El sistema recomendado por Raspberry, es el software que se utiliza para el algoritmo de posicionamiento solar (SPA). Su sistema operativo se basa en Debian añadiendo una interfaz sencilla y ligera LXDE, además, posee aproximadamente 35.000 paquetes de software que pueden ser utilizados por los desarrolladores durante la instalación de su sistema operativo. En la Figura 3.21 se observa el desktop del SO Raspbian instalado correctamente.

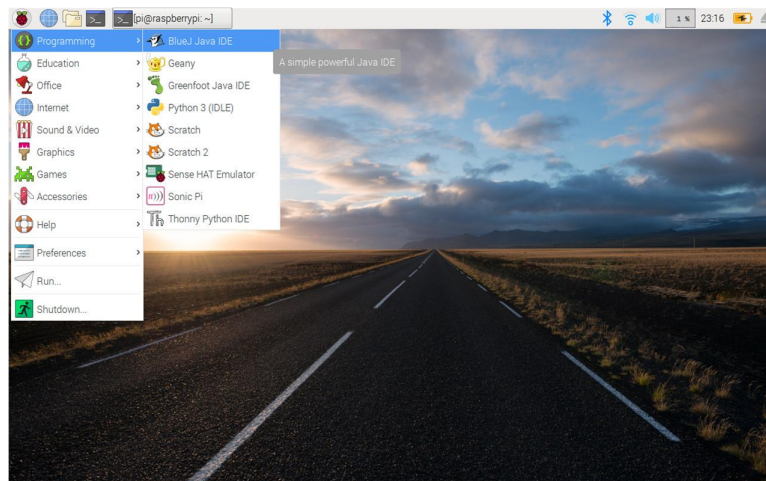



Figura 3.21: Raspbian en tarjeta Raspberry.

3.7. Protocolos de comunicación a Utilizar

A continuación se detalla los diferentes puertos de comunicación empleados en el proyecto.

3.7.1. Entradas y salidas Digitales

La tarjeta Raspberry Pi 3B cuenta con pines que pueden trabajar como entrada o salida digital denominados GPIO (General Purpose Input/Output). De igual forma los pines Gpio se los pueden trabajar en propósito específico adaptándose a las necesidades de nuestro proyecto mediante la programación de códigos o scripts desde la consola. En la Figura 3.22 muestra los diferentes pines de la raspberry.



Peripherals	GPIO	Particle	Pin #	Pin #	Particle	GPIO	Peripherals
	3.3V		1	X	X	2	5V
I2C	GPIO2	SDA	3	X	X	4	5V
	GPIO3	SCL	5	X	X	6	GND
Digital I/O	GPIO4	D0	7	X	X	8	TX
							GPIO14
							UART
	GND		9	X	X	10	RX
							GPIO15
							Serial 1
Digital I/O	GPIO17	D1	11	X	X	12	D9/A0
							GPIO18
							PWM 1
Digital I/O	GPIO27	D2	13	X	X	14	GND
Digital I/O	GPIO22	D3	15	X	X	16	D10/A1
							GPIO23
							Digital I/O
	3.3V		17	X	X	18	D11/A2
							GPIO24
							Digital I/O
SPI	GPIO10	MOSI	19	X	X	20	GND
	GPIO9	MISO	21	X	X	22	D12/A3
	GPIO11	SCK	23	X	X	24	GPIO25
							Digital I/O
	GND		25	X	X	26	CE0
							GPIO8
							SPI
							(chip enable)
DO NOT USE	ID_SD	DO NOT USE	27	X	X	28	DO NOT USE
							ID_SC
							DO NOT USE
Digital I/O	GPIO5	D4	29	X	X	30	GND
Digital I/O	GPIO6	D5	31	X	X	32	D13/A4
							GPIO12
							Digital I/O
PWM 2	GPIO13	D6	33	X	X	34	GND
PWM 2	GPIO19	D7	35	X	X	36	D14/A5
							GPIO16
							PWM 1
Digital I/O	GPIO26	D8	37	X	X	38	D15/A6
							GPIO20
							Digital I/O
	GND		39	X	X	40	D16/A7
							GPIO21
							Digital I/O

Figura 3.22: E/S de Raspberry Pi 3B.

3.7.2. Protocolo I2C

Denominado Circuito inter-integrado descrito en la Figura 3.23, es un protocolo de comunicación el cual se trabaja con 2 hilos, un hilo para datos (SDA-Serial Data) y otro hilo de reloj (SCL-Serial Clock) para transmisiones de datos bidireccionales llegando a transmitir 100 y 400 kbit/s.

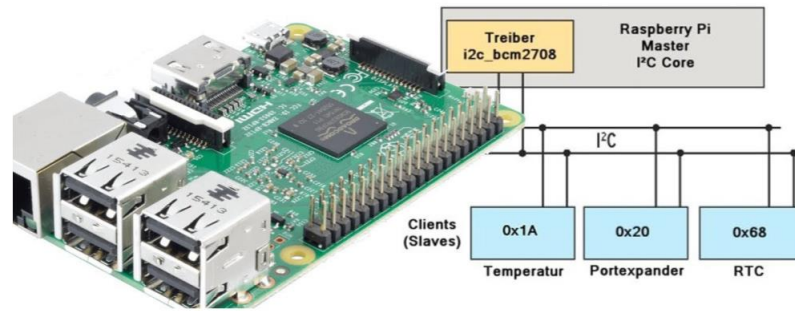


Figura 3.23: Protocolo I2C en Raspberry Pi 3B.

3.7.3. Protocolo UART

Por sus siglas transmisor-receptor asíncrono universal descrito en la Figura 3.24, utiliza dos hilos de TX y Rx para el envío y recepción de datos. Esto mediante los GPIO 14 (Tx) y GPIO 15 (Rx). UART consta de una trama que contiene Bit Start, Paquete y Bit de parada.

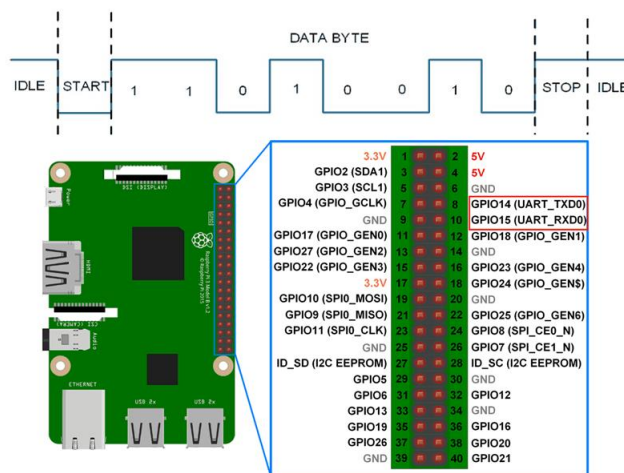


Figura 3.24: Protocolo UART en Raspberry Pi 3B.

3.8. Diagrama de Flujo para Seguidor Solar Automatizado Usando un Sistema Embebido y Algoritmo de Posicionamiento Solar

Una vez realizado las configuraciones necesarias a los puertos en el Sistema Embebido, el procedimiento que realizará el algoritmo permitiendo seguir la tra-

yectoria del sol mediante nuestro seguidor, descrito en la Figura 3.25.

El diagrama de flujo en la Figura 3.25, muestra paso a paso el funcionamiento del seguidor solar utilizando un sistema embebido y algoritmo de posicionamiento solar SPA. La programación comienza con la inicialización de los puertos de comunicación, trasladando al seguidor solar a su posición inicial que es por donde sale el sol, el siguiente paso es adquirir la fecha y hora, mediante el gps se adquiere los datos de longitud y latitud. Ahora se ejecuta el algoritmo SPA obteniendo los ángulos azimutal y elevación para que el seguidor solar de un eje pueda moverse. La visualización de datos de hora, fecha y posición se los refleja en la LCD.

DIAGRAMA DE FLUJO PARA SEGUIDOR SOLAR AUTOMATIZADO USANDO UN SISTEMA EMBEBIDO Y ALGORITMO DE POSICIONAMIENTO SOLAR (SPA).

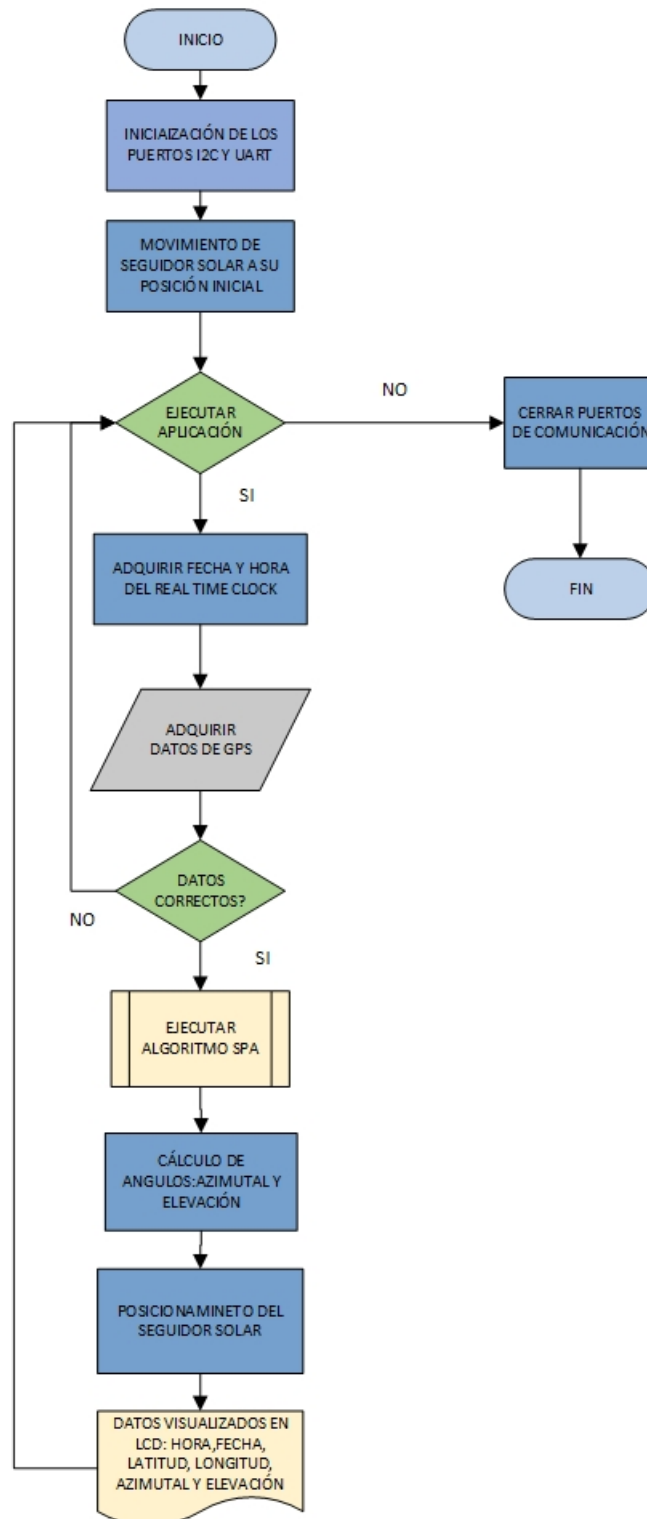


Figura 3.25: Diagrama de flujo de algoritmo SPA en un Sistema Embebido.

3.9. Instalación de Librerías

Para la utilización de los puertos de comunicación es necesarios la instalación de librerías mismas que facilitan la interconexión de periféricos con los componentes a utilizar. Las librerías a instalar son WiringPi y wiringSerial, estas librerías trabajan con lenguaje C permitiendo el acceso a los 40 pines de la tarjeta Raspberry que son de propósito general, teniendo un adecuado soporte al trabajar con I2C, UART, SPI, PWM. En la Tabla 3.3, se describe los pasos a seguir.

Comando	Descripción
pi@raspberrypi ~ \$ sudo bash	Inicio como root
root@raspberrypi ~ # apt-get install git-core	Ingreso a git para modificación de código
root@raspberrypi ~ # apt-get update	Actualización de repositorio
root@raspberrypi ~ # git clone git://git.drogon.net/wiringPi	Descarga de librería
root@raspberrypi ~ # cd wiringPi	Acceso a la carpeta descargada
root@raspberrypi ~ # git pull origin	Extraer contenido
root@raspberrypi ~ # cd wiringPi	Acceso a la carpeta interna
root@raspberrypi ~ # ./build	Instalación

Tabla 3.3: Instalación de librerías.

3.10. Conexiones, habilitación de puertos y pines

Mediante el uso de un sistema embebido se procede a realizar la conexión y habilitación de protocolos para que la tarjeta Raspberry pueda enviar datos a al seguidor solar mediante el algoritmo de posicionamiento solar SPA. De esta manera el panel solar pueda seguir la trayectoria del sol y tener una captación de radiación eficiente, ver Figura 3.26.

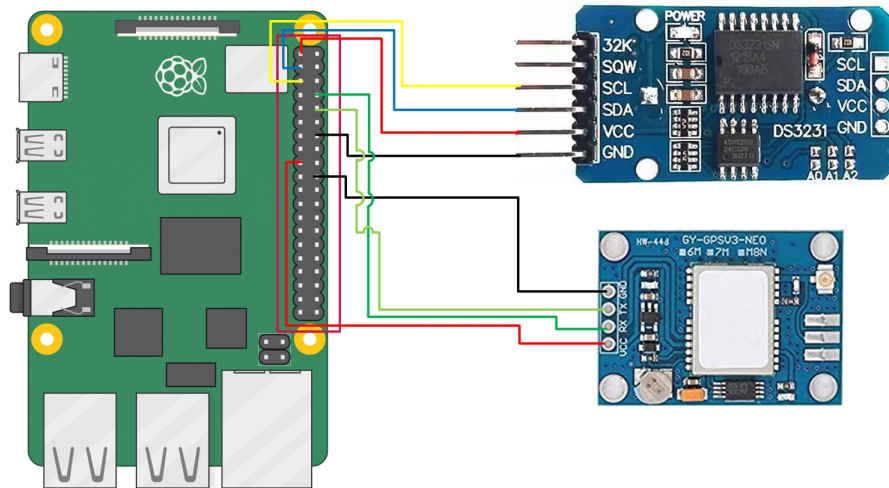
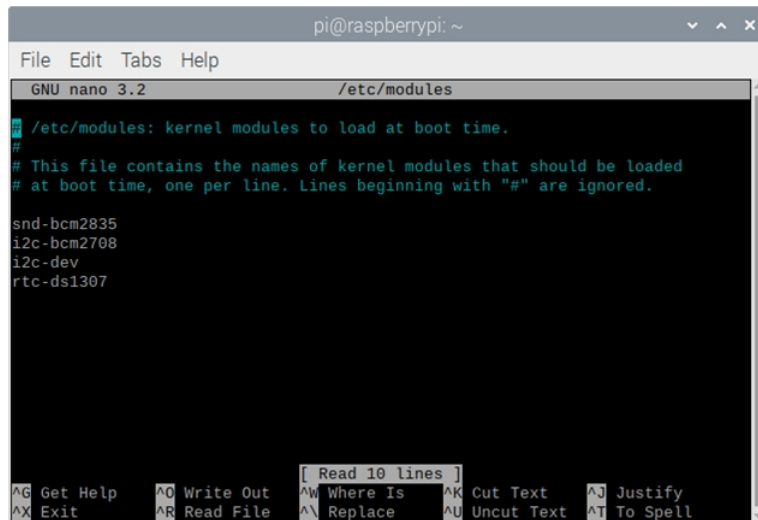


Figura 3.26: Conexión Raspberry con RTC y Gps.

3.11. Habilitación de protocolos I2C (RTC) y UART (GPS)

El Raspbian Pi Os se encuentra ejecutándose en una tarjeta Micro-SD, dentro del S.O se encuentra nuestro algoritmo de posicionamiento solar SPA. Primero se utiliza el RTC para obtener los datos de día,mes,año y hora esta conexión se realiza mediante el protocolo I2C mediante los pines Gpio 2 (pin 2 - SDA) y Gpio 3 (pin 3 - SCL). A continuación, se procede a editar el archivo *modules* por medio de la consola **terminal** descrito en la Figura 3.27.



```
pi@raspberrypi: ~
File Edit Tabs Help
GNU nano 3.2 /etc/modules
/etc/modules: kernel modules to load at boot time.
#
# This file contains the names of kernel modules that should be loaded
# at boot time, one per line. Lines beginning with "#" are ignored.

snd-bcm2835
i2c-bcm2708
i2c-dev
rtc-ds1307

[ Read 10 lines ]
^G Get Help  ^O Write Out  ^W Where Is   ^K Cut Text   ^J Justify
^X Exit      ^R Read File   ^\ Replace    ^U Uncut Text ^T To Spell
```

Figura 3.27: Configuración del archivo modules.

En la Tabla 3.4, se visualiza el procedimiento mediante comandos para la habilitación del RTC.

Comando	Descripción
pi@raspberrypi ~ \$ sudo nano /etc/modules	Dirección para abrir el archivo modules
i2c-bcm2708	Añadiendo controlador ARM
i2c-dev	Interactuar con interfaz I3C

Tabla 3.4: Habilitación de protocolo I2C.

Ahora se procede a la instalación de complementos de ic2-tools mediante el comando:

- pi@raspberrypi~ \$ sudo apt-get install i2c-tools

A continuación, se procede a verificar la comunicación de RTC usando el comando:

- pi@raspberrypi ~ \$ sudo i2cdetect -y 1

En la Figura 3.28, se obtiene una conexión exitosa del protocolo I2C.

```

pi@raspberrypi: ~
File Edit Tabs Help
0 upgraded, 0 newly installed, 0 to remove and 117 not upgraded.
pi@raspberrypi:~$ sudo apt-get install i2c-tools
Reading package lists... Done
Building dependency tree
Reading state information... Done
i2c-tools is already the newest version (4.1-1).
The following package was automatically installed and is no longer required:
  python-colorzero
Use 'sudo apt autoremove' to remove it.
0 upgraded, 0 newly installed, 0 to remove and 117 not upgraded.
pi@raspberrypi:~$ sudo raspi-config
pi@raspberrypi:~$ sudo nano /etc/modules
pi@raspberrypi:~$ sudo i2cdetect -y 1
 0  1  2  3  4  5  6  7  8  9  a  b  c  d  e  f
00:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
10:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
20:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
30:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
40:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
50:  --  --  --  --  --  --  --  57  --  --  --  --  --  --  --  --
60:  --  --  --  --  --  --  --  --  UU  --  --  --  --  --  --  --
70:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
pi@raspberrypi:~$

```

Figura 3.28: Conexión exitosa entre RTC y Raspberry.

Para la conexión del Gps utiliza el protocolo de comunicación UART mediante los pines Gpio 14 (pin 8 - TX) y Gpio 15 (pin 10 - Rx) esto para la obtención de Latitud, Longitud y Altitud. Se indica que se debe editar el archivo **cmdline.txt**. Ingreso a cmdline mediante terminal:

- pi@raspberrypi~ \$ sudo nano /boot/cmdline.txt

En el terminal de Raspberry se modifica el ttyAMA0 como se muestra en Figura 3.29.

```

dwc_otg.lpm_enable = 0 console = ttyama0, 115200 kgdboc = ttyama0, 115200 console = tty1 root = /dev/ -
mmcbk0p2 rootfstype=ext4 elevator=deadline rootwait
console = ttyama0, 115200 kgdboc = ttyama0, 115200
dwc_otg.lpm_enable=0 console=tty1 root=/dev/mmcbk0p2 rootfstype=ext4 elevator=deadline rootwait

```

Figura 3.29: Modificación de referencias ttyAMA0.

3.12. Configuración de RTC

Ahora en la Tabla 3.5, se muestra el siguiente paso, la habilitación el Rtc como super usuario (root).

Comando	Descripción
pi@raspberrypi ~ \$ sudo bash	Inicio como root
root@raspberrypi ~ # sudo modprobe rtc-ds1307	Carga del Rtc en Kernel
root@raspberrypi ~ # echo ds1307@i2c > /sys/class/i2c-adapter/i2c-0/new_device	Ingresamos al módulo como nuevo dispositivo I2C
root@raspberrypi ~ # sudo hwclock -r	Verificación de hora en RTC

Tabla 3.5: Habilitación de RTC

En la Figura 3.30, se detalla la fecha y hora proporcionada por el RTC mediante el sistema embebido, obteniendo una sincronización exitosa.

```

pi@raspberrypi:~ $ sudo nano /boot/config.txt
pi@raspberrypi:~ $ sudo apt-get remove fake-hwclock
Reading package lists... Done
Building dependency tree
Reading state information... Done
Package 'fake-hwclock' is not installed, so not removed
The following package was automatically installed and is no longer required:
  python-colorzero
Use 'sudo apt autoremove' to remove it.
0 upgraded, 0 newly installed, 0 to remove and 117 not upgraded.
pi@raspberrypi:~ $ sudo update-rc.d -f fake hwclock remove
usage: update-rc.d [-f] <basename> remove
       update-rc.d [-f] <basename> defaults
       update-rc.d [-f] <basename> defaults-disabled
       update-rc.d <basename> disable|enable [S|2|3|4|5]
       -f: force

The disable|enable API is not stable and might change in the future.
pi@raspberrypi:~ $ sudo nano /lib/udev/hwclock-set
pi@raspberrypi:~ $ sudo hwclock -D -r
hwclock: use --verbose, --debug has been deprecated.
2022-02-07 19:36:32.454750-05:00
pi@raspberrypi:~ $

```

Figura 3.30: Visualización de fecha y hora con RTC.

En este caso como es la primera vez que se utiliza el RTC, es necesario que nuestra tarjeta Raspberry este conectada al Internet actualizando de manera automática la fecha y hora, luego se debe ejecutar los siguientes comandos para el RTC detallado en la Tabla 3.6.

Comando	Descripción
root@raspberrypi ~ \$ sudo hwclock -w	Ajuste de reloj
root@raspberrypi ~ # sudo hwclock -r	Lectura de tiempo
root@raspberrypi ~ #sudo nano /etc/modules rtc-ds1307	Ingresamos al archivo modules Ingreso a RTC
root@raspberrypi ~ \$ sudo nano /etc/rc.local echo ds13070x68 > /sys/class/i2c-adapter/i2c-1/new_device	Agregar moduló en archivo rc.local Agregar linea en dispositivo
sudo hwclock -s	Estableciendo RTC en hora especificada

Tabla 3.6: Configuración de RTC

3.13. Programación del sistema embebido

Para el seguidor solar en un eje es necesario conocer coordenadas mediante Gps indicado cual es su longitud y latitud donde se encuentre trabajando, de igual forma se necesita un intervalo de tiempo de fecha y hora.

El prototipo a controlar se lo hace mediante un algoritmo de posicionamiento solar SPA para seguir la trayectoria del sol por medio de las variables descritas anteriormente.

3.14. Código fuente del sistema embebido

Ahora se procede a detallar el algoritmo implementado en el seguidor de un eje.

En la Figura 3.31, detalla el primer paso es importar las librerías de los elementos a utilizar.

```
# -*- coding: utf-8 -*-  
from soltrack import SolTrack  
import datetime as dt  
import Rpi_I2C_driver  
import time  
import serial  
import RPi.GPIO as GPIO
```

Figura 3.31: Librerías para el algoritmo del seguidor solar en python

En la Figura 3.32, se declara las variables de Greenwich (grados) y el hemisferio norte (grados).

```
geoLon = -078.505  
geoLat = -00.18  
Hour_pr= 15  
Min_pr= 45  
Sec_pr= 30  
count=0  
count_out=0
```

Figura 3.32: Variables con valores fijos para pruebas del seguidor solar.

El sistema de software obtiene el tiempo universal en formato fecha/hora detallado en la Figura 3.33, que en conjunto con las coordenadas geográficas son re alimentados al algoritmo de cálculo de posición solar

```
address = 0x68  
register = 0x00  
#sec min hour week day month year  
#NowTime = [0x00,0x37,0x17,0x04,  
0x27,0x02,0x22]  
w = ["Sun", "Mon", "Tues", "Wed",  
"Thur", "Fri", "Sat"];  
M = ["Ene", "Feb", "Mar", "Abr", "May",  
"Jun", "Jul", "Ago", "Sep", "Oct", "Nov", "Dic"];
```

Figura 3.33: Variables para el RTC.

Se emplea la lista de direcciones del protocolo I2C donde se conecta el RTC. Detalle de conexión del RTC en la Figura 3.34.

```

bus = smbus.SMBus(1)
ser=serial.Serial(
port='/dev/ttyAMA0',
baudrate=9600,
parity=serial.PARITY_NONE,
stopbits=serial.STOPBITS_ONE,
bytesize=serial.EIGHTBITS,
timeout=5
)

```

Figura 3.34: Habilitación del puerto para comunicación serial.

Ahora se proporciona acceso desde Python al driver I2C de Linux. En la Figura 3.35, se realiza la visualización longitud y latitud respectivamente mediante I2C.

```

mylcd = Rpi_I2C_driver.lcd()
def long_string(mylcd, text="", num_line=1, num_cols=16):
if len(text) > num_cols:
mylcd.lcd_display_string(text[:num_cols], num_line)
sleep(1)
for i in range(len(text) - num_cols + 1):
text_to_print = text[i:num_cols]
mylcd.lcd_display_string(text_to_print, num_line)
sleep(0.2)
sleep(1)
else:
mylcd.lcd_display_string(text, num_line)

```

Figura 3.35: Función para el display de la pantalla LCD, con texto desplazable.

Ademas, se crea la función para leer los valores obtenidos por el RTC, descrito en la Figura 3.36.

```

def ds3231ReadTime ():
returndata = bus.read_i2c_block_data (address, register,7)
return returndata

```

Figura 3.36: Función para leer los datos del RTC

Se habilitan los pines que controla el motor para el seguidor solar. La Figura 3.37, detalla los GPIO para el giro e inversión de giro del motor.

```

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
# Init list with pin numbers

#pinList = [18, 17, 27, 22]
pinList = [18, 17]

# Loop through pins and set mode and state to 'high'

for i in pinList:
    GPIO.setup(i, GPIO.OUT)
    GPIO.output(i, GPIO.LOW)

```

Figura 3.37: Habilitación pines GPIO.

Finalmente en la Figura 3.38, se obtiene el código principal para la obtención de datos de fecha, hora, longitud y latitud.

```

x=ser.readline ()
t = ds3231ReadTime ()
t[0] = t[0]&0x7F #sec
t[1] = t[1]&0x7F #min
t[2] = t[2]&0x3F #hour
t[3] = t[3]&0x07 #week
t[4] = t[4]&0x3F #day
t[5] = t[5]&0x1F #month
Year_string = hex(t[6]). lstrip("0x").rstrip("L")
Month_string = hex (t [5]). lstrip("0x").rstrip("L")
Date_string = hex(t [4]). lstrip("0x").rstrip("L")
if (t [2] == 0):
    Hour_string = 0
else:
    Hour_string = hex (t [2]). lstrip("0x").rstrip("L")
if (t [1] == 0):
    Minute_string = 0
else:
    Minute_string = hex (t [1]). lstrip("0x").rstrip("L")
if (t [0] == 0):
    Sec_string = 0
else:
    Sec_string = hex (t [0]). lstrip("0x").rstrip("L")
Year =2000+int (Year_string)
Month=0+int (Month_string)
Date=0+int (Date_string)
Hour=0+int (Hour_string)
Minute=0+int (Minute_string)
Sec=0+int((Sec_string))
time. Sleep (1)

```

Figura 3.38: Código de parámetros de fecha y hora.

De igual manera en la Figura 3.39, se obtiene los datos de longitud y latitud mediante Gps.


```

lat = x [1:6]
lat_dec=lat. decode('UTF-8')
coor_lat=x [7:17]
coor_lat_dec=coor_lat. decode('UTF-8')
coor_lon=x [20:31]
coor_lon_dec=coor_lon. decode('UTF-8')
if (lat_dec == 'GPGLL'):
    coor_lat_dec=coor_lat.decode('UTF-8')
    coor_lon_dec=coor_lon. decode('UTF-8')
    mylcd.lcd_clear ()
    long_string (mylcd,"LATITUD:""%r" %(coor_lat_dec), 1)
    long_string(mylcd,"LONGITUD:""%r" %(coor_lon_dec), 2)

```

Figura 3.39: Código de parámetros de longitud y latitud.

En la Figura 3.40, se obtiene las variables necesarias para el algoritmo del seguidor solar, se procede a declarar la función para calcular los parámetros deseados.

```

st = SolTrack (coor_lon_dec, coor_lat_dec, use Degrees=True)
St. setDateAndTime (Year, Month, Date, Hour, Minute, Sec)

# Computa la posición del sol:
st.computePosition()

# Computa la hora de salida y puesta del sol:
st.computeRiseSet()

```

Figura 3.40: Función para el cálculo de ángulos.

Finalmente, se establece los parámetros del motor detallado en la Figura 3.41, mismo que funcionan conjuntamente con el giroscopio para el seguimiento solar en el cual se estableció 4 casos dependiendo de la hora de inicio del panel.

```

if ((new_angle_noon >= -88) and (new_angle_noon <= -54) and (count_1==0) and (count==0)):
    GPIO.output(27, GPIO.HIGH)
    print ("ON")
    time. sleep (SleepTime4);
    GPIO.output(27, GPIO.LOW)
    print ("OFF")
    count=count+1
    count_1=count_1+1
if (new_angle_noon == -50) and (count_1==1) and (count==1):
    GPIO.output(27, GPIO.HIGH)
    print ("ON")
    time. sleep (SleepTimeL);
    GPIO.output(27, GPIO.LOW)
    print ("OFF")
    count=count+1
    count_1=count_1+1
if (new_angle_noon == -45) and (count_1==2) and (count==2):
    GPIO.output(27, GPIO.HIGH)
    print ("ON")
    time. sleep (SleepTimeL);
    GPIO.output(27, GPIO.LOW)
    print ("OFF")
    count=count+1
    count_1=count_1+1
if (new_angle_noon == -40) and (count_1==3) and (count==3):
    GPIO.output(27, GPIO.HIGH)
    print ("ON")
    time. sleep (SleepTimeL);
    GPIO.output(27, GPIO.LOW)
    print ("OFF")
    count=count+1
    count_1=count_1+1
if (new_angle_noon == -35) and (count_1==4) and (count==4):
    GPIO.output(27, GPIO.HIGH)
    print ("ON")
    time. sleep (SleepTimeL);
    GPIO.output(27, GPIO.LOW)
    print ("OFF")
    count=count+1
    count_1=count_1+1
if (new_angle_noon == -5) and (count_1==5) and (count==5):
    GPIO.output(17, GPIO.HIGH)
    print ("ON")
    time. sleep (SleepTimeL);

```

Figura 3.41: Parametrización para el giro del motor.

Capítulo 4

Resultados

En el capítulo 4, se desarrollará el análisis de los resultados del seguido solar automatizado mediante las pruebas de campo realizadas en la ciudad de Quito con el fin de corroborar el funcionamiento del algoritmo solar, así como su incremento en los parámetros como la corriente y la irradiancia en comparación de los paneles fijos.

4.1. Obtención de datos

4.1.1. Ubicación

Las pruebas se realizaron en la ciudad de Quito en el sector de Rumipamba en la dirección de Luis Algomedo y Mañosca en la cual se tiene las siguientes coordenadas como se observa en la Figura 4.1.

Latitud: -0.174618

Longitud: -78.496504

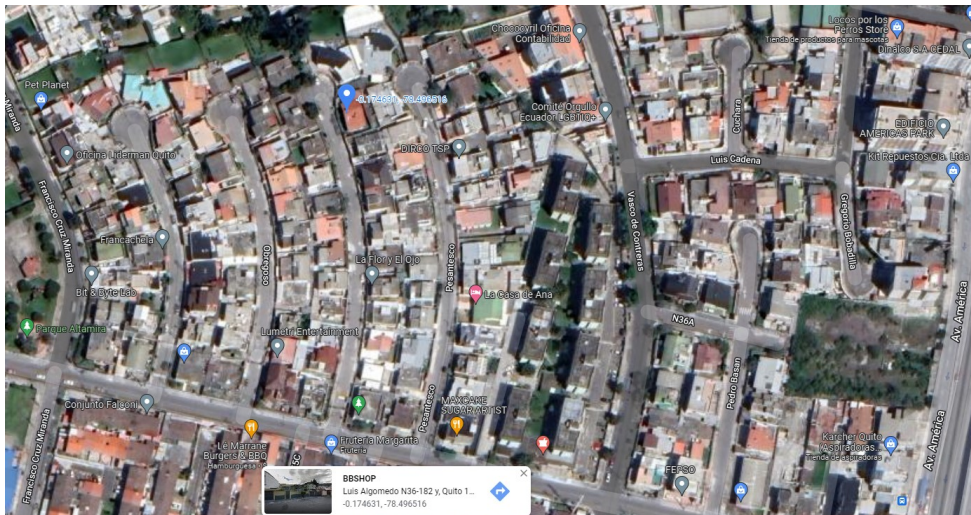


Figura 4.1: Captura satelital de la ubicación del seguidor solar.

De la misma manera en la Figura 4.2, el dispositivo GPS que se encuentra en el seguidor solar, obtiene los valores de longitud y latitud en el cual arroja los valores en grados, minutos y segundos y se hace la respectiva conversión para el uso en el algoritmo del seguidor solar. Los valores entregados por el seguidor solar son los siguientes:

Latitud: 0°10'48,01" S

Longitud: 78°29'78,81" W



```
Shell
2022/4/26 21:32:53 Tues
b'$GPGGA,023247.00,0010.48009,S,07829.78881,W,1,08,1.11,2863.3,M,13.8,M,,*62\r\n'
Localización: -78.505 W, -0.180 S
Día (UT): 2022-04-26
Tiempo (UT): 21:32:53.000000
JD: 2459696.39783564815
```

Figura 4.2: Datos obtenidos del GPS.

Se realiza la respectiva conversión de minutos y segundos a grados mediante la división de sus valores de 60 y 3600 respectivamente, por tanto, se obtiene los siguientes valores:

Latitud: -0.18

Longitud: -78.505

Se debe tomar en cuenta que las coordenadas son negativas ya que sus valores se encuentran al oeste del meridiano de Greenwich y al sur del hemisferio.

4.1.2. Tiempo de Operación

Es importante tomar en cuenta que el seguidor solar solamente tendrá un lapso de operación que específicamente será en la duración del día, por lo que es necesario el tiempo promedio estimado de la salida y puesta de sol en donde el seguidor solar estará en funcionamiento.

Mes	Amanecer	Puesta de sol	Duración del día
Enero	06:18 am	06:28 pm	12:10 h
Febrero	06:23 am	06:32 pm	12:09 h
Marzo	06:18 am	06:27 pm	12:09 h
Abril	06:09 am	06:18 pm	12:09 h
Mayo	06:06 am	06:14 pm	12:09 h
Junio	06:10 am	06:19 pm	12:09 h
Julio	06:15 am	06:24 pm	12:09 h
Agosto	06:14 am	06:22 pm	12:09 h
Septiembre	06:04 am	06:13 pm	12:09 h
Octubre	05:55 am	06:04 pm	12:09 h
Noviembre	05:53 am	06:03 pm	12:10 h
Diciembre	06:04 am	06:14 pm	12:10 h

Tabla 4.1: Duración de la puesta de sol en Quito.

Como se puede visualizar en la Tabla 4.1, el amanecer más tardío es en febrero a las 6:23 am y la puesta de sol más temprana es en noviembre a las 6:03 pm. Por tal motivo, se consideró las horas en las cuales el algoritmo del sistema embebido calculara la posición del sol para su funcionamiento en el cual se estableció un rango desde las 6 horas y 30 min hasta las 18 horas.

```

Shell
Dia (UT): 2022-04-26
Tiempo (UT): 21:32:53.000000
JD: 2459696.39783564815

```

Figura 4.3: Datos obtenidos del RTC.

Finalmente, como se puede observar en la Figura 4.3, los valores del día y la hora son obtenidos mediante el modulo RTC en el cual estos serán convertidos a fecha Juliana para el cálculo de los ángulos en el algoritmo SPA.

4.1.3. Valores del Algoritmo SPA

Para obtener los ángulos necesarios para el movimiento de los motores que seguirán la trayectoria del sol, se utilizan las ecuaciones antes mencionadas para el algoritmo SPA. Para ello en la Figura 4.4, se estableció dichas ecuaciones en el código del algoritmo de posicionamiento solar.

```

ha = agst + longitude - rightAscension # Local Hour Angle
azimuth = np.arctan2( sinHa, cosHa * sinLat - tanDec * cosLat ) # 0 <= azimuth < 2pi
sinAlt = sinLat * sinDec + cosLat * cosDec * cosHa # Sine of the altitude

```

Figura 4.4: Formulas del algoritmo del seguidor solar.

Estos parámetros fueron analizados en el periodo de tiempo antes establecido y para ello se realizaron varias pruebas en el mes de abril, específicamente el 11 de abril del 2022.

Algoritmo SPA				
HORA	AZIMUT	ALTITUD	ANGULO HORA	DECLINACION
6:31:25	87.36	-70,19	-167,27	8,72
7:00:05	87.1	-65,89	-168,73	8,69
7:30:35	85.82	-60,115	-160,37	8,7
8:00:53	83.16	-54,68	-152,844	8,71
8:29:43	80.85	-48,22	-146,30	8,71
9:02:34	78.25	-41,54	-138,69	8,75
9:29:42	77.2	-34,36	-130,80	8,74
10:01:29	74.33	-27,37	-123,49	8,73
10:32:44	72.5	-18,90	-114,10	8,73
11:01:01	68.3	-13,31	-108,76	8,74
11:32:16	60.31	-5,87	-101,01	8,39
12:01:15	31.3	1,57	-93,43	8,84
12:31:31	-27.43	8,64	-86,16	8,80
13:00:07	-55.11	20,94	-73,51	8,44
13:30:06	-72.77	23,19	-71,22	8,44
14:00:39	-73.43	32,27	-61,97	8,45
14:30:00	-77.17	40,80	-53,28	8,46
15:01:03	-80,81	49,41	-44,48	8,46
15:31:59	-81.31	52,32	-41,56	8,47
16:01:39	-82,53	60,09	-33,70	8,84
16:30:18	-83,75	67,69	-25,97	8,84
17:00:00	-84,77	74,84	-18,63	8,48
17:30:57	-85,84	83,18	-9,96	8,49
18:00:29	-86.26	87,69	-4,68	8,50

Tabla 4.2: Parámetros obtenidos del seguidor solar en todo un día.

Como se puede observar en la Tabla 4.2, los parámetros obtenidos son aproximadamente cada 30 min, de lo cual se observa que los ángulos llegan a tener una tendencia de comportamiento. Para validar dichos valores obtenidos, se los comparo con calculadoras solares que se encuentran disponibles en la red de internet tales como: suncalc.org detallado en la Figura 4.5, y solartopo.com descrito en la Figura 4.6 ya que miden con precisión la posición del sol.

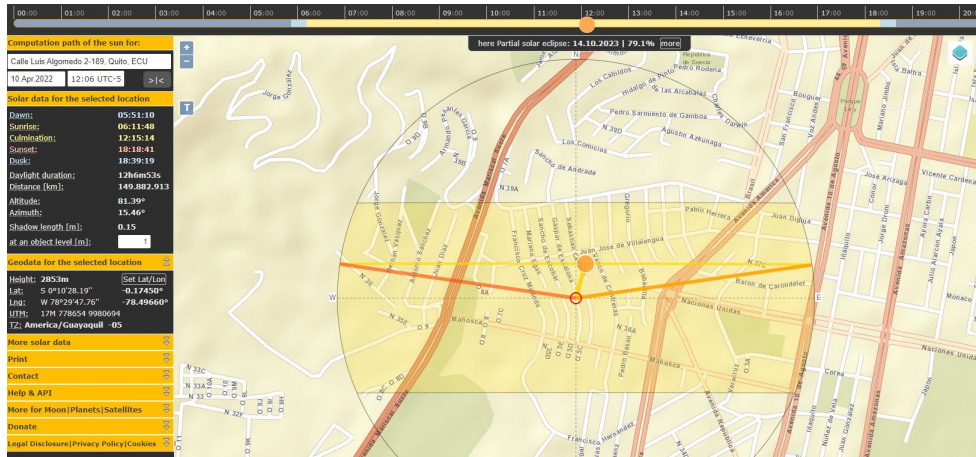


Figura 4.5: Calculadora solar (suncalc.org).

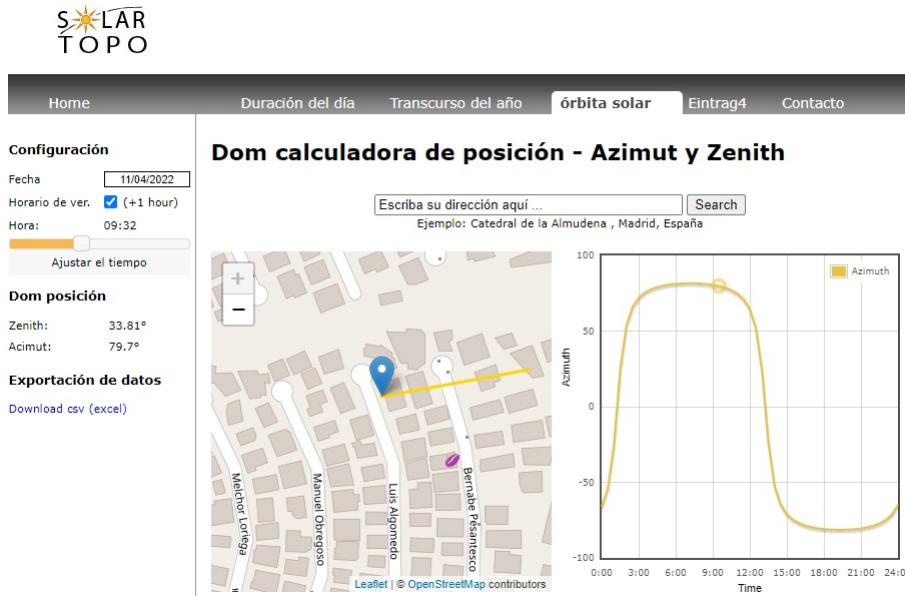


Figura 4.6: Calculadora Dom (solartopo.com).

Es importante tomar en cuenta que los valores obtenidos con respecto al tiempo tienen una variación de ± 3 min debido a que los datos en el seguidor solar no fueron obtenidos en el tiempo exacto y que Dom calculadora solo permite ingresar intervalos de tiempo de 4 min.

$\pm 3 \text{ min}$	SPA		CALCULADORA SUN		CALCULADORA DOM	
HORA	AZIMUT	ELEVACIÓN	AZIMUT	ELEVACIÓN	AZIMUT	ELEVACIÓN
6:30:00	87.36	3,73	83,43	3,57	81,56	3,7
7:00:00	87.1	11,27	83,3	10,89	81,33	11,3
7:30:00	85.82	19,63	83,03	18,3	81	19,29
8:00:00	83.16	27,16	82,70	25,73	80,51	26,19
8:30:00	80.85	33,70	82,15	33,15	79,80	33,80
9:00:00	78.25	41,31	81,17	40,57	78,47	41,66
9:30:00	77.2	49,20	79,94	47,96	76,80	48,99
10:00:00	74.33	56,51	78,09	55,33	75,00	54,56
10:30:00	72.5	63,90	75,17	62,62	70,87	62,69
11:00:00	68.3	71,24	70,03	69,78	64,29	69,63
11:30:00	60.31	77,99	59,34	76,59	53,31	76,20
12:00:00	31.3	84,57	30,86	82,07	29,02	83,57
12:30:00	-27.43	84,16	-26,51	82,38	-21,70	83,56
13:00:00	-55.11	78,51	-57,75	77,15	-52,84	76,69
13:30:00	-72.77	71,22	-69,28	70,40	-65,47	69,47
14:00:00	-73.43	62,97	-74,71	63,26	-70,55	62,90
14:30:00	-77.17	54,28	-77,76	55,97	-74,66	55,27
15:00:00	-80.81	47,48	-79,67	48,61	-77,04	47,75
15:30:00	-81.31	41,56	-80,94	41,22	-78,63	40,17
16:00:00	-82.53	33,70	-81,82	33,81	-79,71	32,57
16:30:00	-83,75	25,97	-82,43	26,39	-80,37	26,17
17:00:00	-84,77	18,63	-82,85	18,96	-80,89	18,78
17:30:00	-85,84	10,96	-83,11	11,55	-81,24	10,43
18:00:00	-86.26	4,68	-83,25	4,21	-81,38	4,35

Tabla 4.3: Ángulos de elevación y azimutal del seguidor solar y otras calculadoras solares.

Se puede corroborar en la Tabla 4.3, que los valores obtenidos en el algoritmo de posicionamiento solar de los ángulos azimut y elevación tienen valores similares a las calculadoras ya existentes.

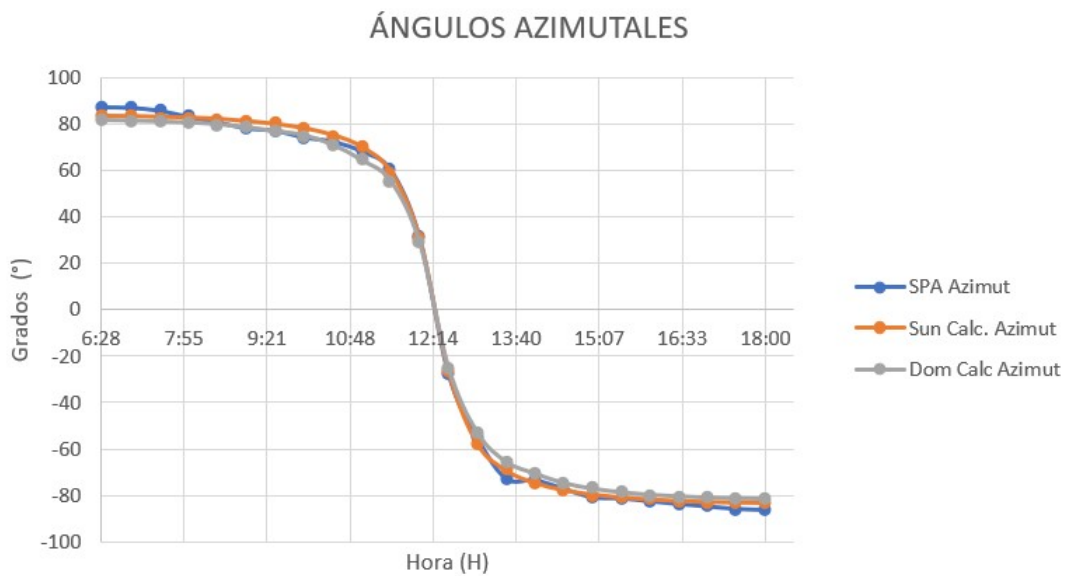


Figura 4.7: Tendencia del ángulo azimutal.

En la Figura 4.7, se puede observar que el ángulo azimut tiene el comportamiento de una función decreciente, esto se debe a que el ángulo azimut es la dirección de donde proviene la luz del sol. Es decir, cuando el sol sale por el hemisferio este, el ángulo llega a tener un valor cerca a los 90 grados, cuando sea medio día el ángulo azimut estará con dirección Norte por lo que marcara un valor de cero. Finalmente, cuando llegue la puesta de sol por el hemisferio oeste el ángulo azimut tendrá un valor de -90 grados o de 270 grados dependiendo del autor.

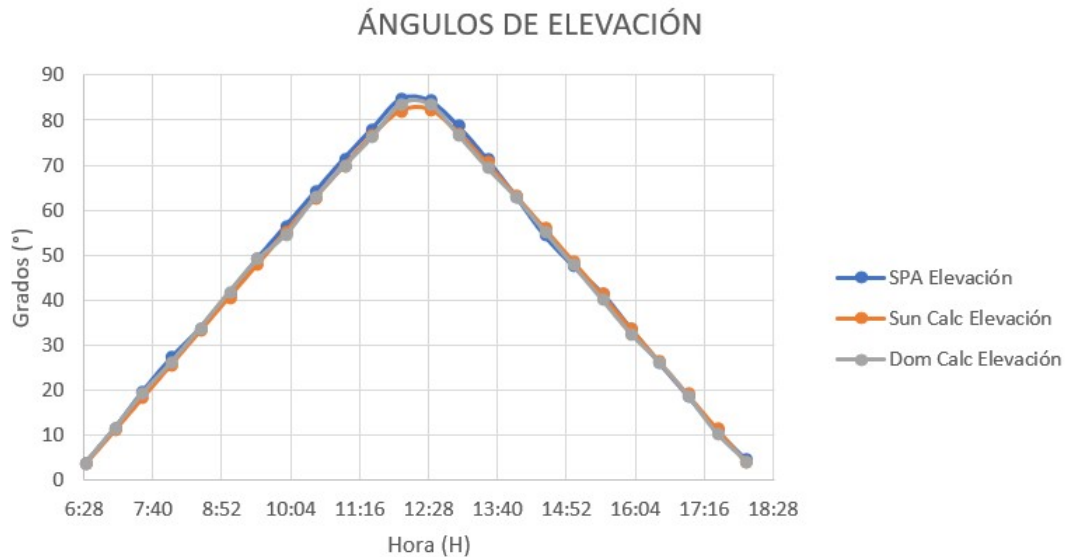


Figura 4.8: Tendencia del ángulo de elevación.

En la Figura 4.8, se puede observar el comportamiento del ángulo de elevación en el cual el pico más alto se lo va a encontrar al medio día, esto se debe a que es la altura angular del sol en el cielo medido desde la horizontal. Es importante tomar en cuenta que este parámetro será el encargado de indicar la rotación horizontal del seguidor solar.

De manera general, el sistema de seguidor solar produce un error promedio del 3% en los ángulos azimut y de elevación con respecto a los algoritmos de Dom calculadora (Solar Topo, 2015), Calculadora Solar (LRPS, 2011) debido a varios factores tales como; resolución de decimales y tiempo. Es importante señalar que el margen de error por la resolución de decimales en los parámetros de entrada se los puede atribuir a los puntos GPS de Latitud y Longitud o los resultados de los ángulos calculados por los sistemas de seguimiento. Por otro lado, el margen de error con respecto al tiempo se debe a los ± 3 min de los datos obtenidos en el seguidor solar.

ERROR ÁNGULOS AZIMUTALES

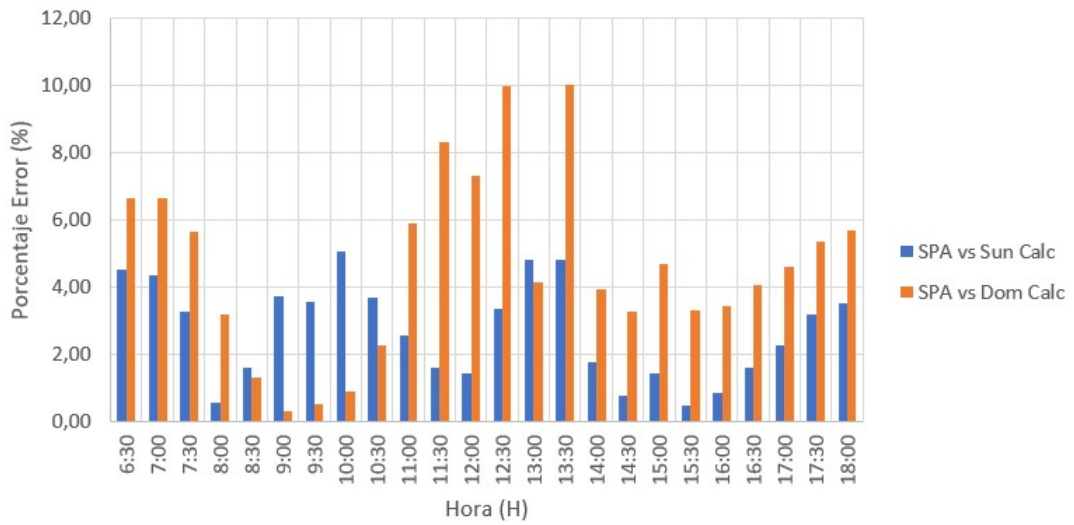


Figura 4.9: Porcentaje de error del ángulo azimutal.

ERROR ÁNGULOS DE ELEVACIÓN

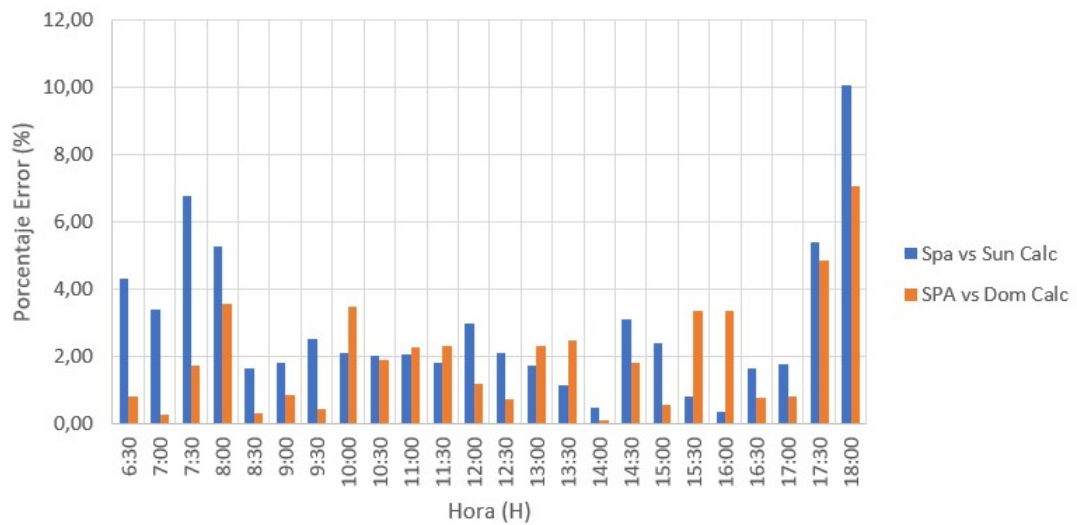


Figura 4.10: Porcentaje de error del ángulo de elevación.

Los resultados mostrados en las Figuras 4.9, y 4.10, muestran el porcentaje de error de los ángulos de posición del Sol referente a los resultados obtenidos en las pruebas. Estas gráficas dan una idea del funcionamiento y efectividad del algoritmo del seguidor solar con respecto a otros algoritmos astronómicos ya existentes o de otros seguidores solares que se ven afectados por las condiciones climáticas que se presentan durante el año.

4.1.4. Pruebas con algoritmo SPA

Como se observa en las Figuras 4.11, 4.12, 4.13, se realiza pruebas de funcionamiento mediante el algoritmo SPA teniendo una orientación del seguidor como en la mañana, mediodía y tarde respectivamente.

Finalmente, el ángulo de elevación será el dato que se tomará en cuenta para la rotación del seguidor solar en la cual el eje horizontal tiene un eje de libertad rotacional de aproximadamente 120 grados.

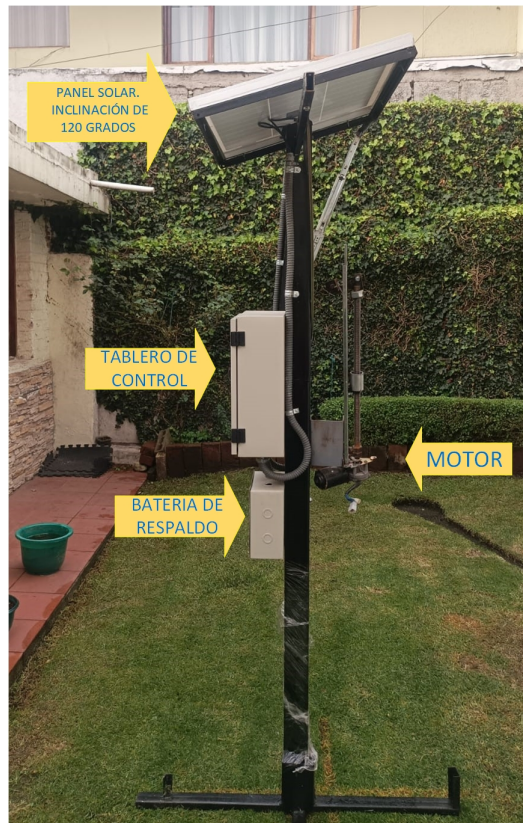


Figura 4.11: Orientación del seguidor en la mañana.

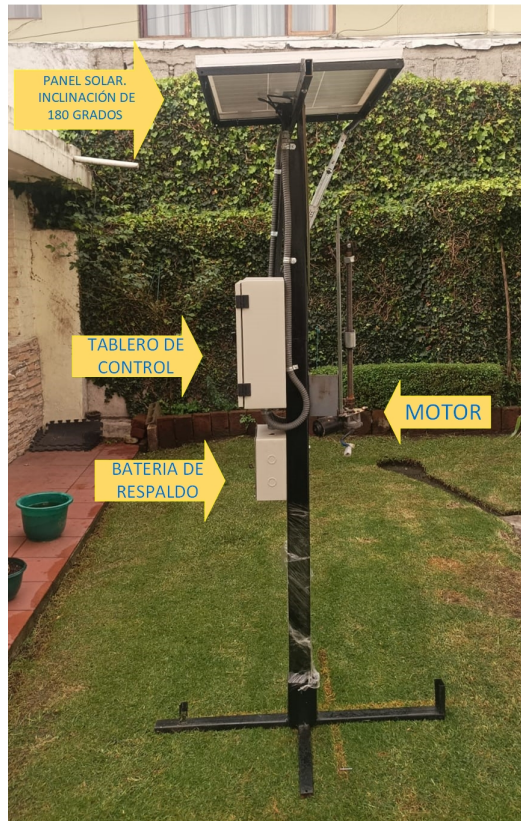


Figura 4.12: Orientación del seguidor al mediodía.

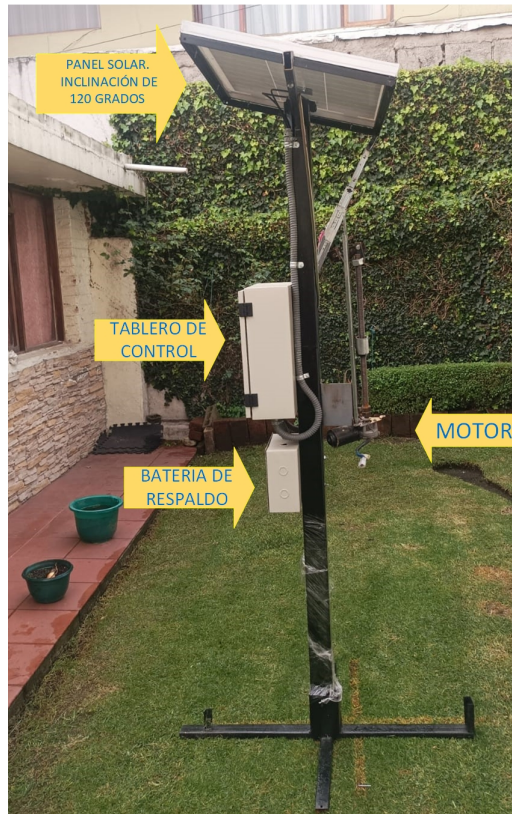


Figura 4.13: Orientación del seguidor en la tarde.

Es importante recalcar que la inclinación máxima de rotación del panel foto voltaico se mantiene de 7 a 9 de la mañana y desde las 16 a 18 horas, esto se debe a que el ángulo en estos tiempos es inferior al grado de giro del seguidor solar, por lo que en estos intervalos de tiempo el angulo de inclinación sera el máximo permitido.

4.1.5. Pruebas con panel solar fijo

De la misma manera, se compara los valores del seguidor solar con el mismo panel pero en este caso fijo. Para ello, se necesita conocer el ángulo de inclinación óptimo para paneles fijos y así poder realizar la comparativa en ambos casos. Para el calculo del angulo se lo determino mediante:

$$\alpha = 3,7 \pm 0,69 \cdot (\beta)[\text{grados}] \quad (4.1)$$

Donde:

α =ángulo de inclinación óptimo

β =latitud del lugar=-0,18 grados

Luego:

$$\alpha = 3,7 \pm 0,69 \cdot (0,18)[\text{grados}]$$

$$\alpha = 3,82 \approx 4 \text{grados}$$

Se observa que el ángulo es pequeño debido a la cercanía a la línea equinoccial, entonces se lo redondeara en 5 grados para fines prácticos.



Figura 4.14: Panel Solar fijo.

En este caso se comparará los valores obtenidos del panel solar fijo como el móvil como se evidencia en la Tabla 4.4, en el cual se busca determinar su voltaje y corriente cuando esta sin una carga.

Hora	Panel Solar fijo		Seguidor Solar		Porcentaje Mejora (%)
	Voltaje sin carga (V)	Corriente Panel (A)	Voltaje sin carga (V)	Corriente Panel (A)	
7:00	11,5	0,1	12	0,19	90
7:30	11,7	0,21	12,5	0,25	19
8:00	12,4	0,34	13,2	0,42	23
8:30	12,2	0,51	14,4	0,63	25
9:00	12,3	0,72	14,1	0,9	21
9:30	12,1	1,15	13,9	1,39	15
10:00	12	1,55	14,2	1,97	7
10:30	12,8	2,15	14,4	2,45	5
11:00	12,8	2,31	14,3	2,41	8
11:30	12,9	0,22	13,8	0,34	55
12:00	12,8	0,27	13,9	0,42	55
12:30	12,9	0,55	13,8	0,65	15
13:00	13,1	0,45	13,9	0,78	25
13:30	13,1	0,57	13,3	0,66	23
14:00	13,1	0,43	13,6	0,71	44
14:30	13	0,29	13,9	0,53	56
15:00	12,8	0,25	13,6	0,42	40
15:30	12,6	0,25	13,9	0,39	57
16:00	12,5	0,25	13,3	0,35	55
16:30	12,4	0,21	13,7	0,33	41
17:00	12,3	0,2	13	0,31	60
17:30	12,2	0,15	12,5	0,25	56
18:00	12,2	0,11	12,3	0,15	62

Tabla 4.4: Datos de Voltaje y corriente del seguidor Solar y el panel fijo.

Por otro lado, se determina los valores obtenidos cuando se tiene una carga conectada al seguidor solar.

Hora	Panel Solar fijo		Seguidor Solar		Porcentaje Mejora (%)
	Voltaje con carga(V)	Corriente Panel (V)	Voltaje con carga(V)	Corriente Panel (V)	
7:00	10,8	0,13	11,1	0,21	46
7:30	11,1	0,25	11,5	0,32	8
8:00	11,5	0,38	12,4	0,5	18
8:30	11,9	0,57	12,9	0,77	18
9:00	11,8	0,8	12,8	0,99	16
9:30	11,6	1,25	12,5	1,61	13
10:00	11,7	1,56	12,8	1,77	7
10:30	11,9	1,92	12,9	1,99	4
11:00	11,9	2,3	12,9	2,42	5
11:30	11,6	2,26	12,6	2,5	11
12:00	11,8	2,31	12,6	2,38	3
12:30	11,1	0,1	12,2	0,1	0
13:00	12,2	0,12	13,2	0,1	17
13:30	12,2	0,22	12,6	0,23	5
14:00	12,3	0,27	12,4	0,29	7
14:30	12,9	0,45	13,2	0,55	22
15:00	11,8	0,45	12,8	0,47	4
15:30	11,6	0,57	13,2	0,59	4
16:00	11,5	0,43	12,5	0,55	16
16:30	11,6	0,29	12,7	0,41	41
17:00	11,3	0,25	12	0,45	60
17:30	11,2	0,25	11,8	0,39	56
18:00	10,8	0,21	11,6	0,34	62

Tabla 4.5: Datos de Voltaje y corriente del seguidor Solar y el panel fijo

Como se puede visualizar en las Tablas 4.4 y 4.5, se obtiene un promedio del 31 % aproximadamente en la generación de energía a comparación del panel fijo.

4.2. Análisis y Resultados

El mejoramiento en la generación de energía obtenidos en el seguidor solar se debe a los siguientes factores:

1.- El software: En este caso el lenguaje de programación utilizado fue Python ya que dentro de ella se encuentra específicamente una librería que permitiría el cálculo de los ángulos de hora y azimut, mismo que son necesarios para la orientación del panel para que se mantenga siempre perpendicular al sol mediante la rotación del eje. Además, el Python es un lenguaje de programación de código abierto, por lo que es uno de los lenguajes de programación mas usados en el ámbito académico y científico, que en este caso facilito el análisis y la automatización de los datos obtenidos para poder seguir la trayectoria del sol.

2.- Componentes: En este caso para la que el logaritmo pueda calcular el ángulo de posición del sol, necesita de ciertos parámetros de entrada que son la hora, fecha, latitud y longitud. Para la fecha y hora se utilizó el reloj en tiempo real (RTC) que ayuda en el caso de que el sistema embebido tenga alguna desconfiguración con respecto al tiempo. Por otro lado, para la ubicación del seguidor solar se utilizo un sistema de posicionamiento global (GPS) en el cual los datos obtenidos son en formato de la asociación nacional electrónica de la marina (NMEA) que serían en grados minutos y segundos, por lo que se tendría que hacer la respectiva conversión a solo grados para así poder utilizarlo en el algoritmo de posicionamiento solar. Finalmente, para que el panel siempre se encuentre de manera perpendicular al sol, se estableció un giroscopio que trabaja como una retroalimentación de la posición del panel para indicar los límites de rotación del motor ya que no se tienen control sobre ellos.

3.- Algoritmo: es importante tomar en cuenta que el cálculo de los ángulos de elevación y azimut tiene un pequeño margen de error debido a factores externos como el rango de error que puede presentar el GPS o debido a la cantidad de decimales que se utilizan para la obtención de los resultados; sin embargo, el algoritmo demostró tener un mejoramiento en la obtención de energía, ya que este siempre buscara estar perpendicular al sol y no se verá afectado por sombras que se puedan producir por el ambiente externo o por un clima nublado o lluvioso. Debido a estos factores, la hipótesis planteada al inicio de este proyecto fue positiva ya que se puede identificar una mejora en la generación de energía eléctrica en las Tablas 4.4 y 4.5 del 31 % y 25 % respectivamente; es decir, que los seguidores solares logran aprovechar de una mejor manera la recolección de energía a través de paneles fotovoltaicos y con ello se puede recolectar y almacenar de una manera más rápida en bancos de batería. Esto, se comprobó con las pruebas realizadas ya que se pudo identificar que cuando el panel esta móvil logra llenar la batería de 12V y 7Ah en un tiempo menor de 2 horas aproximadamente.

Con estos resultados se puede observar que la implementación de un seguidor solar foto voltaico puede suplir y cubrir la necesidad de la demanda donde quiera ser implementando, ya que el consumo promedio de una vivienda residencial con un área entre 100 y 130 m², es de 226,25 [kWh/mes] y con un panel solar de 500

W puede llegar a producir dicha cantidad ya que no solamente estaría cubriendo las 6 horas de radiación perpendicular que produce un panel fijo, si no se tendrá un total de 12 horas de radiación perpendicular. Es por ello, que la idea de usar un método de seguimiento solar mediante un algoritmo se ha vuelto estéticamente atractivo ya que este representaría un ahorro económico de aproximadamente de la mitad de la tarifa de consumo; en otras palabras, si el panel fijo genera un total de 9 KWh/ mes, el seguidor solar generará un valor aproximado de 18 KWh/mes, por lo que se obtiene un ahorro de 9 dólares aproximadamente. Es importante recalcar que este seguidor funcionaria independientemente del clima y se volvería progresivamente rentable para implementaciones a gran escala ya que la demanda energética va en aumento.

4.- Los valores de mejora en la recolección de energía se reflejan en la Tabla 4.6, de una manera positiva ya que logra alcanzar valores similares a los que se encuentran actualmente en el mercado, tales como los sistemas de traqueo de Good Future Solar, SOLARMAT, SOLTIGUA.

Seguidor Solar	Precio (\$)	Captación solar (%)
SEGUIDOR SPA ALGORITHM	804,7	30 %
SOLARMAT COMPANY	1.875	35 %
GOOD FUTURE SOLAR	5.495	40 %
SOLTIGUA	2.195	25 %

Tabla 4.6: Costo de seguidores solares en el mercado.

En este caso, se puede evidenciar la variación de los precios de los seguidores solares debido a los sensores de alta precisión que estos sistemas utilizan tales como SOLAR MEMS ISS-T60 que es un dispositivo para la referencia del posicionamiento solar y su precio varía entre los 400 a 500 dólares. Estos sensores permiten a los sistemas ya existentes en el mercado a obtener un margen de error mínimo del 1 %, a diferencia del Seguidor SPA que logro un margen de error del 3 al 5 % aproximadamente. Sin embargo, la mejora obtenida en la generación de energía del seguidor solar es similar a los ya existentes en el mercado por lo que se convertiría en una solución rentable.

5.- Como resultado del presente proyecto, se utiliza los dispositivos necesarios para el desarrollo del algoritmo de posicionamiento solar, el objetivo del sistema, es que no esté basado en sensores que pueden afectar en el rendimiento del prototipo. La mayor ventaja con respecto al algoritmo de posicionamiento solar es cuando sigue la trayectoria del sol aun cuando no se encuentra visible por las condiciones atmosféricas y climáticas. Por ejemplo, de acuerdo con el trabajo de (Tanvir arrafat, Khan Shahrear Tanzil), usan fotoresistencias como sensores de luz, en el cual, cuando el cielo se encuentre nublado habrá una mayor diferencia de voltaje, por lo que puede presentar un pequeño margen de error en el seguimiento del sol por lo que llegaría a obtener un valor de mejora en la recolección de energía del 18 por ciento aproximadamente.

Por otra parte, de acuerdo con (Mohanapriya y Manimegalai) en su artículo, un seguidor solar de dos ejes tendrá una mejora del 6 al 7 por ciento con respecto a los seguidores de un solo eje. En otras palabras, la mejora en la generación de

energía en seguidores solares mediante el algoritmo SPA es de 5 por ciento más, a diferencia del seguidor solar con el uso de sensores, por lo que esto lo convierte en una técnica viable y económicamente rentable para líneas de incursión o investigación. Inclusive la precisión de traqueo del sol mediante el algoritmo SPA, se lo puede comparar con sensores de precisión que se encuentran en el mercado y tienen un margen de precisión del 1 por ciento como SOLAR MEMS ISS-T60 que es un dispositivo para la referencia del posicionamiento solar. Sin embargo, estos sensores de alta precisión tienen costos altamente elevados por lo que los sistemas en el mercado tales como Good Future Solar, SOLARMAT, SOLTIGUA presentan precios elevados a comparación del seguidor solar por algoritmo.

4.3. Conclusiones

Mediante las pruebas en el seguidor solar se puede definir que existe una mejora en cuanto a la captación de energía solar en un 30% respecto a los paneles fijos en un periodo de 11 horas aproximadamente, esto se debe a que el panel fotovoltaico se mantiene en su mayoría en una orientación perpendicular con respecto al sol, esto quiere decir que el panel adapta su ángulo de elevación con el fin de obtener una mayor captación para la generación de energía. Indirectamente, genera beneficios económicos, ambientales y otros.

Para llevar a cabo el proyecto, fue necesario la adquisición de datos para el ángulo azimut y el ángulo de elevación tienen un margen de error aceptable 3% por lo que, satisface las necesidades para la determinación del posicionamiento del sol, este error comúnmente se da debido a factores externos como decimales, o tomas de datos en tiempos inexactos.

Las ecuaciones utilizadas para determinar la trayectoria aparente del sol, permitieron desarrollar el prototipo de seguimiento solar, garantizando así el funcionamiento del sistema ya que es independiente de factores externos que puedan afectar a su funcionamiento tales como el clima o lugar de ubicación.

Las pruebas realizadas al seguidor solar a comparación del sistema fijo permitieron obtener un panorama general del mejoramiento en la generación de energía eléctrica dando así un valor aproximado del 30 por ciento, y con ello poder generar casi el doble de KWh debido a que el seguidor solar logra obtener un total de 12 horas de luz perpendicular generando así beneficios económicos y del medio ambiente.

Otra ventaja de utilizar el algoritmo SPA, es que trabaja en código abierto y puede ser implementados en cualquier sistema embebido, teniendo en cuenta, que la fabricación del seguidor en un eje tiene un costo reducido en comparación de los seguidores existentes en el mercado ayudando a utilización de energía renovables en el Ecuador.

Bibliografía

- S. Abdallah and S. Nijmeh. Two axes sun tracking system with plc control. *Energy conversion and management*, 45(11-12):1931–1939, 2004.
- J. F. Agila Díaz and L. A. Landázuri Ayala. Diseño y construcción de un sistema de rastreo solar biaxial para generación de 600 wh de energía eléctrica. B.S. thesis, 2021.
- C. M. Alarcón Aguirre and C. D. López Estévez. Desarrollo e implementación del control de un seguidor solar de un eje con estrategias de posicionamiento para paneles fotovoltaicos en la ciudad de quito. B.S. thesis, Quito, 2019., 2019.
- V. Archer. Epidemiologic studies of lung disease among miners exposed to increased levels of radon daughters. In *Health implications of new energy technologies*. 1980.
- S. V. Arpi Puga and B. G. Prado Bermeo. Diseño de un seguidor solar de doble eje para un sistema de energía fotovoltaica en el centro de salud de la comunidad de yaapi. B.S. thesis, 2022.
- D. J. Arrieta Morelo, S. Y. Puello Bravo, et al. Diseño y construcción de un seguidor solar para aumentar el rendimiento energético en paneles fotovoltaicos de un sistema de bombeo. 2018.
- A. M. Caluña Tisalema and A. R. Jordán Vargas. Diseño e implementación de un sistema de monitoreo climatológico vía gprs y automatización de la calibración del anillo del piranómetro en la estación meteorológica espoach. B.S. thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2017.
- h.-t. Conecel. Atlas solar del ecuador. 2008.
- K. B. De Melo, M. Kitayama, L. R. Tavares, H. A. de Freitas, and M. G. Villalva. Accuracy analysis of sun position calculation algorithms: Ineichen and spa. In *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America)*, pages 1–5. IEEE, 2019.
- M. Engin and D. Engin. Sun tracking control strategy for improved reliability and performance. In *2012 5th European DSP Education and Research Conference (EDERC)*, pages 85–89. IEEE, 2012.
- R. Fonseca and A. Rachel. La capacidad de las fuentes renovables de energía para el desarrollo local de la provincia de holguín: una mirada. B.S. thesis, Universidad de Holguín, Facultad de Ciencias Empresariales y Administración . . . , 2019.

- K. P. Franco Pallo. Análisis comparativo de radiación solar vs. actividad solar en quito y sus efectos sobre la salud en el período 2007-2016. B.S. thesis, 2017.
- A. Garmendia Gutiérrez et al. Estudio del módulo heltec cubecell-gps para aplicaciones de localización y monitorización remota de sensores. 2021.
- D. H. G. Gutiérrez and V. E. R. Chávez. Implementación de seguidor solar en dos ejes para el sistema fotovoltaico de la escuela de ingeniería eléctrica de la ues. *Universidad de El Salvador*, 2012.
- D. Hoyos, M. Villena, V. H. Serrano, F. Farfán, C. Cadena, and T. Moya. Controlador de carga para un sistema fotovoltaico aislado. In *Congreso Argentino de Sistemas Embebidos*, pages 158–162, 2011.
- C. Jamroen, P. Komkum, S. Kohsri, W. Himananto, S. Panupintu, and S. Unkat. A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design: Design and implementation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37: 100618, 2020.
- L. Lamm and L. LO. A new analytic expression for the equation of time. 1981.
- A. MARTÍNEZ JIMÉNEZ. *Dimensionado de instalaciones solares fotovoltaicas*. Editorial Paraninfo, 2012.
- J. J. Michalsky. The astronomical almanac’s algorithm for approximate solar position (1950–2050). *Solar energy*, 40(3):227–235, 1988.
- L. Milea, M. Dascalu, O. Oltu, and A. Zafiu. Two axes detector for photovoltaic panels’ automatic full angle orientation. In *CAS 2010 Proceedings (International Semiconductor Conference)*, volume 1, pages 125–128. IEEE, 2010.
- A. T. Morales. Adaptación de algoritmo de posicionamiento solar embebido con aplicación en energía solar. 2019.
- E. K. Mpodi, Z. Tjiparuro, and O. Matsebe. Review of dual axis solar tracking and development of its functional model. *Procedia Manufacturing*, 35:580–588, 2019.
- A.-R. Nadia, N. A. M. Isa, and M. K. M. Desa. Efficient single and dual axis solar tracking system controllers based on adaptive neural fuzzy inference system. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 32(7):459–469, 2020.
- P. M. Nogales. Representación grafica de la posición solar y una superficie dada para la ciudad de cochabamba-bolivia.
- C. D. Ochoa Malhaber and I. D. Ortega Romero. Diseño e implementación de un sistema fotovoltaico modular aplicado a la iluminación ornamental en la ciudad de cuenca. B.S. thesis, 2021.
- H. Peng, T. Du, and W. Gu. Application design of a sun-tracking system. In *2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, pages 5094–5098. IEEE, 2013.

- C. Pitman and L. Vant-Hull. Errors in locating the sun and their effect on solar intensity predictions. In *Meeting of the American Section of the International Solar Energy Society, Denver*, volume 28, pages 701–706, 1978.
- M. Sidek, W. Hasan, M. A. Kadir, S. Shafie, M. A. M. Radzi, S. Ahmad, and M. H. Marhaban. Gps based portable dual-axis solar tracking system using astronomical equation. In *2014 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, pages 245–249. IEEE, 2014.
- J. R. Spencer, L. A. Lebofsky, and M. V. Sykes. Systematic biases in radiometric diameter determinations. *Icarus*, 78(2):337–354, 1989.
- R. A. Tapia Cruz. Diseño análisis y simulación de un prototipo de soporte mecánico con dos grados de libertad para posicionamiento perpendicular a la luz de un panel fotovoltaico de 100 w. B.S. thesis, 2018.
- D. Vaca Revelo and F. Ordóñez. *Mapa Solar del Ecuador 2019*. 01 2020. ISBN 978-9978-383-56-8.
- M. M. Vallina, I. S. Fotovoltaicas, and M. Madrid. Ediciones paraninfo, 2010.
- P. Vásquez, J. Cepeda, D. Echeverría, and V. Ramos. Diagnóstico situacional para la implementación de un proceso de gestión de conocimiento en el operador nacional de electricidad cenace. *Revista Técnica energía*, 13(1):222–232, 2017.
- R. Walraven. Calculating the position of the sun. *Solar energy*, 20(5):393–397, 1978.