

Dirección de Área de Conocimiento Industria y Producción

Implementación de un prototipo de sistema fotovoltaico con control de seguimiento solar con doble eje para paneles fotovoltaicos de 100W, como estrategia de aprendizaje para carrera de ingeniería Eléctrica

Trabajo Monográfico para optar al título de
Ingeniero Eléctrico

Elaborado por

Br. Allison Dennise Badilla Pineda
Carnet: 2017-0193S

Tutor:

Dr. Napoleón Vicente Blanco Orozco

19 de diciembre de 2025
Managua, Nicaragua



Dirección de Área
de Conocimiento
Industria y Producción

SECRETARIA DE ÁREA ACADÉMICA

F-8: CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA

El Suscrito Secretario del **AREA DE CONOCIMIENTO INDUSTRIA Y PRODUCCIÓN** hace constar que:

BADILLA PINEDA ALLISON DENNISE

Carné: **2017-0193S** Turno: **Nocturno** Plan de Asignatura: **2015** de conformidad con el Reglamento Académico vigente en la Universidad, ha aprobado todas las asignaturas correspondientes a la carrera de **INGENIERÍA ELECTRICA**, en el año 2023 y solo tiene pendiente la realización de una de las formas de culminación de estudio.

Se extiende la presente **CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA**, a solicitud del interesado en la ciudad de Managua, a los catorce días del mes de agosto del año dos mil veinte y cinco.

Atentamente,

Msc. Arlen Patricia Reyes Gomez
SECRETARIO DE ÁREA ACADÉMICA



Móvil: (505) 2251 8276



Recinto Universitario Pedro Aráuz Palacios
Costado Sur de Villa Progreso.
Managua, Nicaragua.





Dirección de Área
de Conocimiento
Industria y Producción

Managua, 03 de febrero de 2025

Bachiller
Allison Dennise Badilla Pineda

Estimado Bachiller:

Es de mi agrado informarle que el PROTOCOLO de su tema monográfico, titulado. **Implementación de un prototipo de sistema fotovoltaico con control de seguimiento solar con doble eje para paneles fotovoltaicos de 100W, como estrategia de aprendizaje para carrera de ingeniería Eléctrica.** Para optar al título de Ingeniería Eléctrica Ha sido aprobado por esta Dirección.

Asimismo, le comunico estar totalmente de acuerdo, con la tutoría del **Msc. Napoleón Blanco Orozco.**

La fecha límite, para que presente concluido su documento final, debidamente revisado por el tutor guía será el **04 de agosto de 2025.**

Esperando puntualidad en la entrega de la Tesis, me despido.

Atentamente,

MSc. Augusto César Palacios Rodríguez
Director de Área de Conocimiento Industria
y Producción



CC: Protocolo
Archivo



Móvil: (505) 2251 8276



Recinto Universitario Pedro Aráuz Palacios
Costado Sur de Villa Progreso.
Managua, Nicaragua.



www.uni.edu.ni

Managua, Nicaragua Viernes 19 de Diciembre del año 2025

Msc. Augusto César Palacios Rodríguez

Director

Área de Conocimiento de Industria y Producción

UNI

Reciba saludos y deseos de éxito en el desempeño de sus funciones.

Estimado Msc. Palacios debido a que se ha concluido el trabajo monográfico titulado “Implementación de un Prototipo de Sistema Fotovoltaico con Control de Seguimiento Solar con Doble Eje para Paneles Fotovoltaicos de 100W, como Estrategia de Aprendizaje para la Carrera de Ingeniería Eléctrica” elaborado por la Bra. Allison Dennise Badilla Pineda (#2017-0193S), bajo mi tutoría solicito de sus gestiones para establecer fecha de DEFENSA.

Sin más a que referirme me despido saludándole.

Atte.


Dr. Napoleón Vicente Blanco Orozco
Profesor Titular
Departamento de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
DACIP-UNI

Dedicatoria

Después de años de arduo trabajo y dedicación, finalmente he alcanzado esta meta. Dedico esta tesis a Dios que me ha brindado la sabiduría, guía y fortaleza para llegar hasta aquí.

A mi padre, el Sr. Álvaro Josué Badilla Carrasco, por ser ejemplo a seguir en el mundo de la ingeniería. Agradezco su compañía durante las noches de estudio, su invaluable conocimiento y su constante apoyo, que fueron fundamentales para la culminación de mis estudios. Gracias por confiar en mí y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. Tu dedicación y amor han sido una fuente inagotable de inspiración en mi vida. Siempre me recordaste que el conocimiento es lo más valioso que me podías heredar, y esa enseñanza ha guiado cada paso de mi camino.

A mi madre, la Sra. Marta Lorena Pineda Rosales, por su incondicional cuidado y amor. Gracias por velar por mi salud en los días agotadores, por preparar deliciosas comidas para que nunca asistiera a clases con el estómago vacío, y por todos los pequeños y grandes cuidados que me brindaste a lo largo de este camino. Tu dedicación y sacrificio han sido esenciales para mi éxito.

A mi hermano, Christopher Alexander Badilla Pineda, gracias por tu apoyo incondicional y por guiarme con tus valiosos consejos. Agradezco que, habiendo recorrido antes el camino minado de la vida, siempre estuviste dispuesto a ofrecerme orientación para evitar errores. Me enseñaste que todo se puede lograr con esfuerzo propio e inspiraste en mí el deseo de prepararme más. Tu ejemplo y tus palabras han sido un faro en mi camino.

A mi tutor, el Dr. Napoleón Blanco Orozco, por su confianza en mí, y guiarme con sabiduría y dedicación. Agradezco profundamente su valioso conocimiento y consejo, así como su fé en mi potencial. Su invaluable enseñanza en las clases impartidas y su compromiso con mi formación y desarrollo profesional ha sido una fuente constante de inspiración y motivación.

Br. Allison Dennise Badilla Pineda

Resumen del Tema

Los sistemas fotovoltaicos son tecnologías que convierten la energía solar en electricidad, utilizando células fotovoltaicas que capturan la radiación solar y la transforman en corriente eléctrica. Su importancia radica en su capacidad para generar energía de manera limpia y renovable, contribuyendo así a reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables. Estos permiten además satisfacer las necesidades energéticas de aquellos que no disponen de la red eléctrica comercial o bien para generar energía a la red eléctrica (Sistemas conectados a la red).

De acuerdo con lo anterior, el presente trabajo monográfico tiene como objetivo el diseño y construcción de un sistema fotovoltaico con control de seguimiento solar con doble eje, el cual permitirá una mejor captación de energía solar mediante un mecanismo de seguimiento. La orientación precisa de los paneles en los sistemas fotovoltaicos con seguimiento solar en dos ejes se logra mediante el uso de sensores y actuadores lineales. Los sensores utilizados en la presente son sensores de luz que detectan la intensidad y la dirección de la luz solar incidente. Estos datos se utilizan para determinar la posición del sol y los ajustes necesarios en la orientación de los paneles. Los actuadores lineales por su parte son responsables de realizar los ajustes en la orientación de los paneles de manera precisa y en tiempo real por medio de un circuito de control, maximizando así la eficiencia de generación eléctrica a lo largo del día.

El sistema no solo es óptimo en aspectos tales como la simplicidad y robustez mecánica, sino también proporciona una plataforma práctica para el aprendizaje experimental y teórico para los estudiantes del programa académico de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Ingeniería UNI, fomentando la investigación y el desarrollo en el campo de la energía solar.

Índice

I. Introducción	1
II. Antecedentes.....	2
III. Objetivos	4
3.1 General.....	4
3.2 Específicos	4
IV. Justificación	5
V. Marco teórico	6
Generalidades de la energía solar fotovoltaica	6
5.1.1 Conceptos Básicos sobre Energía Solar Fotovoltaica.....	6
5.1.2 Radiación Solar.....	6
5.1.2.1 Tipos de Radiación Solar	6
5.1.3 Hora Solar Pico (H.S.P)	7
5.1.3.1 Acimut (α)	7
5.1.3.2 Inclinación o ángulo de elevación (β)	7
5.1.3.3 Geometría Solar	7
5.1.4 Datos de Radiación Solar en Managua.	8
5.2 Sobre Paneles Fotovoltaicos.....	9
5.2.1 Módulos Fotovoltaicos.....	9
5.2.2 Célula Fotovoltaica	10
5.2.3 Efecto Fotoeléctrico	11
5.2.4 Partes de un Panel Fotovoltaico.....	11
5.2.4.1 Tipos de Paneles Fotovoltaicos Según el Tipo de Célula Utilizada en su Fabricación	12
5.3 Sistemas Fotovoltaicos	13

5.3.1	Definición	13
5.3.2	Componentes básicos que conforman los sistemas fotovoltaicos	14
5.3.2.1	Panel fotovoltaico	14
5.3.2.2	Baterías	14
5.3.2.3	Inversores.....	14
5.3.2.4	Regulador	14
5.3.3	Tipos de sistemas fotovoltaicos	15
5.3.3.1	Sistemas Aislados de la Red Eléctrica.....	15
5.3.3.2	Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red On-Grid.....	16
5.4	<i>Sobre Sistemas Fotovoltaicos con Seguimiento Solar</i>	17
5.4.1	Tipos de seguidores solares	17
5.4.2	Microcontrolador	18
5.4.2.1	Definición de microcontrolador	18
5.4.2.2	Procesamiento de señales	19
5.4.2.3	Internet de las cosas (IoT)	20
5.4.2.4	Consideraciones al elegir un Microcontrolador	21
VI.	Análisis y Presentación de Resultados	22
6.1	<i>Diseño Electrónico, Eléctrico y Mecánico del Sistema Fotovoltaico</i>	22
6.2	<i>Diseño Electrónico de la tarjeta de control</i>	23
6.2.1	Etapa de Alimentación	23
6.2.2	Etapa de Entradas Digitales.....	29
6.2.3	Etapa de Salidas Digitales.....	29
6.2.4	Etapa Entradas Analógicas	31
6.2.5	Diseño de la PCB para el prototipo	33
6.2.6	Diseño de la Placa de Sensores LDR.....	37
6.3	<i>Diseño y Selección de los Equipos Eléctricos Principales del Sistema Fotovoltaico con Control de Seguimiento Solar.</i>	40
6.3.1	Selección del Inversor	40

6.3.2	Selección del Controlador de Carga	41
6.3.3	Actuadores Lineales	42
6.3.4	Gabinete de control	43
6.4	<i>Diseño Mecánico de la Estructura</i>	45
VII.	Construcción y Ensamble de Componentes Electrónicos, Eléctricos y Mecánicos	47
7.1	<i>Introducción</i>	47
7.1.1	Ensamble Electrónico	47
7.1.2	Ensamble Eléctrico	48
7.1.3	Ensamble Mecánico	50
VIII.	Pruebas del sistema fotovoltaico	52
8.1	<i>Introducción</i>	52
8.2	<i>Pruebas Comparativas</i>	52
IX.	Manual y Guía de Aprendizaje para Docentes y estudiantes	54
9.1	<i>Guía de Conceptos Básicos</i>	54
9.2	<i>Formulario de Preguntas</i>	56
9.3	<i>Guía Práctica para Estudiantes: Prueba de Rendimiento</i>	56
X.	Conclusiones y recomendaciones	57
10.1	<i>Conclusiones</i>	57
10.2	<i>Recomendaciones</i>	58
XI.	Bibliografía	59
XII.	Anexos	1

I. Introducción

Nicaragua experimenta un creciente interés en la implementación de sistemas fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica, ya que la región cuenta con alta radiación solar en comparación a los países de continentes como Europa, Asia, etc. En especial, nuestro país posee este recurso que puede ser explotado de manera óptima implementando las nuevas tecnologías en el mercado de la generación solar. Por ello se hace de importancia la constante mejora o actualización de estos sistemas que permitan desempeñar un papel cada vez más importante en la satisfacción de las necesidades energéticas del país.

La utilización de paneles solares es una forma eficiente y sostenible de generar energía eléctrica, sin embargo, para maximizar su rendimiento es necesario que estén siempre orientados hacia el sol, lo cual puede ser un problema si se trata de paneles estáticos (Kahn, Escobar Mejía, Holguín Londoño y Osorio, 2010). Por tanto, para la generación de energía eléctrica utilizando paneles fotovoltaicos, se pueden implementar sistemas de control de posicionamiento (Seguidor solar) utilizando sensores de intensidad de luz (LDR) actuadores lineales y tarjeta de control, para posicionar el panel en el punto máximo de captación solar, obteniendo así la máxima generación de energía.

Sin embargo, si el crecimiento del sector de energías renovables, en particular el de sistemas fotovoltaicos continúa a paso acelerado, sin una estrategia de reclutamiento definida, la falta de disponibilidad de profesionales capacitados o con experiencia técnica en la constante actualización de estos sistemas, obstaculizaría la expansión de esta industria. Por tanto, se hace necesario como una institución con altos estándares en la formación de ingenieros competentes, contribuir al desarrollo final de un área especializada de energías renovables a los estudiantes del programa Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Ingeniería, donde se complementen la enseñanza teórico-práctica, desarrollando un sistema fotovoltaico con control de seguimiento solar con doble eje

II. Antecedentes

En Nicaragua el desarrollo de sistemas fotovoltaicos ha sido una alternativa sostenible y accesible para la generación de energía limpia y renovable. En los últimos años, ha habido un aumento significativo en su adopción por diferentes empresas, ya sean públicas o privadas en el área de energía renovable, sin embargo, los sistemas implementados actualmente en Nicaragua son estáticos, en el país no se cuenta con seguidores solares para la generación de energía.

(Arpi Puga & Prado Bermeo, 2022), en su trabajo de titulación “Diseño de un seguidor solar de doble eje para un sistema de energía fotovoltaica en el centro de salud de la comunidad de Yaapi” propusieron un diseño eficiente y económico de un seguidor solar de doble eje para un sistema de energía fotovoltaica en un centro de salud ubicado en la comunidad de Yaapi, analizando diversos parámetros como la ubicación, la radiación de la zona, el tipo de movimiento del seguidor y los tipos de materiales. Llegando a la conclusión que con este sistema podrían mejorar la calidad de vida y reducir los costos de energía eléctrica de dicha comunidad.

(Molina Osejos & Avila Larrea, 2019), en su tesis monográfica “Diseño Y Construcción De Una Estructura Metálica Para Un Seguidor Solar, De Dos Ejes Para Ser Implementado En El Campus Miguel De Cervantes De La UISEK Ecuador”. Consistió en diseñar y construir una estructura metálica para un seguidor solar de dos ejes, capaz de soportar un panel solar de 175W y las cargas necesarias para implementar un sistema de energía solar en el Campus Miguel de Cervantes de la UISEK, Ecuador, realizaron un análisis estructural y una simulación mecánica en un programa CAD, lo que permitió la construcción de un prototipo funcional, liviano y resistente. El diseño contribuyó al uso de energías renovables y pudiendo ser replicado en otras zonas que requieran energía eléctrica a partir de energía solar.

(Najera, 2017) en su informe de proyecto de graduación presentado en Costa Rica “Automatización de un módulo fotovoltaico rotatorio de un eje con disponibilidad de datos de manera remota”, muestra el diseño e implementación

de la parte electrónica de un seguidor solar de un eje con disponibilidad de datos de forma remota, para así comparar cuanta más potencia se genera a partir de un sistema que sigue la trayectoria del sol vs una estructura colocada de manera fija con 0° de inclinación, es decir, colocada de manera horizontal, donde utilizó diferentes fórmulas que describen los diferentes ángulos para determinar la posición relativa del sol a lo largo del día durante todo el año, también realizó el diseño e implementación de un sistema de control automático, brindando un mejor desempeño a la planta. Otro aspecto fundamental fue transmisión de algunos datos como la potencia producida por ambas estructuras, así como, el ángulo de inclinación del seguidor, concluyendo con un acceso a los mismos desde dispositivos remotos.

Martínez (2020), en su proyecto de grado presentado en Colombia "Diseño y construcción de prototipo de seguidor solar fotovoltaico con sistema mecatrónico autónomo" describe el desarrollo de un prototipo de seguidor solar fotovoltaico con un sistema mecatrónico autónomo que tiene un rendimiento superior a los sistemas de paneles fijos. Se llevaron a cabo diferentes etapas que incluyeron la contextualización del proyecto, definición de especificaciones técnicas, diseño conceptual, ensamble y pruebas para garantizar su funcionalidad, logrando así el desarrollo de un prototipo que garantiza un seguimiento preciso del sol y un mayor rendimiento en la generación de energía. Este proyecto demostró la importancia del uso de tecnologías avanzadas en la captación de energía solar y su aplicación en el sector energético.

Gonzalez, Aguilar (2019), en su trabajo monográfico "Generación distribuida: diseño de un sistema fotovoltaico conectado en paralelo a la red privada en baja tensión para el suministro eléctrico de mega tienda SINSA carretera Masaya" presentaron el diseño de un parque solar fotovoltaico a pequeña escala conectado a la red, analizando a su vez la estimación de sus beneficios económicos, el desarrollo de las tecnologías precedentes a las que actualmente se utilizan, como han evolucionado los materiales para la construcción de los equipos para la extracción de esta energía de manera más eficiente, así mismo brindaron una pequeña descripción y su funcionamiento.

III. Objetivos

3.1 General

- Desarrollar un prototipo de sistema fotovoltaico con control de seguimiento solar con doble eje para paneles fotovoltaicos de 100W, como estrategia de aprendizaje para la carrera de ingeniería eléctrica, fomentando así la experimentación con soluciones innovadoras en la producción de energía solar mediante la elaboración de guías de aprendizaje.

3.2 Específicos

- Diseñar un prototipo de sistema fotovoltaico con control de seguimiento solar con doble eje utilizando los materiales adecuados, con base en requerimientos técnicos existentes para los componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos que conforman el sistema.

- Construir un prototipo de sistema fotovoltaico con control de seguimiento solar con doble eje basado en planos y diagramas detallados, para el ensamble de componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos.

- Realizar pruebas del prototipo para verificar su funcionamiento y medir su generación de energía eléctrica, para evaluar la precisión del seguimiento y posibles mejoras o ajustes.

- Elaborar guías y manuales de aprendizaje para docentes y estudiantes, que expliquen el diseño y pruebas que se pueden realizar en el prototipo.

IV. Justificación

La energía solar es una fuente de energía renovable, limpia y abundante, que proporciona una solución sostenible para la creciente demanda de energía en todo el mundo. En los últimos años, ha habido un aumento en la implementación de sistemas fotovoltaicos en todo el mundo, y se espera que esta tendencia continúe en el futuro cercano. La ingeniería eléctrica es una disciplina clave en el desarrollo y la implementación de sistemas solares, y es importante que los estudiantes de ingeniería eléctrica adquieran las habilidades y los conocimientos necesarios para trabajar en esta área.

La implementación de un prototipo de sistema fotovoltaico con control de seguimiento solar con doble eje para paneles fotovoltaicos de 100W, como estrategia de aprendizaje para la carrera de ingeniería eléctrica, será una excelente estrategia didáctica en la formación académica y técnica de los estudiantes en el campo de los sistemas fotovoltaicos, al proporcionar esta estrategia de aprendizaje práctico los estudiantes experimentarán soluciones innovadoras para optimizar la producción de energía eléctrica en sistemas fotovoltaicos, obteniendo una experiencia valiosa para su futuro trabajo en el campo de la ingeniería eléctrica.

Además, la implementación de este sistema como estrategia de aprendizaje demuestra el compromiso a la transición hacia fuentes de energía más sostenibles y responsables con el medio ambiente. Esto puede ser un factor importante en la elección de los estudiantes y la percepción de la institución o grupo por parte de la comunidad.

V. Marco teórico

Generalidades de la energía solar fotovoltaica

5.1.1 Conceptos Básicos sobre Energía Solar Fotovoltaica.

Para comprensión de la conversión de la energía solar en electricidad, se hace necesario conocer la definición de energía solar fotovoltaica. (Castejon & Santamaria, 2019) definen la energía solar fotovoltaica como la energía procedente del sol que se convierte en energía eléctrica de forma directa, sin ninguna conversión intermedia. Se produce mediante generadores fotovoltaicos compuestos por módulos fotovoltaicos conectados entre sí, que a su vez están compuestos por unidades básicas denominadas células solares o fotovoltaicas

5.1.2 Radiación Solar

Cantidad de energía solar que llega a la tierra. La magnitud que mide la radiación solar es la irradiancia, que mide la energía por unidad de tiempo y área que alcanza a la tierra. Su unidad es el W/m². (Daza & Perez, 2020)

5.1.2.1 Tipos de Radiación Solar

La radiación solar es una variable importante al hablar de generación de energía eléctrica por medio de paneles fotovoltaicos, debido a que es la fuente de energía para su funcionamiento. Por tanto, se hace necesario mencionar los tipos de radiación solar que influirán sobre el panel fotovoltaico. (Castejon & Santamaria, 2019) el autor en su libro “Instalaciones solares fotovoltaicas” menciona tres tipos de radiación solar, presentadas a continuación.

Radiación Directa: La forman los rayos recibidos directamente del sol.

Radiación Difusa: Procedente de toda la bóveda del cielo, excluyendo el disco solar, la forman los rayos dispersados por la atmosfera en dirección al receptor (Por ejemplo, en un día completamente nublado toda la radiación recibida es difusa).

Radiación Reflejada o de Albedo: Reflejada por la superficie terrestre hacia el receptor. Depende directamente de la naturaleza de las montañas, lagos, edificios, etc. Que rodean al receptor.

Cabe señalar que la suma de estas radiaciones descritas anteriormente recibe el nombre de radiación global. (Castejon & Santamaria, 2019)

5.1.3 Hora Solar Pico (H.S.P)

Es la cantidad de horas de sol con una intensidad de radiación de 1000W/m^2 y que incide sobre la superficie del módulo solar. (Martínez & Sanchez, 2021)

El valor de la irradiación solar en un lugar en específico varía constantemente en el día, debido a la rotación de la tierra. Por tanto, para facilitar los cálculos de eficiencia de paneles solares se usa el dato de la hora solar pico (HSP).

5.1.3.1 Acimut (α)

La posición idónea es con $\alpha = 0^\circ$, es decir, orientado hacia el ecuador, ya que el sol sale por el Este y se pone por el Oeste, para que durante el día el panel capte la mayor cantidad de radiación posible.

5.1.3.2 Inclinación o ángulo de elevación (β)

Es el ángulo formado por la superficie del módulo fotovoltaico y el plano horizontal. Su valor es 0° para módulos en posición horizontal, y 90° para módulos en posición vertical. En instalaciones fijas este ángulo se fija en función de la latitud del lugar.

5.1.3.3 Geometría Solar

Conocer la geometría solar es fundamental para poder estimar la cantidad de energía que se pueda aprovechar por un panel fotovoltaico y la disposición óptima del mismo. La orientación se define mediante el ángulo Azimut (Ψ), el Azimut se define como el ángulo que forma la dirección sur con el objeto (Positivo hacia el oeste). Y el ángulo de inclinación puesto que la altura del sol varía de acuerdo con las estaciones, este parámetro es importante, ya que aporta en la creación de sombras y en la irradiación recibida por el módulo. Se mide a partir del horizonte, con un valor de 0° y es positivo en el cenit. (Perez J. C., 2019)

5.1.4 Datos de Radiación Solar en Managua.

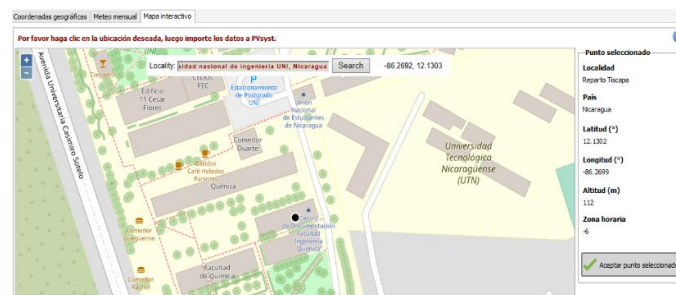
Al emprender el desarrollo de una instalación de energía solar, es crucial iniciar con el análisis del recurso solar, ya que esto determinará las decisiones futuras. Para llevar a cabo dicho análisis, en este campo se deben obtener datos históricos que les permitan estimar la radiación solar esperada a largo plazo en la ubicación en cuestión. Para este propósito, se utilizan diversas bases de datos que pueden variar según la región que se esté estudiando. En la actualidad, hay numerosas bases de datos disponibles en internet de forma gratuita, e incluso empresas especializadas ofrecen datos contrastados y mediciones como productos comerciales.

Sin embargo, lo más importante al realizar el análisis del recurso solar es contrastar la mayor cantidad posible de bases de datos, ya que ninguna de ellas es completamente confiable por sí sola. Después de comparar los datos, se pueden descartar aquellos que se consideren menos precisos y, posiblemente, aceptar los valores provenientes de una única base de datos como los más representativos. No obstante, nunca se deben aceptar los datos de una única fuente sin haberlos contrastado previamente con otras fuentes confiables.

La importación de datos fue por medio de Meteonorm, disponible en PVSYST. Meteonorm aporta datos meteorológicos de radiación y temperatura a través de 8325 bases meteorológicas, cinco satélites y treinta años de experiencia en el sector.

Figura 1

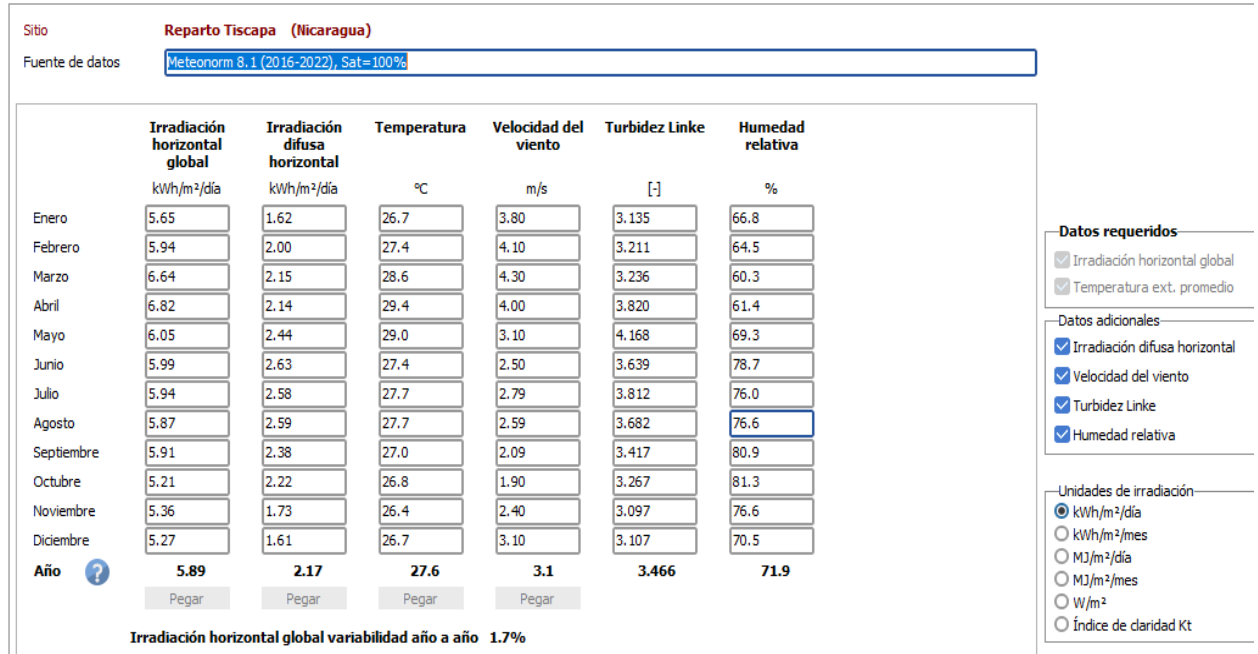
Punto Ubicado en el Mapa de PVSYST



Nota: La figura anterior muestra el punto ubicado en el mapa de PVSYST para determinar los datos de radiación solar que proporcionara del lugar.

Figura 2

Base de datos de radiación solar en Managua



Nota: La figura anterior muestra datos de radiación solar en la columna número 2 y el promedio de la radiación solar incidente al año.

5.2 Sobre Paneles Fotovoltaicos

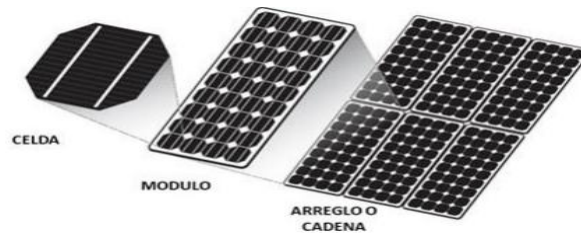
5.2.1 Módulos Fotovoltaicos

Los módulos fotovoltaicos están compuestos por células fotovoltaicas, estas células se fabrican de materiales semiconductores, estos son elementos sólidos que tiene una conductividad eléctrica inferior a la de un conductor, pero superior a la de un aislante. El semiconductor más utilizado para la fabricación de los módulos fotovoltaicos es el silicio. (Castejon & Santamaria, 2019)

El módulo es la unidad constructiva básica para sistemas fotovoltaicos, diseñada para asegurar un funcionamiento adecuado mediante el control de corriente y voltaje, protegiendo las celdas solares para prolongar su vida útil. Las celdas, conectadas en serie o paralelo, están cubiertas por vidrio templado y una superficie de plástico o vidrio en ambos lados para impermeabilización. Ésta configuración de doble vidrio es común en edificios. Además, se puede añadir un marco metálico para proporcionar rigidez, mientras que la caja de conexiones en el dorso facilita las conexiones eléctricas y de seguridad. (Peña, 2016)

Figura 3

Partes que conforman un arreglo de paneles fotovoltaicos



Nota: La figura anterior muestra cómo se conforma un arreglo de paneles fotovoltaicos, las celdas conforman el módulo de panel fotovoltaico que a su vez se puede conectar con otros paneles fotovoltaicos.

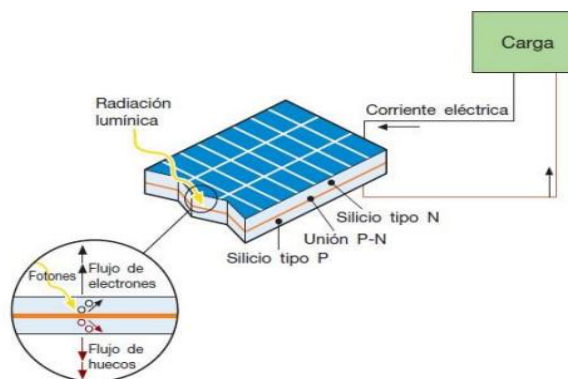
5.2.2 Célula Fotovoltaica

Es un dispositivo en el que se produce la conversión de la luz en electricidad, transforma la energía lumínica (Fotones) en energía eléctrica (Flujo de electrones) mediante el efecto fotoeléctrico.

Están formadas por la unión de dos semiconductores (junturas p-n) con un contacto frontal a través del cual incide la luz y un contacto posterior que refleja la luz. La radiación solar incide en la célula y provoca una polarización de las junturas, si se cierra el circuito se provoca un flujo de electrones entre las junturas, generando así una corriente eléctrica continua que recorre todo el circuito. (Santa Fe, 2012).

Figura 4

Célula fotovoltaica



Nota: En la figura anterior se muestra la estructura de la célula fotovoltaica.

5.2.3 Efecto Fotoeléctrico

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía renovable proveniente del aprovechamiento de la radiación solar. Cuando la radiación solar incide sobre el material semiconductor los cuales se dopan con otros materiales para crear reacción a la luz, provocan un exceso de electrones y protones generando así energía eléctrica.

Las células solares se fabrican con semiconductores. Los átomos de silicio tienen su orbital externo incompleto con solo cuatro electrones denominados electrones de valencia, formando una red cristalina en la que cada átomo comparte sus cuatro electrones de valencia con los cuatro átomos vecinos (Enlaces covalentes). Cualquier aporte de energía como una elevación de la temperatura o la iluminación del semiconductor, provoca que algunos electrones de valencia absorban suficiente energía para librarse del enlace covalente y moverse a través de la red cristalina, convirtiéndose en electrones libres. Cuando un electrón libre abandona el átomo de un cristal de silicio, deja en la red cristalina una vacante (hueco) que con respecto a los electrones circundantes tienen efectos similares a los que provocaría una carga positiva.

5.2.4 Partes de un Panel Fotovoltaico

Los elementos que conforman un panel solar fotovoltaico son importantes para proteger la célula fotovoltaica de agentes externos y puedan acoplarse en las estructuras que los soportaran. (Guerrero, 2023)

Encapsulante: Su misión es proteger las células solares y sus contactos. Los materiales que se utilizan proporcionan una excelente transmisión a la radiación solar y mínima degradación frente a los rayos ultravioleta.

Cubierta Exterior: Tiene como función proteger a la parte expuesta a la radiación de la acción de elementos externos. Se utiliza vidrio templado con alto contenido en hierro, que facilita la transmisión de la luz y tiene gran capacidad de resistencia a las condiciones climatológicas más adversas y a los impactos, pudiendo soportar también sin problemas cambios bruscos de temperatura.

Cubierta Posterior: Destinada a la protección trasera del panel fotovoltaico, en especial contra los agentes atmosféricos, ejerce de barrera contra la humedad. Normalmente son de color blanco, ya que ésto favorece el rendimiento del panel debido a que vuelven a reflejar sobre las células la luz que ha pasado entre los intersticios de éstas.

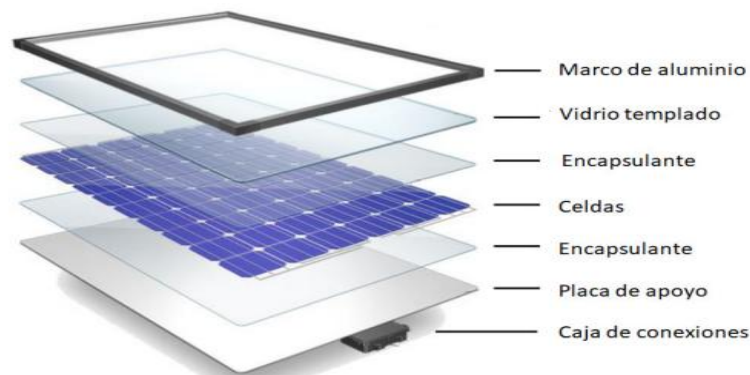
Marco de Metal: Suele fabricarse de aluminio. Asegura rigidez mecánica y estanqueidad al conjunto y se dota de un sistema que permite su acoplamiento a otros paneles y a la estructura soporte.

Caja de Conexiones: Incorpora los bornes para la conexión del panel.

Diodos de bypass: Protegen de posibles daños causados por sombras parciales en la superficie del panel. Van ubicados en la caja de conexiones.

Figura 5

Partes que conforman un panel fotovoltaico



Nota: La figura anterior muestra las partes constituyentes de un panel fotovoltaico

5.2.4.1 Tipos de Paneles Fotovoltaicos Según el Tipo de Célula Utilizada en su Fabricación

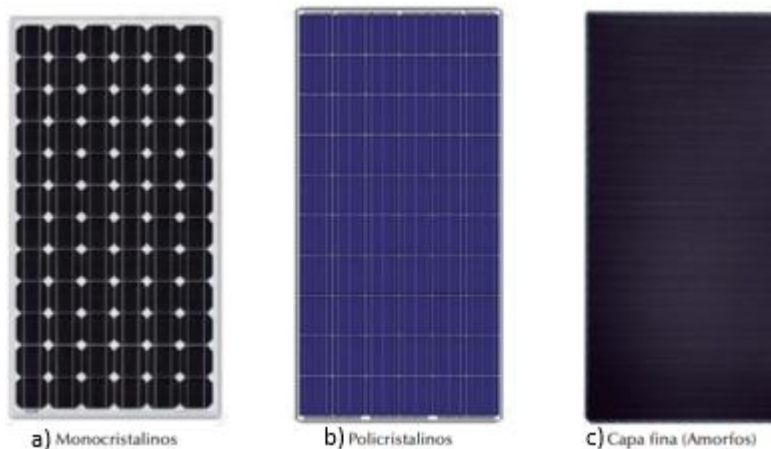
Paneles Solares de Silicio Monocristalino. Fueron los primeros en fabricarse. Sus células están compuestas de silicio puro que se somete a múltiples fases de cristalización hasta obtener un solo tipo de cristal. Posteriormente, se someten al proceso de dopado con boro y fósforo, adquiriendo una forma cilíndrica una vez solidificados. Finalmente, se les da forma cuadrada y se recortan o redondean sus esquinas.

Paneles Solares de Silicio Policristalino. Se fabrican mediante células de silicio puro sometido a menos fases de cristalización que las monocristalinas, por lo que resultan con múltiples tipos de cristales. También se someten al proceso de dopado, como en el caso anterior, y solidifican en un molde perfectamente cuadrado, por lo que, al cortarse para obtener las células, estas presentan dicha forma.

Paneles Solares de Silicio Amorfo o de Capa Fina. Son los más modernos y se fabrican con silicio sin cristalizar, depositando en forma de vapor una película de dicho elemento encima de una superficie de metal, plástico u otro material. A causa de su menor densidad de potencia, requieren como mínimo el doble de espacio que el resto de las placas solares para conseguir los mismos vatios.

Figura 6

Tipos de paneles fotovoltaicos



Nota: La figura anterior muestra tres tipos de paneles fotovoltaicos a) Monocrystalino b) Policristalino c) Capa fina (Amorfos).

5.3 Sistemas Fotovoltaicos

5.3.1 Definición

(Cepeda & Sierra, 2017) Define un sistema fotovoltaico como un conjunto de equipo eléctricos y electrónicos que producen energía eléctrica a partir de la radiación solar por medio del efecto fotoeléctrico.

5.3.2 Componentes básicos que conforman los sistemas fotovoltaicos

5.3.2.1 Panel fotovoltaico

Está conformado por un conjunto de células, conectadas eléctricamente, encapsuladas y montadas sobre una estructura de soporte o marco. Carmona, J., & Díaz, M. (2010)

5.3.2.2 Baterías

Se utilizan principalmente como sistema de almacenamiento energético, debido al desplazamiento temporal que puede existir entre los periodos de generación (Durante el día) y los periodos de consumo (Durante la noche), permitiendo la operación de las cargas cuando el generador fotovoltaico por sí mismo no puede generar la potencia suficiente para abastecer el consumo. Carmona, J., & Díaz, M. (2010)

5.3.2.3 Inversores

El inversor se encarga de convertir la corriente continua de la instalación en corriente alterna, igual a la utilizada en la red eléctrica. Es un elemento imprescindible en las instalaciones conectadas a red, y estará presente en la mayoría de las instalaciones autónomas, sobre todo en aquellas destinadas a la electrificación de viviendas. (Suarez, Muñoz, 2022)

5.3.2.4 Regulador

Para el correcto funcionamiento de la instalación se debe instalar un sistema de regulación de carga en la unión entre paneles solares y baterías. Este elemento recibe el nombre de regulador y tiene como misión evitar situaciones de carga y sobrecarga de la batería, con el fin de alargar su vida útil. Este trabaja en dos zonas, en la parte relacionada con la carga, su misión es garantizar suficiente acumulador y evitar situaciones de sobrecarga, y en la parte de descarga se ocupará de asegurar el suministro eléctrico diario suficiente y evitar la descarga excesiva de la batería. (Fernandez,2010)

5.3.3 Tipos de sistemas fotovoltaicos

5.3.3.1 Sistemas Aislados de la Red Eléctrica

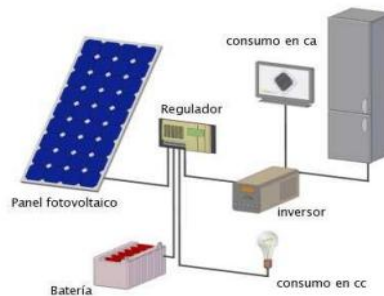
Estos equipos también denominados Autónomos u “Off-Grid” son los que aprovechan la conversión fotovoltaica para cubrir una demanda eléctrica en lugares remotos, aislados o no conectados a la red eléctrica; éstos son competitivos con los sistemas convencionales en términos de costos o de fiabilidad. (Perez, 2019)

Dentro de sus diversas aplicaciones principalmente se encuentran: Sistemas de Electrificación, sistemas Agrícolas, alumbrado público o señalización, etc.

Los componentes principales que conforman un sistema fotovoltaico aislado son: Módulos fotovoltaicos, regulador de carga, inversor y sistema de acumulación (Baterías). En este tipo de sistemas, la energía producida por los módulos fotovoltaicos es almacenada en baterías de acumulación. La carga es alimentada a través del regulador de carga, por la energía acumulada en las baterías.

Figura 7

Esquema de un sistema fotovoltaico aislado



Nota: La figura anterior muestra un esquema básico de un sistema fotovoltaico aislado.

5.3.3.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red On-Grid

Estos sistemas también denominados On-Grid, a diferencia de los anteriores tienen como función maximizar anualmente la producción de energía de la red eléctrica. (Perez, 2019) Entre las principales aplicaciones que posee el sistema se puede encontrar:

- Integración de Edificaciones, la instalación está físicamente situada en el edificio que generalmente está en una zona urbana.
- Centrales Fotoeléctricas, que permiten aumentar la producción de energía eléctrica en las redes.
- Generación Distribuida, es un tipo de generación eléctrica que permite a los usuarios generar energía desde pequeñas fuentes para suministrar a las Redes de transporte eléctrico.

Los sistemas conectados en red, en cambio, normalmente no tienen sistemas de acumulación, ya que la energía producida durante las horas de insolación es canalizada a la red eléctrica; al contrario, durante las horas de insolación escasa o nula, la carga viene alimentada por la red. Un sistema de este tipo, desde el punto de vista de la continuidad de servicio, resulta más fiable que uno no conectado a la red que, en caso de avería, no tiene posibilidad de alimentación alternativa. Los componentes principales que conforman un sistema fotovoltaico conectado a la red son: Módulos fotovoltaicos, inversor para la conexión a red, dispositivo de intercambio con la red eléctrica, contador de energía bidireccional. (Perez J. C., 2019)

Figura 8

Esquema de un sistema fotovoltaico conectado a la red



Nota: La figura anterior muestra un esquema básico de un sistema fotovoltaico conectado a la red.

5.4 Sobre Sistemas Fotovoltaicos con Seguimiento Solar

Los sistemas fotovoltaicos actualmente son instalados en estructuras que mantienen al generador fotovoltaico en una posición fija, que se determina en función del uso que se hace de la instalación. Sin embargo, resulta evidente que, si la superficie del generador pudiese seguir la trayectoria del sol y mantenerse perpendicular a su dirección, la energía recolectada sería máxima. Este es el objetivo de los sistemas de seguimiento solar, aumentar la energía recibida por el generador utilizando mecanismos de movimiento que lo orienten en la dirección adecuada.

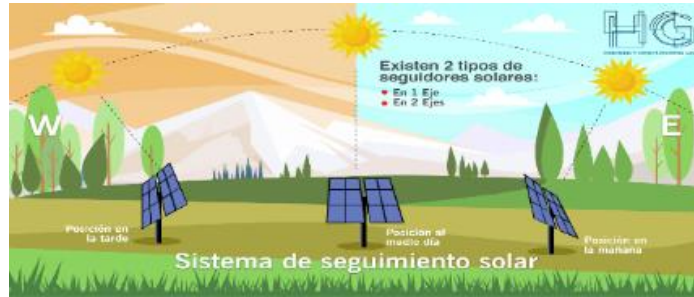
(Gimenez, 2016) define un sistema de seguimiento solar como un dispositivo mecánico estructural en el cual están montados paneles fotovoltaicos, con la capacidad de seguir la trayectoria del sol durante el día. Teniendo como objetivo aumentar la captación de la cantidad de energía.

5.4.1 Tipos de seguidores solares

Existen dos tipos de seguidores solares, los de un eje y los de doble eje. Los seguidores de un eje son un sistema que cambian de posición en dirección del sol a lo largo del día. Por otro lado, los seguidores solares de doble eje poseen dos grados de libertad o dos orientaciones, que permiten seguir el sol en dirección Norte-Sur y Este-Oeste, siendo los más eficientes a la hora de captar energía solar.

Figura 9

Sistemas de seguimiento solar



Nota: Seguidor solar de un eje y seguidor solar de dos ejes con su posición. Tomada de HG ingeniería (2018).

5.4.2 Microcontrolador

5.4.2.1 Definición de microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado con muy alta escala de integración (VSLI Very Long Scale Integration) que internamente contiene una unidad central de procesos (CPU, Central Process Unit), memoria para código, datos, temporizadores, fuentes de interrupción y otros recursos necesarios para el desarrollo de aplicaciones, por lo general con un propósito específico. (Sumano, 2012)

Estos microcontroladores se programan utilizando lenguajes como C, C++ o ensamblador, y se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, como sistemas embebidos, control industrial, electrónica de consumo y dispositivos médicos.

En el mercado, existen varios fabricantes de microcontroladores, cada uno ofreciendo una variedad de modelos con diferentes características y periféricos integrados. Algunas marcas reconocidas son Arduino, Microchip, Atmel, Texas Instruments y STMicroelectronics. Los microcontroladores son una herramienta fundamental para el desarrollo de sistemas en tiempo real y el control de dispositivos electrónicos.

5.4.2.2 Procesamiento de señales

El procesamiento de señales es una disciplina que se encarga de adquirir, analizar y manipular señales con el objetivo de extraer información relevante de ellas. En el contexto de los microcontroladores, el procesamiento de señales se refiere a la capacidad de estos dispositivos para recibir y procesar señales analógicas o digitales provenientes de sensores u otros dispositivos.

Los microcontroladores cuentan con periféricos específicos, como convertidores analógico-digitales (ADC) y convertidores digital-analógicos (DAC), que permiten la adquisición y generación de señales analógicas. Además, su unidad central de procesamiento (CPU) está diseñada para ejecutar instrucciones de manera secuencial y realizar operaciones matemáticas y lógicas en las señales digitales.

El procesamiento de señales en microcontroladores implica aplicar algoritmos y técnicas de análisis para filtrar, transformar, detectar y extraer características de las señales. Estos algoritmos pueden implementarse en el software programado en el microcontrolador, aprovechando su capacidad de cálculo y memoria.

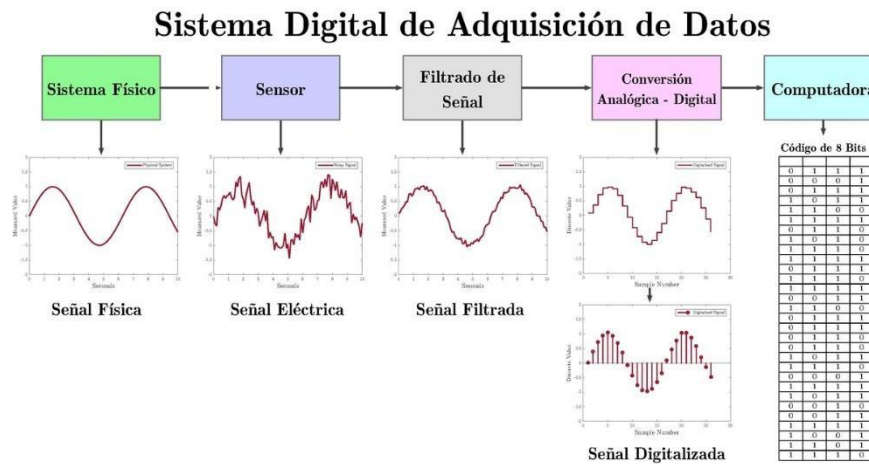
Algunas aplicaciones comunes del procesamiento de señales en microcontroladores incluyen el filtrado de ruido, la detección de eventos, la identificación de patrones y la generación de respuestas adecuadas a ciertas condiciones de entrada. Estas capacidades son especialmente útiles en sistemas de control, procesamiento de audio y video, comunicaciones, instrumentación y más.

Es importante mencionar que el procesamiento de señales en microcontroladores está sujeto a limitaciones en términos de velocidad de procesamiento, capacidad de memoria y resolución de los convertidores analógico-digitales.

Por lo tanto, se debe considerar cuidadosamente la elección del microcontrolador y optimizar los algoritmos para garantizar un procesamiento eficiente y preciso de las señales.

Figura 10

Sistema de Adquisición de Datos



5.4.2.3 Internet de las cosas (IoT)

El Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) es un concepto que se refiere a la interconexión de objetos físicos a través de internet, permitiendo la comunicación y el intercambio de datos entre estos dispositivos. En el contexto del IoT, se utilizan diversos dispositivos y tecnologías para habilitar esta conectividad.

Los dispositivos utilizados en sistemas de IoT abarcan una amplia gama de tecnologías y plataformas, como sensores, actuadores, microcontroladores, gateways, servidores, servicios en la nube y aplicaciones de software. Estos dispositivos se comunican entre sí a través de diversas tecnologías de red, como Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, LoRa, 4G/5G y Ethernet, entre otras.

La integración de dispositivos en sistemas de IoT permite la recopilación y el intercambio de datos en tiempo real. Los sensores capturan información del entorno, como temperatura, humedad, presión, movimiento, y la envían a través de la red para su procesamiento y análisis. Los actuadores reciben instrucciones desde la red para realizar acciones físicas en el entorno.

5.4.2.4 Consideraciones al elegir un Microcontrolador

Al seleccionar un microcontrolador para un proyecto, debes considerar:

- Requisitos de procesamiento y memoria.
- Periféricos necesarios (ADC, DAC, puertos GPIO, etc.).
- Consumo de energía y requisitos de eficiencia energética.
- Interfaces de comunicación requeridas.
- Ambiente y condiciones de funcionamiento.
- Costo y disponibilidad.

Figura 11

Características Técnicas del ESP32 WROOM

• Procesador: Xtensa® LX6 de doble núcleo, hasta 240 MHz.
• Memoria RAM interna: 520 KB SRAM.
• Memoria Flash externa: Normalmente 4 MB (puede variar según el modelo).
• Conectividad Wi-Fi: IEEE 802.11 b/g/n (2.4 GHz).
• Conectividad Bluetooth: Bluetooth clásico y Bluetooth Low Energy (BLE) versión 4.2.
• Pines GPIO: Hasta 34 pines de entrada/salida programables.
• Interfaces de comunicación: SPI, I2C, I2S, UART, PWM, CAN.
• Convertidores: ADC (convertidor analógico-digital) de 12 bits y DAC (convertidor digital-analógico) de 8 bits.
• Sensores internos: Sensor Hall y sensor táctil capacitivo.
• Voltaje de operación: 3.0V a 3.6V (típico 3.3V).
• Consumo de energía: Bajo consumo con modos de suspensión y ahorro energético.
• Antena: Integrada en PCB (modelo 32D), Conector U.FL para antena externa (modelo 32U).
• Temperatura de operación: -40 °C a +85 °C.
• Dimensiones del módulo: Aprox. 18 mm × 25 mm.
• Programación: Compatible con Arduino IDE, ESP-IDF, MicroPython y PlatformIO.

Nota: En la figura anterior se muestra las características del microcontrolador ESP32-WROOM.

Figura 12

Data sheet ESP32-WROOM



VI. Análisis y Presentación de Resultados

6.1 Diseño Electrónico, Eléctrico y Mecánico del Sistema Fotovoltaico

Introducción

El objetivo fundamental del diseño y desarrollo de éste sistema es brindar a los estudiantes de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) una herramienta formativa que les permita aplicar conceptos teóricos en un entorno práctico. En esta ocasión, se ha optado por implementar un sistema de control de seguimiento solar en doble eje, el cual permite maximizar la captación de energía solar mediante el ajuste automático de la orientación de los paneles solares en función de la posición del sol.

El núcleo del sistema está basado en el microcontrolador ESP32 WROOM, un componente de alto rendimiento que integra conectividad Wi-Fi y Bluetooth, doble núcleo de procesamiento, capacidad de ejecución en tiempo real, múltiples interfaces de entrada/salida (GPIOs), y conversores analógico-digital y digital-analógico. Estas características lo convierten en una opción ideal para el control preciso de motores y la comunicación con sensores, actuadores y sistemas de supervisión remota.

El diseño incluye además una etapa dedicada a la selección de los componentes eléctricos esenciales para el funcionamiento del sistema, tales como actuadores lineales, inversores y un controlador de carga, los cuales son fundamentales en un sistema solar fotovoltaico para garantizar la conversión, regulación y movimiento automatizado de los paneles. Posteriormente, se realiza el diseño de una estructura de soporte adecuada, considerando los grados de libertad requeridos en un sistema de doble eje. Esta estructura se dimensiona tomando en cuenta el peso de los paneles solares seleccionados.

El diseño del sistema de seguimiento solar está estructurado en varias etapas de diseño: Etapa de diseño electrónico, eléctrico y mecánico.

6.2 Diseño Electrónico de la tarjeta de control

En el marco teórico se establecen los criterios para la selección del microcontrolador del sistema de control del prototipo fotovoltaico con seguimiento solar en dos ejes, seleccionándose el ESP32-WROOM por su mayor capacidad de procesamiento, precisión en la lectura de señales analógicas y eficiencia energética frente a opciones convencionales. Teóricamente, el ESP32-WROOM es un módulo de Espressif Systems que integra un procesador de doble núcleo, memoria y conectividad Wi-Fi y Bluetooth en un encapsulado compacto, adecuado para sistemas embebidos y control fotovoltaico (*Santiago, 2021*).

6.2.1 Etapa de Alimentación

Para la etapa de alimentación empezaremos definiendo la alimentación de la tarjeta del control del sistema. Se usará un voltaje nominal de 12VDC para la tarjeta, este voltaje es el más común en sistemas fotovoltaicos residenciales, sin embargo, la tarjeta de control puede trabajar a un voltaje entre 12VDC a 24VDC. Se ha decidido emplear un convertor DC-DC Step DOWN en la etapa de alimentación para asegurar un voltaje constante de 5VDC el cual será útil para alimentar los relés, módulo I2C y el ESP32.

Convertidor Buck (Reductor)

Según (Marco, 2010) El convertidor Buck es un tipo de fuente de alimentación conmutada que tiene como objetivo reducir la tensión que alimenta al sistema, es decir, la tensión de salida es menor o igual que la tensión de entrada. Está formado por un interruptor (S) o transistor, un diodo (D), una bobina (L), un condensador (C) y una carga; obteniendo con estos componentes un nuevo valor de tensión de salida (V_o). **(Véase anexo 1)**

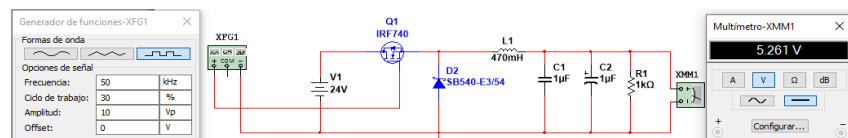
El interruptor S es un transistor MOSFET que alterna entre los modos ON y OFF. El diodo D actúa como un diodo de libre circulación durante el cierre de S, con la misma frecuencia de conmutación. Los valores de otros componentes están vinculados a las metas de entrada y salida. La tensión de salida (V_o) del convertidor exhibe un rizado influenciado por los valores de L y C en relación con

la frecuencia de conmutación. Estas fuentes tienen dos modos de conducción, modo de conducción continua y modo de conducción discontinua.

Para entender el funcionamiento de un conversor DC-DC BUCK o Step Down, montaremos un esquema básico con fuente de tensión DC, transistor Mosfet, señal PWM, inductor, condensador y resistencia de carga. Implementaremos este circuito en el software de diseño y simulación electrónica Multisim.

Figura 13

Circuito Básico de Conversor DC-DC Reductor (BUCK).



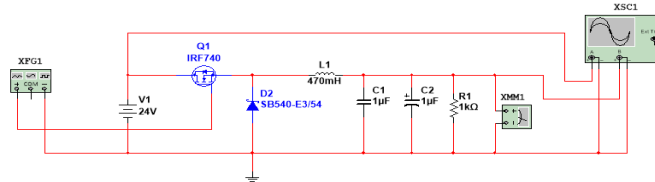
Nota: En la figura anterior muestra el circuito básico de funcionamiento de un conversor DC-DC BUCK (Reductor). *Elaboración propia.*

Para efecto de simulación la fuente de alimentación es de 24VDC con un transistor Mosfet IRL740 Canal N actuando como interruptor en un conversor DC-DC reductor. La compuerta del transistor recibe una señal de onda cuadrada de 50Khz, ciclo de trabajo del 30%, y amplitud de 10vp para la conmutación. Un inductor de 470mH y un condensador C1 actúan como filtro pasa bajos, reduciendo la distorsión en la salida. El condensador C2 minimiza el rizado en el voltaje de salida. Se añade un diodo Schottky y una resistencia en paralelo simulando una carga RL.

Para la reducción de 24VDC a 5.261VDC se realiza un análisis de transientes con un osciloscopio en la entrada (canal A) y salida (canal B) para evaluar el comportamiento del circuito.

Figura 14

Circuito Básico de Conversor DC-DC Reductor (BUCK).

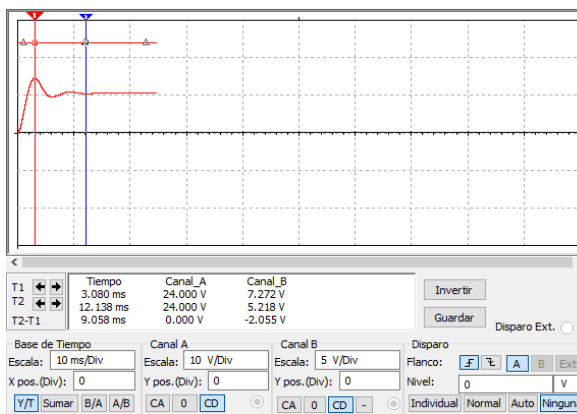


Nota: El diagrama anterior muestra el circuito básico convertidor DC-DC BUCK conexión de osciloscopio. *Elaboración propia*

En el osciloscopio, la señal de entrada de 24VDC en el canal A se contrasta con la salida de 5.261VDC en el canal B durante la simulación. Se nota un breve pico al iniciar la conversión, seguido de oscilaciones antes de estabilizarse. Se utilizará el cursor para medir el voltaje pico y el tiempo desde la activación hasta la estabilización de la salida.

Figura 15

Señal de Voltaje Pico y Tiempos de Duración con Osciloscopio



Nota: La grafica anterior muestra el voltaje pico y tiempos de duración como tiempo de estabilización. *Elaboración propia*

En el rango de 0 a 3.080ms, se observa un pico de voltaje de 7.272V en la salida, superando el valor estable de 5.261V en un 38.22%. Aunque el tiempo de estabilización es de 12.138ms, no es perceptible en multímetros; sin embargo, es crucial para comprender el comportamiento del convertidor DC-DC BUCK. La simulación transitoria se presentará para respaldar estos resultados. **(Véase anexo 2 y 3).**

El voltaje máximo de salida es 7.2665V, la corriente máxima en el inductor 6.9313mA en 3.1228 ms. Estos resultados destacan el funcionamiento del conversor DC-DC, incluyendo fenómenos transientes. En el diseño de la etapa de alimentación para un prototipo de control de seguimiento solar, se utilizará un conversor DC-DC.

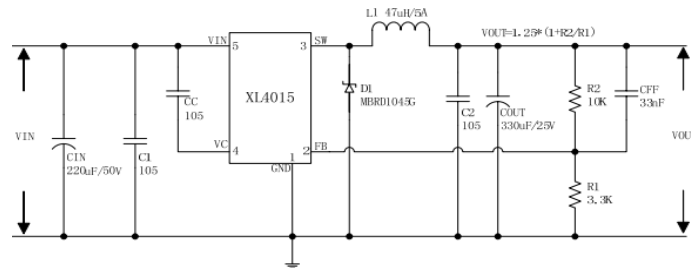
Se busca alimentar una carga con un consumo máximo de 836.9mA y se considera un conversor DC-DC BUCK de 2A. Sin embargo, se elige un modelo de 5A con disipador de calor, como el Convertidor DC-DC BUCK/Step Down xl4015E1, para garantizar eficiencia incluso sin enfriamiento adicional en el prototipo. **(Véase anexo 4).**

Lo cual indica que posee un amplio rango de entrada de 8V a 36V, salida ajustable de 1.25V a 32V, ciclo de trabajo máximo del 100%, caída mínima de tensión de 3V, frecuencia fija de 180KHz, corriente de salida constante de 5A, Mosfet de potencia optimizado, eficiencia hasta el 96%, regulación de línea y carga, apagado térmico, corriente límite y protección contra cortocircuitos. El fabricante proporciona un diagrama de bloques en la ficha técnica. **(Véase anexo 5)**

El fabricante proporciona un circuito típico para el convertidor DC-DC BUCK. Con un voltaje de entrada V_{in} de 8VDC a 36VDC, se logra una tensión de salida constante de 5VDC, ideal para nuestro prototipo. Este rango de voltajes se espera tanto en la etapa de CPU como en la de salida para la alimentación de la bobina de los relés. A continuación, se muestra el esquemático recomendado por el fabricante.

Figura 16

Circuito de Convertidor DC-DC BUCK XI4015



Nota: El diagrama anterior muestra el circuito de aplicación típica convertidor DC-DC BUCK XI4015 tomado del datasheet del mismo.

En el circuito anterior se muestra una fórmula el cual nos indica que el voltaje de salida corresponde a la siguiente fórmula:

$$V_{salida} = 1.25 * \left(1 + \frac{R2}{R1}\right),$$

Por lo cual despejando los valores correspondientes a los del esquemático proporcionado por el fabricante se tiene lo siguiente:

$$V_{salida} = 1.25 * \left(1 + \frac{10k}{3.3k}\right)$$

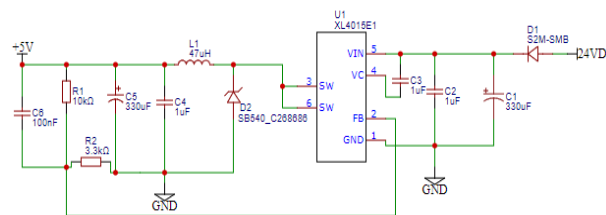
$$V_{salida} = 5.0378VDC$$

Las resistencias tienen tolerancias de +/- 5%, lo que afecta el valor teórico de Vsalida. Sin embargo, la implementación debería mostrar variaciones mínimas.

La etapa de alimentación para el prototipo se ajusta de la siguiente manera:

Figura 17

Circuito de Alimentación

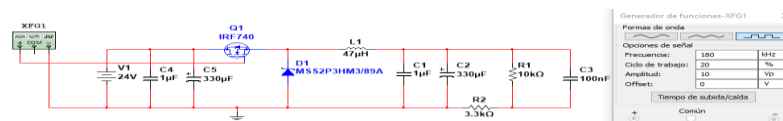


Nota: La figura anterior muestra el circuito modificado para alimentación.
Elaboración propia

En el esquemático, se realizaron ajustes al diseño original del fabricante, como el aumento de la capacitancia de C1 a 330uF para garantizar un voltaje de entrada constante y reducir el rizado. Se incorporó el diodo D1 para prevenir la polarización inversa, y se eligió C5 como 330uF para mantener una salida continua con menor rizado. Se muestra una simulación del convertor DC-DC BUCK para el prototipo, con una frecuencia de operación de 180KHz, siguiendo las especificaciones de (XLSEMI, 2015).

Figura 18

Circuito Básico del Convertor DC-DC

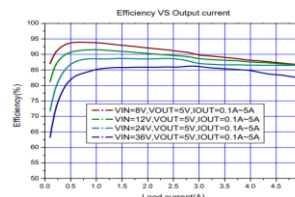


Nota: En la figura se observa el esquemático en base al principio de funcionamiento del convertor DC-DC y los valores de capacitancia e inductancia a ser utilizados en el prototipo. Elaboración propia

La gráfica de simulación del circuito anterior muestra el comportamiento de la tensión de entrada de 24VDC ya que dicho voltaje es el de mayor valor asignado para alimentación y el voltaje de salida 5VDC que se espera obtener en el prototipo. **(Véase anexo 6)**. Se fundamenta que el voltaje de salida no posee picos de tensión por encima de su valor nominal y es contante en el tiempo sin ningún tipo de rizado. El fabricante del convertidor proporciona las curvas detallando la eficiencia de este, dependiendo del voltaje de entrada y salida.

Figura 19

Curvas de Eficiencia



Nota: Eficiencia vs corriente tomada del datasheet del convertidor DC-DC BUCK XL4015

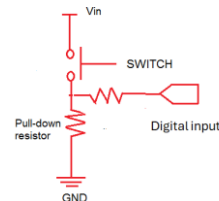
Se muestra que el conversor DC-DC BUCK de 5A, con un voltaje de entrada de 24VDC y salida de 5VDC (Verde turquesa), logra una eficiencia del 88% con una corriente de carga de 1A. Esta eficiencia superior, comparada con el LM2596j (73% de eficiencia con 24VDC de entrada y 3A de carga según (National Semiconductor, 2002) es una razón clave para elegir el conversor DC-DC BUCK XL4015, ya que implica una menor disipación de calor.

6.2.2 Etapa de Entradas Digitales

Las entradas digitales se operarán con voltaje del microcontrolador ESP32 lo cual es 3.3V esto se realizará con una resistencia pull down y un switch que al momento de cerrar energizará el pin de entrada digital del microcontrolador con 3.3V generando un estado lógico en ALTO (1 lógico). Si el pulsador se encuentra abierto, la resistencia pull down establecerá 0V o GND al pin de entrada digital del ESP32 lo cual generará un estado lógico BAJO (0 lógico) con el objetivo de evitar activaciones lógicas no deseadas por voltajes flotantes. **(Veáse Anexo 7)**

Figura 20

Circuito de Entradas Digitales



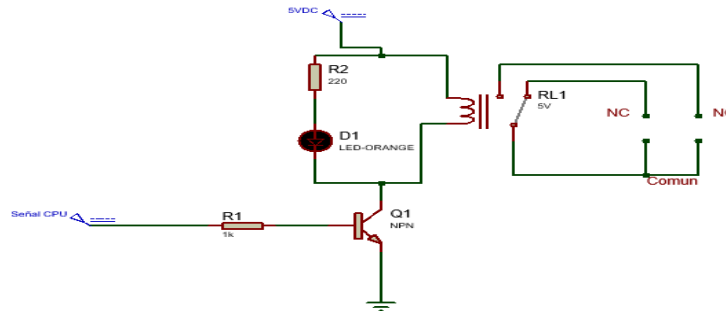
Nota: Circuito Básico de las Entradas Digitales

6.2.3 Etapa de Salidas Digitales

En esta etapa se utilizan transistores, resistencias, diodos supresores, leds indicadores y relevadores para aislar galvánicamente y conectar cargas dentro de límites de corriente cruciales en el control de dispositivos en sistemas de automatización y control. Cuando el ESP32 envía una señal de salida en estado lógico ALTO (3.3V) el transistor conmuta a tierra la bobina del relé y se crea la diferencia de potencial, lo cual cambia de estado los contactos asociados al relevador tal y como se muestra en la figura. **(Veáse Anexo 8)**

Figura 21

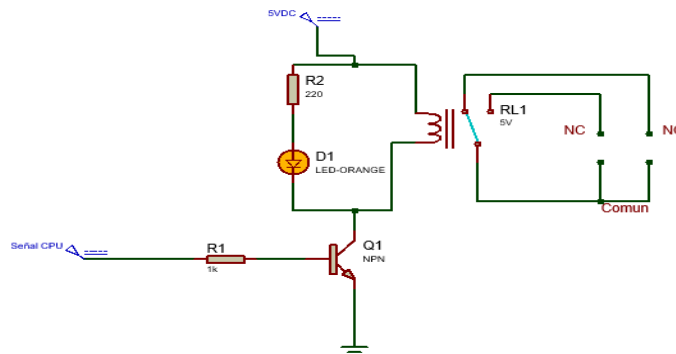
Etapas de Salidas Digitales



Nota: La figura muestra la señal de activación de un transistor desde el ESP32. Cuando se envía una señal HIGH (3.3V), hay una caída de tensión interna en el diodo del transistor NPN, resultando en 2.6V. Esto cierra el circuito de la salida digital, activando el relé y encendiendo el LED indicador, este tiene una resistencia en serie alimentada a 5V, Se realizará una simulación para una señal HIGH proveniente de la ESP32. *Elaboración propia, realizado en Multisim.*

Figura 22

Simulación de la Etapa de Salidas Digitales

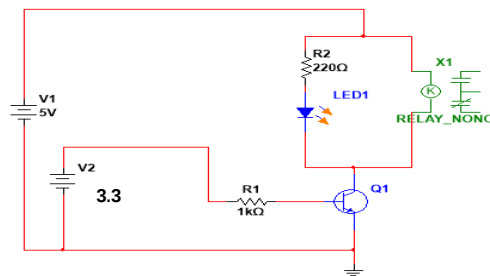


Nota: En la figura, cuando el ESP 32 emite un estado HIGH (3.3V), el transistor conecta a tierra (GND), cerrando el circuito de la bobina del relé y la resistencia en serie con el LED. El relé proporciona aislamiento galvánico, permitiendo el control de cargas de hasta 230V y 4A sin afectar la salida digital. *Elaboración propia, realizado en Multisim.*

Se realiza la simulación correspondiente a análisis de punto operativo CD

Figura 23

Simulación de Análisis de Punto Operativo CD



Nota: La simulación del estado HIGH se logra mediante la fuente V2, ya que Multisim no incluye elementos para simular señales de microcontroladores como Proteus. Este permite realizar estudios detallados de voltaje, corriente y potencia en todos los elementos simulados, facilitando la obtención de datos. *Elaboración propia, realizado en Multisim.*

6.2.4 Etapa Entradas Analógicas

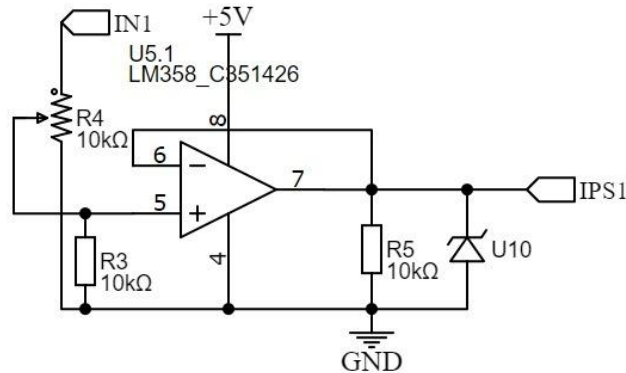
Acorde a (Miyara, 2004). Las señales analógicas son variables eléctricas que evolucionan en el tiempo de manera análoga a alguna variable física, como corriente, tensión o carga eléctrica.

Para mejorar la precisión y estabilidad de las señales analógicas que ingresan al microcontrolador ESP32, se implementó un amplificador operacional, configurado como seguidor de tensión. Esta configuración permite aislar la fuente de señal de la entrada analógica del ESP32, gracias a su alta impedancia de entrada y baja impedancia de salida. Como resultado, se evita la carga de la fuente de señal y se garantiza una entrega precisa de voltaje al convertidor analógico-digital del microcontrolador, minimizando errores por caída de tensión, ruidos o variaciones de carga. Esta técnica es fundamental cuando se trabaja con sensores o señales analógicas débiles y se requiere mantener su integridad.

Se elige un rango de 0-3.3V. El circuito propuesto para la etapa de entradas analógicas consta de amplificadores operacionales en modo seguidor de voltaje, resistencias y potenciómetros de precisión para la calibración de las entradas analógicas.

Figura 24

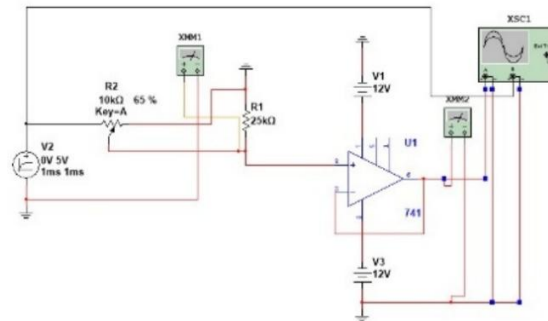
Esquemático de Entradas Analógicas



Nota: En la figura anterior se muestra las entradas analógicas del sensor de corriente ACS712. *Elaboración propia*

Figura 25

Circuito de entradas analógicas

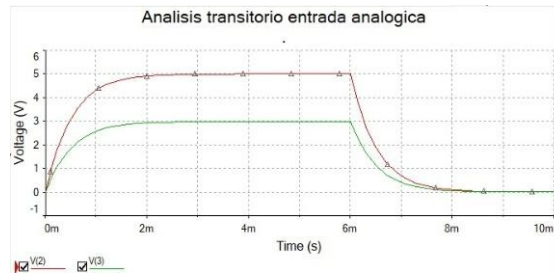


Nota: En la figura anterior se observa el circuito de la etapa de entradas analógicas. *Elaboración propia, realizado en Multisim.*

En la etapa de entrada analógica, se emplea un potenciómetro de precisión como divisor resistivo para calibrar la señal de referencia y adaptarla de 0-5V a 0-3V, compatible con la ESP32. Un amplificador operacional en modo seguidor estabiliza la señal para evitar errores. La simulación transitoria con una fuente de tensión exponencial confirma la estabilidad de la señal análoga simulada desde un sensor. Obteniendo como resultado:

Figura 26

Análisis Transitorio



Nota: En la figura, la señal en rojo simula una entrada analógica de 0-5V de un sensor, mientras que la señal en verde representa la señal analógica de 0-3V que el ESP32 percibiría en su entrada correspondiente. La discrepancia entre ambas señales se debe al divisor de tensión (relación 1.6), lo que significa que para una señal de sensor de 5V, el ESP32 recibiría 3V.

6.2.5 Diseño de la PCB para el prototipo

Para el diseño de la PCB del prototipo, se utilizará el software EasyEda, que proporciona una amplia gama de componentes electrónicos disponibles para su compra online. Esto facilita el diseño y posterior construcción del prototipo, asegurando una colocación precisa de los componentes y una gestión eficiente del espacio. El diseño PCB reflejará exactamente el circuito ensamblado, evitando imprevistos o errores durante la implementación. Se realizarán todas las etapas previas del diseño PCB, con la selección cuidadosa de los componentes y conexiones eléctricas necesarios para cada fase del prototipo.

El prototipo de control consta de 2 tomas de GND esto para la mejor distribución y conexión de elementos externos que trabajen a diferentes voltajes, posee 7 entradas analógicas, 10 entradas digitales y 4 salidas tipo relevadores.

Una vez teniendo el esquemático realizado en el software Easyeda con todos los componentes electrónicos especificados y cada una de sus etapas **(Veáse Anexo 9)** se procede a utilizar la herramienta del software ``Convertir

esquemático a PCB`` la cual es la siguiente opción convertir esquemático a PCB.

Al seleccionar la opción, se abrirá una nueva ventana para ingresar el tamaño de la tarjeta PCB y el número de capas deseadas. Para nuestro prototipo, se ha asignado una dimensión de 10 cm de ancho y 13 cm de largo. Para un diseño compacto optamos por dos capas (superior e inferior).

Luego de eso todos los componentes aparecen en la pantalla y también aparecerá la delimitación de la tarjeta PCB según sea el tamaño asignado en nuestro caso es de 10cm x 13cm a como se detalló anteriormente, todo lo antes dicho **(Véase anexo 10)**

Para trazar las pistas electrónicas en la tarjeta PCB, es esencial considerar el amperaje circulante y el ancho de las pistas. La corriente de diseño de la tarjeta es de 1A esto debido al consumo de los componentes relés, controlador, led y OPAM.

Para diseñar la PCB se respetará la norma IPC2221 que detalla los requerimientos mínimos sobre ancho de pistas dependiendo de la capacidad de corriente que circular por dichas pistas de cobre dependiendo del grosor de la pista, también indican las distancias de separación entre pistas en cuanto a la cantidad de voltaje que vaya a ser utilizada nuestra tarjeta PCB. Para hacer más sencillo el proceso de cumplimiento de la Norma IPC2221 se utilizó un software de diseño y simulación de diseño electrónico básico llamado Kicad que proporciona una herramienta que lleva por nombre "calculator tools", está diseñado bajo la norma antes mencionada. **(Véase anexo 11)**

Se considerará un aumento de temperatura de 20°C para calcular el ancho de la pista. La temperatura ambiente se establecerá en 25°C, y el cálculo se basará en una temperatura máxima de diseño de 45°C.

Figura 27

Anchos de Pista de Capa Superior e Inferior

Herramientas de cálculo

- Diseño general del sistema
 - Reguladores
 - Potencia, corriente y aislamiento
 - Espaciado eléctrico
 - Diámetro Via
 - Ancho de pista
 - Corriente de fusión
 - Tamaño de cable
- Alta velocidad
 - Longitud de onda
 - Atenuadores RF
 - Líneas de transmisión
- Memo
 - Serie E
 - Código color
 - Clases de placas
 - Corrosión galvánica

Parámetros

Corriente (I): 1.5 A

Aumento de temperatura (ΔT): 20 °C

Longitud del conductor: 0 mm

Resistividad del cobre: 1.72e-08 Ω·m

Si especifica la corriente máxima, se calculará el grosor de pista adecuado.

Si especifica uno de los grosores de pista, se calculará la corriente máxima que puede manejar. También se calculará el grosor de la otra pista para que pueda manejar esa corriente.

El valor de control se muestra en negrita.

Los cálculos son válidos para corrientes de hasta 35 A (pistas externas) o 17.5 A (pistas internas), aumentos de temperatura de hasta 100 °C y grosores de hasta 400 mils (10 mm).

La fórmula, de IPC 2221, es

$$I = K \cdot \Delta T^{0.44} \cdot (W \cdot H)^{0.726}$$

donde

- I es la corriente máxima en A
- ΔT es el aumento de temperatura por encima del ambiente en °C
- W es el ancho en mils
- H es el espesor (altura) en mils
- K es 0.024 para pistas internas o 0.048 para pistas externas

Pistas de la capa externa

Ancho de pista (W): 0.351059 mm

Grosor de pista (H): 1 oz/ft²

Área de sección: 0.0120764 mm²

Resistencia: 0 Ω

Caida de voltaje: 0 V

Pérdida de potencia: 0 W

Pistas de la capa interna

Ancho de pista (W): 0.91326 mm

Grosor de pista (H): 1 oz/ft²

Área de sección: 0.0314161 mm²

Resistencia: 0 Ω

Caida de voltaje: 0 V

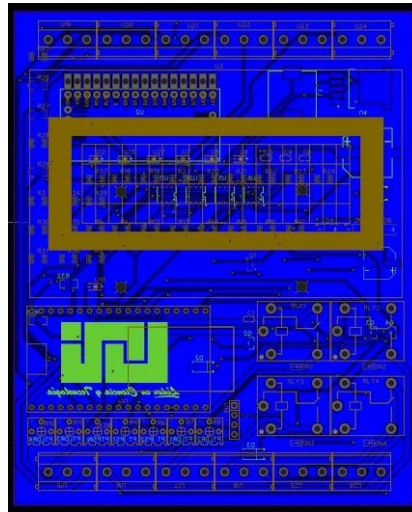
Pérdida de potencia: 0 W

Nota: La figura anterior nos indica 2 valores de anchos de pista; en la parte derecha estas son pistas de la capa externa o pistas de la capa interna, el diseño de PCB se realiza con pistas de capa de tipo externa. A continuación, se muestra detalles sobre la ubicación de pistas tanto interna o externa. *Fuente propia, realizado en Kicad.*

La PCB del prototipo tendrá solo dos capas, superior e inferior, con pistas externas. Para concluir esta etapa se agregan las capas de tierra en la capa superior e inferior de la PCB esto debido a que según (Santiago Silvestre, 2019) los retornos de corriente deben consistir en planos de tierra de área grande para baja impedancia a corrientes de alta frecuencia con el fin de evitar resistencias e inductancias parásitas, especialmente a frecuencias altas. Los planos de masa o de tierra proporcionan una conexión a tierra de baja impedancia. Así mismo los planos de tierra minimizarán las emisiones de Radio Frecuencias. A continuación, se presentan las capas superior e inferior de la tarjeta.

Figura 28

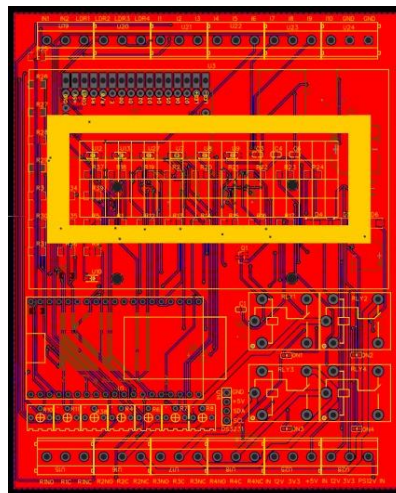
Parte Superior de la PCB



Nota: *Elaboración propia, realizado en EasyEDA*

Figura 29

Parte Inferior de la PCB



Nota: *Elaboración propia, realizado en EasyEDA*

6.2.6 *Diseño de la Placa de Sensores LDR*

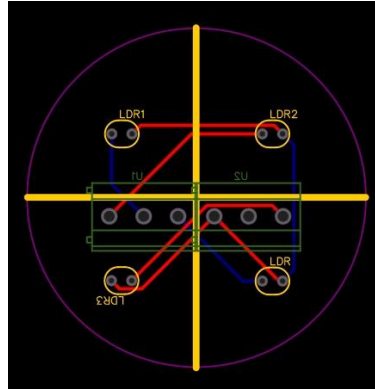
La tarjeta de sensores basada en LDR (fotorresistencias) constituye el elemento fundamental del sistema de percepción luminosa en un sistema de seguimiento solar de doble eje (cenital y azimutal). Esta tarjeta está diseñada con cuatro sensores LDR distribuidos en forma de cruz o cuadrante (norte, sur, este y oeste), separados por barreras físicas opacas en forma de cruz o con un cilindro central que genera sombra. Esta disposición permite que la luz solar incida de manera diferencial sobre cada sensor, dependiendo de la orientación del sistema respecto al sol.

El principio de funcionamiento se basa en la variación de resistencia de cada LDR en función de la intensidad lumínica recibida. Cuando la luz solar incide perpendicularmente sobre la tarjeta, los cuatro LDR reciben la misma cantidad de luz, generando un equilibrio de voltaje en sus salidas, que es interpretado por un microcontrolador como una posición óptima. Si el sistema se encuentra desalineado respecto al sol, uno o varios sensores recibirán menos luz debido a la sombra proyectada por el obstáculo central, lo que aumenta su resistencia y disminuye el voltaje de salida en ese canal. El microcontrolador o sistema de control analiza estas diferencias de voltaje y calcula la dirección de corrección necesaria.

Con base en esa diferencia de iluminación entre cuadrantes, el sistema genera una señal de control para accionar uno o ambos actuadores lineales, corrigiendo la orientación en el eje cenital (X) o azimutal (Y), hasta que se restaure el equilibrio lumínico entre los sensores. Este mecanismo de retroalimentación permite mantener el plano del panel fotovoltaico alineado ortogonalmente a los rayos solares a lo largo del día, maximizando la captación energética. La tarjeta LDR, por tanto, actúa como un sistema sensor pasivo, de bajo consumo y alta confiabilidad, que reemplaza sensores ópticos complejos en aplicaciones de automatización solar con precisión adecuada para sistemas didácticos y de pequeña escala.

Figura 30

Tarjeta Sensores LDR



Nota: La figura anterior muestra la tarjeta diseñada para censar la luz incidente en los cuadrantes y así se realice de forma automática el posicionamiento de los paneles fotovoltaicos. *Fuente Propia*

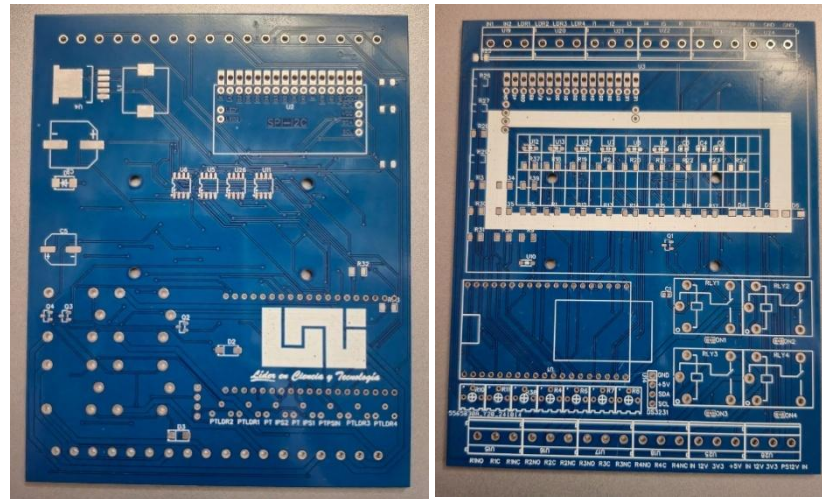
Teniendo todo lo anterior se exporta el archivo Gerber del diseño de prototipo y se sube a la página de fabricación de circuitos impresos JLCPCB y se configura según los requerimientos tales como color de placa, grosor de pistas.

Todo lo anterior detalla los requerimientos que se desean tener para el prototipo, esto no tiene ninguna norma que indique cual seleccionar ya que es a criterio propio, por tanto, se es libre de seleccionar las opciones, en la mayoría de los casos modificar una de las características antes mostradas, que son las que por defecto supone un aumento brusco del precio de fabricación de hasta 5 veces más lo que costaría fabricar la PCB con las características que nos brinda JLCPCB por defecto.

Una vez en proceso de fabricación, la fábrica JLCPCB realiza múltiples pruebas a las tarjetas de circuito impreso (PCB) tales como inspección óptica automática (AOI), mascara de soldadura y prueba eléctrica. Una vez la empresa JLCPCB habiendo realizado todo lo anterior se nos entregó las tarjetas de circuito impreso de la siguiente forma:

Figura 31

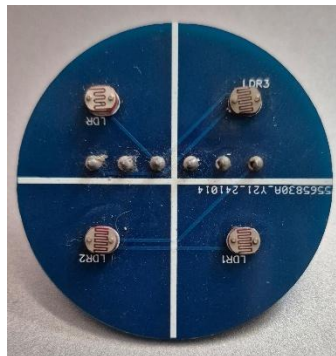
Tarjeta PCB Diseñada



Nota: Fuente propia

Figura 32

Tarjeta de Sensor LDR



Nota: En la figura anterior se muestra la tarjeta de sensores sobre los que incidirá la luz solar. *Fuente Propia*

6.3 Diseño y Selección de los Equipos Eléctricos Principales del Sistema Fotovoltaico con Control de Seguimiento Solar.

6.3.1 Selección del Inversor

En un sistema fotovoltaico de pequeña escala, como el configurado con dos paneles solares de 100W cada uno, la selección e integración de los componentes es crucial para garantizar una conversión eficiente de la energía y una operación segura y estable. Cada panel solar de 100W, bajo condiciones estándar de prueba, típicamente entrega un voltaje en el punto de máxima potencia (V_{mp}) de aproximadamente 18V y una corriente (I_{mp}) de alrededor de 5.5A. Al conectar dos paneles en paralelo (opción más común para sistemas de 12V), el voltaje se mantiene en 18V, mientras que la corriente total se duplica (11A). Si se conectan en serie, el voltaje se duplicaría (36V) y la corriente se mantendría (5.5A), lo cual depende del diseño del sistema y del controlador de carga utilizado.

En la selección del inversor, se optó por usar un inversor de tipo onda cuadrada por ser este de un menor precio debido a que es un prototipo, y no se requiere una alta eficiencia en la conversión de energía de DC a AC. Pese a que la generación máxima instantánea de los paneles es de aproximadamente 200W, se optó por seleccionar una potencia nominal en el inversor de 1000W, ya que esto proporciona ventajas clave como la capacidad de manejar cargas variables y picos de arranque sin riesgo de sobrecarga, así como una mayor flexibilidad para futuras ampliaciones del sistema, como la incorporación de más paneles solares o el aumento del almacenamiento en baterías.

El uso de dos paneles de 100W junto con un inversor de 1000W es una configuración técnicamente viable y flexible, que permite alimentar una amplia gama de cargas, siempre que se integre un sistema de almacenamiento (batería) bien dimensionado y un controlador de carga eficiente. Esta combinación optimiza el rendimiento general del sistema, mejora su confiabilidad y protege los componentes electrónicos involucrados. **(Véase Anexo 12)**

6.3.2 Selección del Controlador de Carga

En un sistema fotovoltaico, el controlador de carga cumple una función esencial como elemento regulador entre los módulos solares y el banco de baterías. Su principal objetivo es gestionar de forma eficiente y segura el proceso de carga, evitando situaciones que puedan comprometer la integridad del sistema, como la sobrecarga de las baterías, la descarga profunda o las corrientes inversas durante la noche. La ausencia de un controlador puede generar fallas prematuras en los acumuladores, disminución del rendimiento energético del sistema y, en casos extremos, daños permanentes en los componentes. Además, los controladores modernos incorporan protecciones electrónicas y funciones de monitoreo que aseguran una operación estable, prolongan la vida útil de las baterías y permiten una supervisión continua del estado del sistema.

Para el caso específico de un sistema fotovoltaico conformado por dos paneles de 100 W conectados en paralelo, la elección de un controlador de carga tipo PWM con voltaje nominal de operación de 12/24 V y corriente nominal de 30 A responde a un análisis técnico basado en el dimensionamiento de carga y las condiciones de operación. Los paneles, con una tensión típica de operación de 18 V y una corriente individual cercana a los 5.5 A, aportan conjuntamente aproximadamente 11A a la entrada del controlador. Al emplearse una batería de 12 V como banco de almacenamiento, el controlador debe ser capaz de reducir y estabilizar la tensión de entrada a un nivel adecuado para la carga segura de la batería, tarea que el regulador PWM realiza mediante modulación por ancho de pulso, adaptando la tensión sin modificar significativamente la corriente.

La capacidad de 30 A del controlador ofrece un margen operativo suficiente por encima de la corriente generada, lo cual es una buena práctica de ingeniería. Este margen asegura que el dispositivo funcione dentro de parámetros térmicos y eléctricos seguros, incluso en condiciones de máxima

irradiancia o temperaturas bajas, donde la corriente de salida de los paneles puede superar su valor nominal.

Además, esta capacidad adicional permite prever futuras expansiones del sistema sin necesidad de reemplazar el controlador. La compatibilidad con sistemas de 12 V y 24 V agrega versatilidad al diseño, permitiendo su adaptación a diferentes topologías de sistemas según las necesidades del usuario.

Desde una perspectiva ingenieril, la elección de un controlador PWM de 12/24 V y 30 A garantiza la protección, estabilidad y eficiencia operativa del sistema fotovoltaico, cumpliendo con los criterios técnicos requeridos para asegurar una transferencia energética confiable desde los paneles hacia el banco de baterías, al tiempo que preserva la vida útil de todos los componentes involucrados. **(Véase Anexo 13)**

6.3.3 Actuadores Lineales

En el diseño de un sistema de seguimiento solar de doble eje, uno de los elementos críticos es la selección adecuada de los actuadores lineales encargados de generar el movimiento mecánico de la estructura que sostiene los paneles fotovoltaicos. Para este prototipo, se optó por la instalación de dos actuadores lineales con capacidad de empuje de 1000 N (aproximadamente 100 kgf), uno para cada eje de movimiento. Esta decisión técnica se fundamenta en un análisis de cargas estáticas y dinámicas: Los paneles considerados tienen una potencia nominal de 100 W cada uno y un peso aproximado de 8 kg, lo que representa una carga total neta de 16 kg más el peso adicional de la estructura de soporte, las bisagras, y los elementos de transmisión de movimiento. Sin embargo, el cálculo estructural debe contemplar no solo la carga muerta (peso propio del sistema), sino también las cargas vivas inducidas por factores externos como el viento, aceleraciones durante el cambio de posición, y el efecto palanca debido a la excentricidad de los ejes de rotación respecto al centro de masa de los paneles.

Desde el punto de vista del diseño mecánico, se considera un factor de seguridad mínimo de 3 sobre la carga esperada, especialmente en sistemas expuestos a la intemperie. Esto significa que, aunque la carga estimada por eje sea de alrededor de 10–12 kg, se dimensiona el actuador para soportar al menos 30–40 kg, lo cual justifica el uso de actuadores de 1000 N. Adicionalmente, la elección de estos actuadores permite obtener una mayor precisión en el posicionamiento angular del sistema, ya que generalmente estos dispositivos poseen husillos de paso fino que mejoran la resolución del movimiento, lo cual es clave en sistemas de seguimiento solar que buscan maximizar la captación de irradiancia. También se priorizó la compatibilidad con sistemas de control basados en microcontroladores como el ESP32, asegurando que el voltaje y corriente de operación de los actuadores se encuentren dentro de los márgenes manejables por el sistema de potencia. Finalmente, esta capacidad adicional de carga permite considerar escenarios futuros de escalabilidad. **(Veáse Anexo 14)**

6.3.4 Gabinete de control

La selección de un gabinete metálico de dimensiones 300x400 mm representa una decisión crítica en el diseño del sistema de control para un seguidor solar de dos ejes, ya que debe garantizar el alojamiento adecuado de todos los componentes eléctricos y electrónicos involucrados. Esta envolvente debe cumplir con requisitos técnicos de espacio interno, resistencia mecánica y protección ambiental para contener de forma eficiente la tarjeta de control, pulsadores de direccionamiento, selector de modo automático/manual, controlador de carga e inversor, permitiendo una distribución ergonómica y segura conforme a normas de instalación eléctrica.

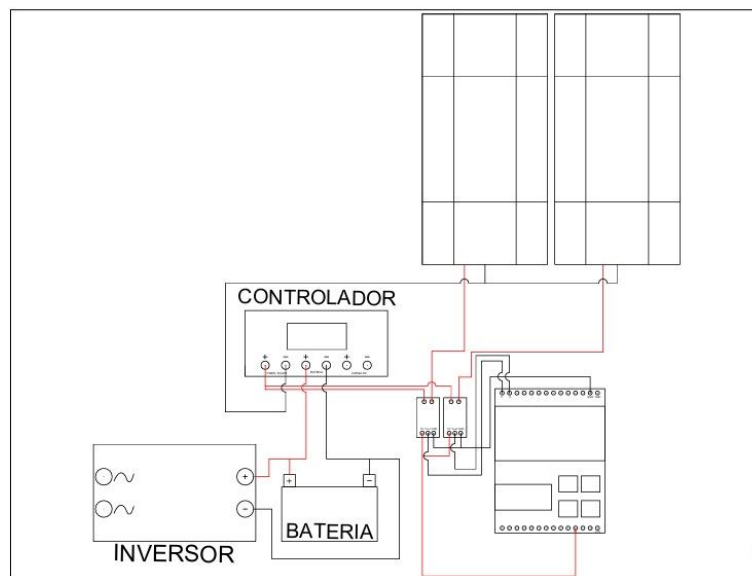
El gabinete metálico ofrece ventajas significativas en términos de blindaje electromagnético (EMC), lo cual es fundamental para sistemas donde conviven señales de baja potencia (control) y alta potencia (carga e inversor). La estructura metálica actúa como una barrera física que mitiga interferencias externas y protege la integridad de las señales de control, reduciendo el riesgo de fallos en el seguimiento solar por perturbaciones electromagnéticas. Además,

sus dimensiones permiten la integración de canaletas que aseguran una correcta gestión del cableado interno, facilitando el diagnóstico y mantenimiento preventivo o correctivo del sistema.

Finalmente, el volumen disponible en un gabinete de 300x400 mm permite una adecuada disipación térmica de los dispositivos que generan calor, como el inversor y el controlador de carga. En un entorno exterior, donde las condiciones térmicas pueden ser variables, es crucial prever una correcta ventilación pasiva o activa para evitar sobretensiones que reduzcan la vida útil de los componentes. La elección de un gabinete metálico con posibilidad de sellado hermético (IP65 o superior) y estructura resistente a la intemperie asegura no solo la durabilidad del sistema, sino también la confiabilidad operativa bajo condiciones ambientales adversas, cumpliendo con los criterios de diseño de sistemas fotovoltaicos eficientes y seguros.

Figura 33

Diagrama unifilar del conjunto eléctrico



Nota: La figura anterior muestra los componentes principales del sistema fotovoltaico. *Elaboración propia*

6.4 Diseño Mecánico de la Estructura

Este diseño mecánico corresponde a una estructura de soporte articulada para un sistema de seguimiento solar (ejes X e Y), destinada a operar con dos paneles fotovoltaicos de 100 W (cada uno de 1200 mm de alto, 540 mm de ancho y peso individual de 8 kg), un gabinete de control metálico de 300x400 mm montado a 70 cm del suelo, y dos actuadores lineales de 1000 N de capacidad, utilizados para el posicionamiento automático en ambos ejes. La estructura fue fabricada empleando perfiles metálicos tubulares de acero al carbono y elementos de unión atornillados y soldados, dimensionados para resistir cargas de viento, peso propio y esfuerzos inducidos por el movimiento, con un factor de seguridad mínimo de 2.5.

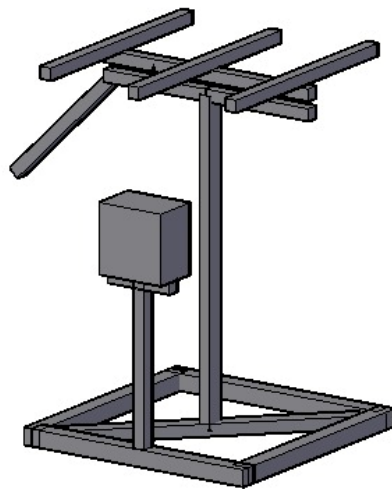
La base de la estructura está compuesta por un marco cuadrado de 1 m x 1 m, construido con tubo estructural cuadrado de 3"x3" (76.2 mm), que proporciona una base rígida y estable, ideal para resistir momentos de vuelco y torsión. Sobre esta base se erige el sistema de izado vertical, conformado por dos tubos rectangulares de 3"x2" (76.2 mm x 50.8 mm) de 1.40 m de longitud, soldados verticalmente y reforzados para soportar el eje de rotación azimutal (eje Y), el eje Y está construido con un tubo cuadrado de 2"x2" y 1 m de longitud, montado transversalmente en la parte superior del sistema de izado. Este eje es accionado por uno de los actuadores lineales de 1000 N, instalado entre la base y un brazo de palanca conectado al tubo giratorio mediante un sistema articulado con chapa de acero de 5 mm y pernos de 3/8", permitiendo una rotación precisa y sin juegos mecánicos.

El eje X, correspondiente a la inclinación de los paneles, se conforma mediante otro tubo cuadrado de 2"x2" y 1 m de longitud, montado perpendicular al eje (Y), y soportado por tres tubos adicionales de 2"x2", que forman el bastidor móvil donde se fijan los dos paneles fotovoltaicos. El segundo actuador lineal de 1000 N se conecta entre el eje Y y este bastidor, generando el ajuste cenital.

Todas las uniones estructurales se realizan mediante placas metálicas de 6"x6"x1/8" y pernos 3/8"x2", complementados con 20 tuercas y arandelas para asegurar firmeza y facilitar el desmontaje. Las zonas críticas y puntos de carga reciben refuerzo mediante soldadura tipo E6011 de 3/32", garantizando la integridad estructural bajo condiciones de operación continua en exteriores. El gabinete metálico se instala sobre una ménsula rígida de 70 cm soldada al tubo principal de soporte, protegida de contacto con el suelo y facilitando la instalación eléctrica. Este diseño permite una operación precisa, segura y duradera del sistema solar con seguimiento activo en condiciones reales de servicio.

Figura 34

Estructura de soporte del Sistema



Nota: La figura anterior muestra la estructura de soporte para los componentes eléctricos y electrónicos del sistema fotovoltaico. *Fuente Propia*

VII. Construcción y Ensamble de Componentes Electrónicos, Eléctricos y Mecánicos

7.1 Introducción

La construcción y el ensamble de los componentes electrónicos, eléctricos y mecánicos constituyen una etapa clave para dar forma al prototipo del sistema fotovoltaico con seguimiento solar en dos ejes. A partir del diseño previo, se trabaja en la fabricación de la estructura metálica que sostiene los paneles, el montaje del sistema de actuadores lineales para el movimiento en los ejes X y Y, y la integración del gabinete de control con todos los elementos del sistema.

Durante esta fase, se lleva a cabo la instalación del controlador de carga, el inversor, los sensores LDR para el seguimiento solar automático, los pulsadores de control manual, los finales de carrera como elementos de seguridad mecánica, y el selector que permite cambiar entre los modos de operación automática y manual. Todo el sistema eléctrico se organiza de forma ordenada, con canalización adecuada, protecciones básicas y una disposición que facilita tanto la operación como futuras tareas de mantenimiento.

El proceso de ensamble requiere una combinación de precisión técnica y criterios prácticos, cuidando la alineación de los ejes, la estabilidad estructural del soporte y la correcta interacción entre los subsistemas. A medida que se integran los componentes, se realizan ajustes para asegurar que el sistema responda correctamente a las señales de control y a las condiciones de luz, logrando así un funcionamiento fluido, confiable y representativo de un sistema de seguimiento solar real.

7.1.1 Ensamble Electrónico

Para el proceso de ensamble de todos los componentes electrónicos en la tarjeta PCB se utilizó las herramientas como cautín, Pistola de aire caliente, pinzas para componentes SMD, estaño, estaño en pasta, fluxe, microscopio digital, malla de desoldar y extractor de estaño.

Figura 35

Microscopio Utilizado para Ensamble de Componentes SMD



Nota: Se muestra el proceso de soldadura de resistencia SMD sosteniéndolo con las pinzas de precisión para componentes SMD, estaño en pasta y pistola de aire caliente. *Fuente Propia*

Habiendo realizado todo el proceso de soldadura para todos los componentes SMD de la tarjeta PCB del prototipo obtuvimos el siguiente resultado:

Figura 36

Resultado del Proceso de Soldadura de los Componentes SMD



Nota: *Fuente Propia*

7.1.2 Ensamble Eléctrico

El ensamble eléctrico del sistema fotovoltaico con control de seguimiento solar de doble eje fue diseñado para integrar la generación, conversión, control y actuación del movimiento automático de los paneles, garantizando eficiencia energética y operación segura. El sistema se alimenta a partir de dos paneles fotovoltaicos de 100W conectados en paralelo, generando una tensión de trabajo nominal de 12V DC. Esta energía es regulada por un controlador de carga tipo PWM, que gestiona la entrega de energía a la batería y protege contra

sobrecarga, sobredescarga y sobrecorriente. Desde la batería, se alimenta un inversor de 1000 W encargado de suministrar corriente alterna a cargas externas, si se requiere, y mantener operativo el sistema de control bajo variaciones solares.

El corazón del sistema de control se encuentra dentro del gabinete metálico, donde se organizan los elementos de comando y señalización. Se instalaron cuatro pulsadores industriales que representan los grados de libertad del sistema: subida y bajada para el eje cenital (X) y giro en sentido horario y antihorario para el eje azimutal (Y). Estos pulsadores están conectados a una interfaz de control basada en relés o microcontrolador ESP32, permitiendo la activación manual de los dos actuadores lineales de 1000 N. Un selector de modo (manual/automático) permite cambiar entre el control directo por usuario y el control automático por sensores. En modo automático, el sistema opera en función de un sensor compuesto por cuatro fotorresistencias (LDR) dispuestas en una configuración de matriz cruzada para detectar diferencias de iluminación en los cuatro cuadrantes. Estas señales analógicas son procesadas por la tarjeta de control, la cual determina el eje y sentido de movimiento necesarios para optimizar la captación solar.

Para proteger los actuadores y evitar daños mecánicos por sobrecarrera, se incorporaron cuatro finales de carrera (Dos por eje), conectados en serie con el circuito de activación de los actuadores. Estos interruptores limitan el recorrido físico del sistema, deteniendo automáticamente el movimiento cuando se alcanza el límite mecánico preestablecido.

Figura 37

Componentes Eléctricos Principales Ensamblados



Nota: La figura anterior muestra contenido en el gabinete metálico el Inversor, controlador, tarjeta de control, pulsadores y selectores. Así como en la estructura se puede apreciar los finales de carrera y actuadores lineales. *Fuente Propia*

7.1.3 Ensamble Mecánico

El ensamble mecánico de la estructura de soporte para el sistema de seguimiento solar en dos ejes se inició con la fabricación y armado de la base principal, la cual se conformó con tubo estructural cuadrado de 3"x3", formando un marco de 1 m x 1 m mediante cortes a escuadra y uniones a tope. Las esquinas se reforzaron mediante soldadura con electrodo E6011 de 3/32", asegurando continuidad estructural y rigidez del conjunto. Sobre esta base se fijaron los tubos de izado vertical (3"x2" y 1.40 m de longitud), también soldados, los cuales actúan como soporte del eje Y, garantizando alineación perpendicular respecto al plano de la base. Durante esta etapa, se utilizaron escuadras metálicas y niveladores para asegurar precisión geométrica.

Una vez completada la estructura fija, se procedió a instalar el eje Y utilizando un tubo de 2"x2" y 1 m de longitud, el cual fue montado transversalmente en la parte superior del sistema de izaje. Se utilizaron chapas metálicas de 5 mm como elementos de articulación, fijadas con pernos de 3/8" y

arandelas, permitiendo el giro libre del eje. Posteriormente, se instaló el actuador lineal de 1000 N correspondiente al movimiento azimutal, fijando un extremo al marco base y el otro a un brazo de palanca soldado al tubo giratorio. Este actuador fue alineado cuidadosamente para evitar esfuerzos laterales durante su operación, asegurando así un desplazamiento uniforme y sin interferencias.

Finalmente, se ensambló el eje X (inclinación), compuesto por un bastidor móvil fabricado con tres tubos de 2"x2", sobre el cual se fijaron los paneles fotovoltaicos mediante soportes y placas metálicas de 6"x6"x1/8". Este bastidor se articuló sobre el eje Y con placas y pernos de 3/8", formando una estructura basculante. El segundo actuador lineal de 1000 N se instaló entre el eje Y y el bastidor móvil, con su eje alineado al centro de masa del conjunto para una operación equilibrada. Paralelamente, se construyó y montó una ménsula de 70 cm en uno de los laterales del tubo principal de izaje, destinada a alojar el gabinete metálico de control (300x400 mm), el cual fue fijado mediante tornillería estándar. Con esto se completó el ensamble mecánico, cumpliendo con los criterios de alineación, fijación segura y facilidad de mantenimiento.

Figura 38

Estructura de Soporte Ensamblada



Nota: La figura anterior muestra la estructura de soporte final con los componentes. *Fuente Propia*

VIII. Pruebas del sistema fotovoltaico

8.1 Introducción

Con el fin de evaluar el desempeño energético del sistema fotovoltaico con control de seguimiento solar, se realizan pruebas comparativas frente a un sistema fotovoltaico fijo de iguales características. Estas pruebas permiten cuantificar la diferencia en la captación de radiación solar y la generación de energía, bajo condiciones ambientales similares y en intervalos de tiempo definidos, manteniendo ambos sistemas operando simultáneamente.

El análisis se enfoca en registrar y comparar parámetros eléctricos como la corriente, tensión y potencia generada por ambos sistemas a lo largo del día. Los datos obtenidos permiten determinar la eficiencia relativa del sistema con seguimiento solar, validando su capacidad para maximizar el aprovechamiento de la radiación incidente mediante el ajuste dinámico de la orientación de los paneles en los ejes X y Y.

8.2 Pruebas Comparativas

En la tabla que se muestra a continuación, la potencia generada por un panel solar de 100 W en dos configuraciones: una fija (estática) y otra con seguimiento solar de doble eje, durante el horario de 6:00 a 17:00 en un día despejado típico en Managua, Nicaragua. El ángulo de incidencia de los rayos solares varía significativamente entre la mañana, el mediodía y la tarde, lo que justifica la necesidad de un sistema de seguimiento para aprovechar mejor la radiación disponible durante todo el día.

En la prueba, el panel estático alcanza su máxima potencia (100 W) al mediodía, cuando el sol está más perpendicular al plano del panel. Sin embargo, en las horas tempranas y finales del día, la potencia cae drásticamente debido al ángulo oblicuo de incidencia solar, generando tan solo 2 W a las 6:00 h y 10 W a las 17:00 h. Por otro lado, el panel con seguimiento solar de doble eje mantiene un ángulo óptimo respecto al sol durante todo el día, lo que le permite generar potencias significativamente mayores en las mismas horas. Por ejemplo, a las

6:00 h genera 10 W, y a las 17:00 h genera 25 W, reflejando una mejor captación desde el amanecer hasta el atardecer.

Desde una perspectiva técnica, este comportamiento se debe a que el sistema de seguimiento compensa el cambio del ángulo solar tanto en azimut (movimiento horizontal del sol de este a oeste) como en elevación (altura del sol respecto al horizonte), maximizando el flujo de irradiancia directa que incide perpendicularmente sobre la superficie del panel. En el caso específico de Managua, donde los días suelen ser soleados y con trayectorias solares bien definidas, el seguimiento puede incrementar la generación diaria de energía en más del 30%. Como muestra la tabla, el panel con seguimiento genera 740 Wh diarios, frente a los 557 Wh del panel estático. Esta diferencia representa una ventaja significativa en aplicaciones donde se requiere mayor rendimiento energético en espacios reducidos o con alta demanda energética.

Figura 39

Comparativa de Potencia Generada

Hora	Irradiancia Relativa (%)	Potencia Panel Estático (W)	Potencia Panel con Seguimiento (W)
06:00	10%	2	10
07:00	25%	10	25
08:00	45%	25	45
09:00	65%	40	65
10:00	80%	55	80
11:00	90%	75	90
12:00	100%	100	100
13:00	95%	90	95
14:00	85%	70	85
15:00	70%	50	70
16:00	50%	30	50
17:00	25%	10	25
Total	—	557 W·h	740 W·h

Nota: Fuente Propia

IX. Manual y Guía de Aprendizaje para Docentes y estudiantes.

9.1 Guía de Conceptos Básicos

¿Qué es un sistema fotovoltaico?

Los sistemas fotovoltaicos permiten aprovechar la energía solar mediante la conversión directa de la radiación solar en electricidad utilizando el efecto fotovoltaico. Estos sistemas pueden ser autónomos (fuera de red) o conectados a red, y están compuestos por diversos elementos eléctricos, electrónicos y de almacenamiento que deben seleccionarse adecuadamente según la demanda energética y las condiciones de operación.

Sistemas Fotovoltaicos Aislados de la Red

Un sistema fotovoltaico aislado de la red es un sistema de energía solar que funciona de manera independiente a la red eléctrica pública. En lugar de depender de la electricidad de la red, utiliza paneles solares para generar electricidad y baterías para almacenarla y utilizarla cuando sea necesario, incluso en ausencia de luz solar.

Componentes Básicos del Sistema Aislado de la Red

Paneles Fotovoltaicos: Son dispositivos compuestos por células solares que capturan la radiación solar y la convierten en corriente continua (DC). Su capacidad se mide en watts pico (Wp), y su rendimiento depende de la irradiación, orientación, inclinación y temperatura.

- **Potencia máxima (P_{max}):** La potencia nominal bajo condiciones estándar.
- **Voltaje de operación (V_{mp}):** El voltaje en el que el panel entrega su máxima potencia.
- **Corriente de operación (I_{mp}):** la corriente correspondiente al V_{mp} .

Controlador de Carga: Este equipo regula el flujo de energía desde los paneles hacia las baterías. Protege las baterías contra sobrecarga y sobredescarga. Existen dos tipos comunes: PWM (modulación por ancho de

pulso) y MPPT (seguimiento del punto de máxima potencia), siendo este último más eficiente.

- **PWM (Modulación por ancho de pulso):**
 - Económico y sencillo.
 - Funciona mejor cuando el voltaje del panel es cercano al de la batería.
 - No maximiza el punto de operación del panel.
- **MPPT (Seguidor de punto de máxima potencia):**
 - Más complejo y eficiente.
 - Ajusta el voltaje de entrada para operar en el punto óptimo del panel.
 - Puede aumentar entre un 15-30% la recolección energética.

Batería: Acumula la energía producida por los paneles para ser usada durante la noche o en días nublados.

- Tipos comunes: plomo-ácido, AGM, gel, litio.
- Importante considerar:
 - Capacidad (Ah)
 - Voltaje nominal
 - Profundidad de descarga permitida

Inversor: Convierte la energía almacenada en corriente continua (DC) a corriente alterna (AC), que es la forma estándar de energía utilizada en los hogares. Puede ser de onda senoidal pura (ideal), modificada o cuadrada.

Sistemas Fotovoltaicos con Control de Seguimiento Solar

Este tipo de sistema mejora la eficiencia de generación al seguir la trayectoria del sol, manteniendo la orientación óptima de los paneles a lo largo del día. Los sistemas con **seguimiento solar en dos ejes** (horizontal y vertical) logran aprovechar al máximo la radiación solar directa.

Componentes adicionales:

- **Actuadores lineales:** Mueven los paneles para ajustar la posición.
- **Sensores LDR:** Detectan la mayor intensidad de luz solar.
- **Controlador ESP32:** Recibe señales de los sensores y activa el movimiento.

9.2 Formulario de Preguntas

Es este apartado se indica un código QR para que los estudiantes respondan las preguntas de evaluación.



9.3 Guía Práctica para Estudiantes: Prueba de Rendimiento

Objetivo: Evaluar el rendimiento del sistema fotovoltaico con seguimiento solar en dos ejes durante las horas de mayor radiación solar (11:00 a.m. – 3:00 p.m.).

Materiales:

- Multímetro
- Hoja de datos
- Calculadora

Procedimiento:

1. Verificar sistema encendido y seguimiento activo.
2. Medir cada 30 minutos entre 11:00 y 15:00.
3. Anotar voltaje (V) y corriente (A).
4. Calcular potencia: $P = V \times I$

Tabla de Registro				
Hora	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Observaciones
11:00				
11:30				
12:00				
12:30				
01:00				
01:30				
02:00				
02:30				
03:00				

Reflexión:

- ¿En qué momento se alcanzó la máxima potencia?
- ¿Qué impacto tiene el seguimiento solar?
- ¿Qué pasaría si los paneles fueran estáticos?

X. Conclusiones y recomendaciones

10.1 Conclusiones

- En conclusión, el desarrollo del prototipo de sistema fotovoltaico con control de seguimiento solar en doble eje representa una herramienta educativa práctica que facilita la comprensión del aprovechamiento eficiente de la energía solar mediante estos sistemas.
- El diseño del prototipo, realizado con base en requerimientos técnicos y utilizando materiales adecuados, ha permitido integrar de manera efectiva los componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos. Esta integración demuestra ser funcional y accesible para fines académicos.
- La construcción del prototipo basada en planos estructurales y diagramas eléctricos detallados permitió un ensamble ordenado y preciso de todos los elementos. Esta metodología de trabajo favorece la reproducción del modelo en ambientes académicos, proporcionando un entorno controlado para la enseñanza y el desarrollo de habilidades técnicas.
- Las pruebas de funcionamiento realizadas al sistema confirmaron su operatividad y permitieron verificar la precisión del seguimiento solar. Así mismo, se evidenció un incremento en la captación energética frente a un sistema estático, lo que valida el propósito del prototipo y sugiere mejoras potenciales en el algoritmo de control o el sistema mecánico de movimiento.
- La elaboración de guías y manuales de aprendizaje dirigidos a docentes y estudiantes fortalece el uso del prototipo como recurso didáctico. Estos materiales contribuyen significativamente a la apropiación del conocimiento técnico y experimental, facilitando la aplicación de conceptos teóricos en entornos reales.

10.2 Recomendaciones

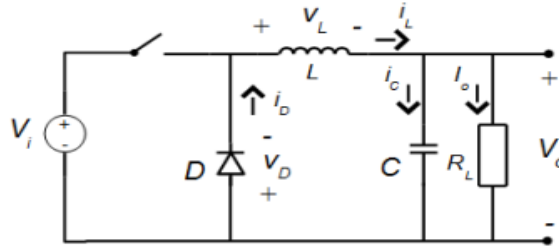
- Se recomienda utilizar un regulador de carga tipo MPPT en lugar de uno PWM, ya que permite extraer la máxima potencia de los paneles solares en condiciones variables de irradiancia y temperatura, optimizando el rendimiento del sistema.
- Se sugiere optimizar el diseño mecánico del prototipo incorporando materiales estructurales más livianos y modulares, que permitan un traslado más ágil, sin comprometer la estabilidad del sistema.
- Incorporar una batería con capacidad adecuada al sistema, considerando el voltaje (12V o 24V) y el tipo de tecnología empleada. Para una potencia total de 200W de dos paneles, una batería de litio de entre 100 y 120 Ah o una de plomo-ácido de entre 150 y 200 Ah resulta apropiada para garantizar autonomía y buen desempeño. Es aconsejable sobredimensionar ligeramente la capacidad para compensar pérdidas y asegurar un uso didáctico más eficiente.

XI. Bibliografía

- Aparicio, F. À. (2011). Arma tu Programador-Entrenador con bootloader(18f4550)., (pág. 3). mexico.
- Marco, D. R. (2010). Diseño y simulacion de un convertidor DC/DC para alimentacion de un sistema de iluminación mediante LED. valencia.
- Miyara, F. (2004). *Conversores D/A y A/D*. Rosario, Argentina .
- National Semiconductor. (2002). *LM2596SIMPLE SWITCHER®Power Converter 150 kHz3A Step-Down Voltage Regulator*. california.
- Ortega, V. G. (2002). Simulador Convertidores DC-DC. España.
- Regulator, L. S.-D. (2002). *Asia Patente nº 5,382,918*.
- Robert L. Boylestad, L. N. (2009). *Electronica: teoria de circuitos y dispositivos electronicos* . mexico: Pearson educacion.
- Rodriguez, E. (s.f.). *Electronica Basica*. Obtenido de Area tecnologica : www.areatecnologica.com
- Santiago Silvestre, J. S. (2019). *Proceso de diseño y fabricacion de una placa de circuito impreso (PCB)*. České vysoké učení technické v Praze .
- XLSEMI. (2015). 5A 180KHz 36V Buck DC to DC Converter XL4015. shangai.
- Norma Internacional Electrotécnica (International Electrotechnical Commission). (2007). IEC 61131-2: Control de sistemas de automatización industrial - Parte 2: Requisitos de hardware y software para controladores de lógica programable.
- IPC (Association Connecting Electronics Industries). (2003). IPC 2221A: Generic Standard on Printed Board Design. [3ra edicion]
- Sánchez Maza Miguel Ángel, 2010, Componentes de un sistema solar fotovoltaico, Energía solar Fotovoltaica, editorial Limusa, México DF. , pp.59-104.
- Guardado Gutiérrez, D.H. & Rivera Chávez, V.E., 2012. Implementación de seguidor solar en dos ejes para el Sistema Fotovoltaico de la Escuela de Ingeniería Eléctricade la UES . Universidad de El Salvador

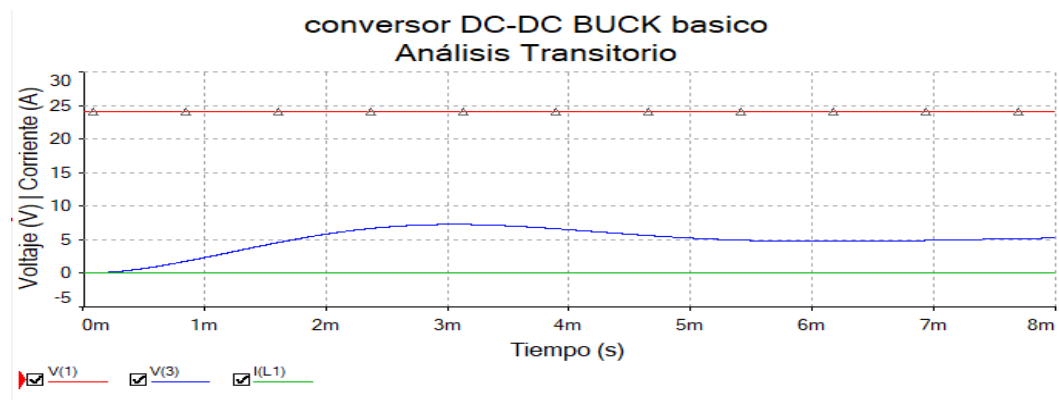
XII. Anexos

Anexo 1. Esquema Básico de Conversor DC-DC



Nota: Esquema básico de un convertor DC-DC. Tomada de (Marco,2010)

Anexo 2. Señal de Análisis Transitorio de Conversor DC-DC BUCK



Nota: La grafica anterior muestra el análisis transitorio convertor DC-DC BUCK circuito básico. Elaboración propia

Anexo 3. Valores de Corriente por el Inductor IL

Cursor			
	V (1)	V (3)	I (L1)
x1	0.0000	0.0000	0.0000
y1	24.0000	1.2001m	1.2001μ
x2	3.1238m	3.1238m	3.1238m
y2	24.0000	7.2665	6.9313m
dx	3.1238m	3.1238m	3.1238m
dy	0.0000	7.2653	6.9301m
dy/dx	0.0000	2.3258k	2.2185
1/dx	320.1220	320.1220	320.1220

Nota: La tabla anterior muestra los datos sobre voltaje máximo de salida, tiempo transcurrido y corriente máxima que circula por el inductor. Elaboración propia

Anexo 4. Datasheet del Convertidor XI4015

5A 180KHz 36V Buck DC to DC Converter

Features

- Wide 8V to 36V Input Voltage Range
- Output Adjustable from 1.25V to 32V
- Maximum Duty Cycle 100%
- Minimum Drop Out 0.3V
- Fixed 180KHz Switching Frequency
- 5A Constant Output Current Capability
- Internal Optimize Power MOSFET
- High efficiency up to 96%
- Excellent line and load regulation
- Built in thermal shutdown function
- Built in current limit function
- Built in output short protection function
- Available in TO263-5L package

Anexo 5. Diagrama de Bloques del Conversor XI4015.

Function Block

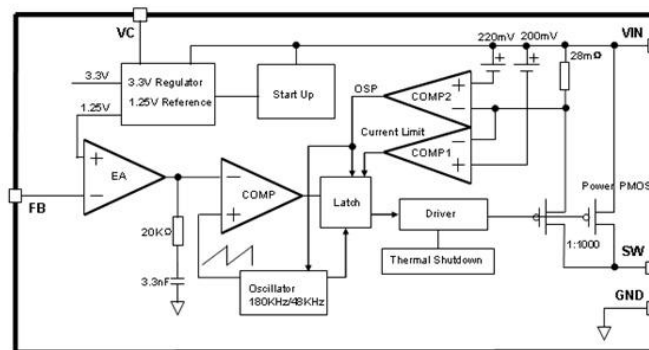
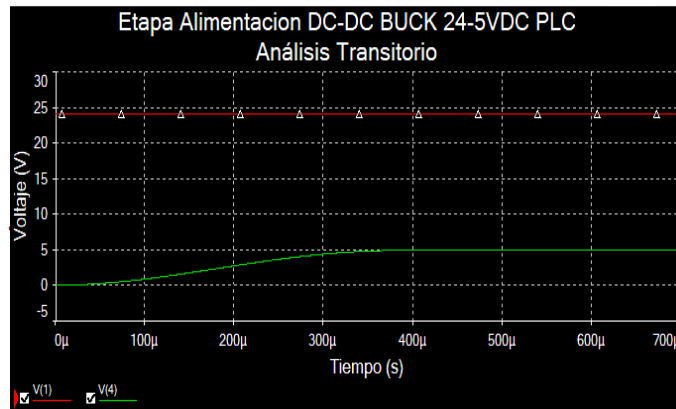


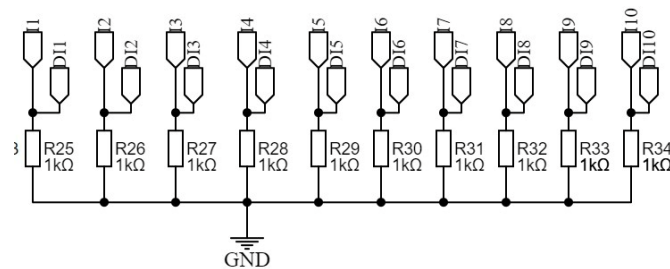
Figure3. Function Block Diagram of XL4015

Anexo 6. Comportamiento de Voltaje de Entrada y el Voltaje de Salida que son 24VDC y 5VDC respectivamente.



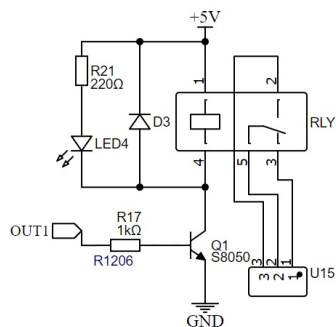
Nota: La gráfica anterior muestra el comportamiento de la tensión de entrada de 24VDC y el voltaje de salida 5VDC que se espera obtener en el prototipo. Elaboración propia

Anexo 7. Circuito de Entradas Digitales



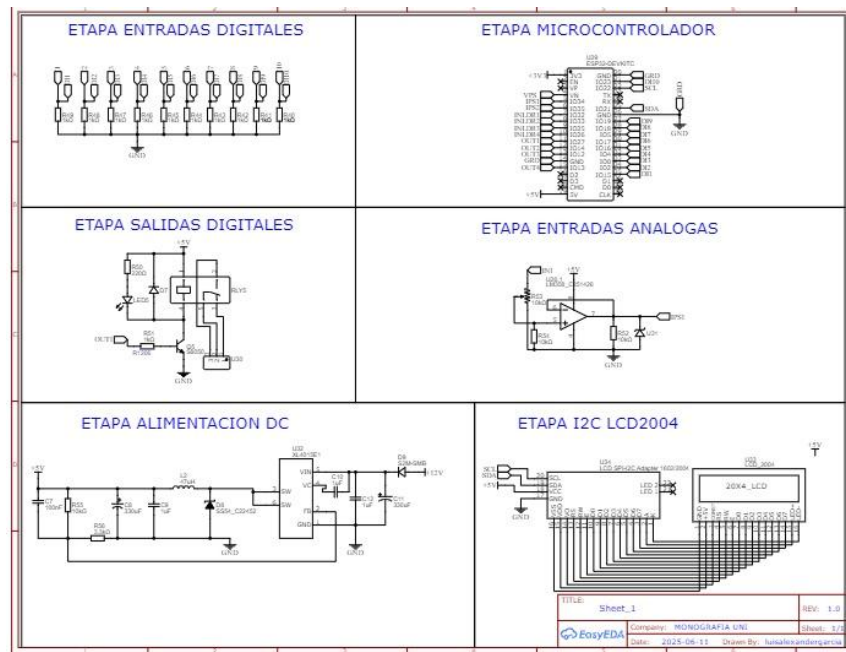
Nota: La figura anterior muestran las resistencias en configuración Pull Down. Elaboración propia

Anexo 8. Circuitos salidas digitales



Nota: La figura muestra las salidas digitales tipo relevador

Anexo 9. Etapas que conforman la tarjeta de control



Nota: Elaboración Propia

Anexo 10. Parámetros de Tamaño de Tarjeta PCB

Configuración de la tarjeta PCB:

- Unidades: mm
- Copper Layer: 2
- Board Outline: Rectangular
- Start X: 7.0 mm
- Start Y: 150 mm
- Anchura: 100 mm
- Altura: 130 mm

Nota: Elaboración Propia

Parámetros de cálculo:

- Corriente (I): 1 A
- Aumento de temperatura (ΔT): 20 °C
- Longitud del conductor: 10 mm
- Resistividad del cobre: 1.72e-08 Ω·m

Resultados de cálculo:

- Área de sección: 0.00990326 mm²
- Resistencia: 0.0249158 Ω
- Caida de voltaje: 0.0249158 V
- Pérdida de potencia: 0.0249158 W

Anexo 11. Cálculo de Ancho de Pistas con Software Kicad

Nota: Fuente Propia

Anexo 12. Inversor de 1000W Tipo Onda Cuadrada.



Nota: Fuente Propia

Anexo 13. Controlador Tipo PWM



Nota: Fuente Propia

Anexo 14. Actuador Lineal

