



UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

COMPONENTE PRÁCTICO DEL EXAMEN COMPLEXIVO

“Aplicación de un controlador PID a un motor paso a paso en un sistema embebido para la captación de energía solar”.

AUTOR:

CARMEN CECILIA FLORES CASTRO

Dirigido por:

Ing. Sendey Vera González, MSc.

LA LIBERTAD-ECUADOR

2024

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi amada mamá, Flor Castro Toala, quien ha sido el faro de luz que ilumina mi camino durante mis 25 años de vida. Su esfuerzo constante, amor incondicional y sabiduría han sido fundamentales para que alcance mis metas académicas. En los momentos difíciles, ha sido mi hombro y mi paño de lágrimas, brindándome apoyo, comprensión y coraje.

A mi querida hermana, Scarleth Caicedo Castro, quien me ve como su fuente de inspiración. Aunque pueda no ver mis errores, sé que me ama profundamente. Estoy convencida de que alcanzarás grandes logros y te convertirás en una destacada profesional. Siempre contarás con mi apoyo incondicional y mi amor sincero, Te amo.

A mi hermano Stefano Caicedo Castro, le digo con certeza que la perseverancia, la dedicación y la voluntad son las claves para lograr y obtener lo que deseas. No decaigas ni te dejes abrumar por el "yo no puedo"; nosotros podemos y más. Aquí tienes a tu hermana para apoyarte en tus sueños. ¡No te rindas! Te Amo.

A Flor Isabella, quien crece día a día en mi vientre. En unos años podrá entender estas palabras y sabrá que llegó en el momento indicado para no dejarme desistir. Desde el momento que escuché su corazoncito, entendí que ya no estaba sola y que debía culminar ese sueño por el cual había empezado mi carrera universitaria. Te amo con todo mi corazón, hija de mi vida.

Este trabajo es un tributo a ustedes, mis amores de vida. ¡Gracias por ser mi razón para esforzarme y alcanzar nuevas metas!

AGRADECIMIENTO

Agradezco infinita y espiritualmente a Dios por darme la sabiduría y fortaleza necesarias para enfrentar cada una de las pruebas que se presentaron en este camino de la vida estudiantil.

Expreso mi profundo agradecimiento a mi papá, Ramón Flores; a mi padrastro, Héctor Caicedo y a mi tía Mirna Valencia; por haber aportado su granito de arena a lo largo de esta etapa universitaria, contribuyendo así a la realización de mi anhelado sueño.


A mi novio Andrés Aquino, le quiero agradecer por su amor, apoyo y paciencia durante mi proceso de titulación, sé que pronto cumplirás este sueño académico y lo celebraremos juntos, Te Amo.


Quiero reconocer y agradecer a mis amigos Julissa Choez, Rodrigo Echáiz, Kevin Caizahuano, Saúl Yagual, Angie Saona y Benjamín Barón por brindarme su apoyo incondicional en los momentos en que más lo necesitaba. Un agradecimiento especial también a mi amigo Kevin Villao, quien estuvo a mi lado durante todo el proceso de titulación, ofreciéndome su apoyo y conocimientos.


Agradezco a los ingenieros Carlos Saldaña, Jaime Minchala y Juan Pablo Ramírez por su orientación y enseñanzas valiosas.

Por último, pero no menos importante, agradezco a la Universidad Estatal Península de Santa Elena por abrirme las puertas de sus instalaciones. Aquí experimenté tanto fracasos como logros académicos que me permitieron crecer como persona. Mi gratitud se extiende a todos mis profesores, quienes compartieron sus conocimientos.

FIRMAS DE RESPONSABILIDAD

Firma de responsabilidad del estudiante.
Nombre: Carmen Flores Castro
Cédula: 0803605195
 <hr/>
Firma

Firma de Responsabilidad del Profesor o Tutor Propuesto.
Nombre: Ing. Sendey Agustín Vera, MSc.
Cédula: 0913235271
 <hr/>
Firma

Firma de Responsabilidad del Docente de Unidad de Integración Curricular II
Nombre: Ing. Luis Enrique Chuquimarca Jiménez, MSc.
Cédula: 1104610132
 <small>Firmado electrónicamente por:</small> LUIS ENRIQUE CHUQUIMARCA JIMENEZ <hr/>
Firma

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del componente práctico del Examen Complexivo con título "APLICACIÓN DE UN CONTROLADOR PID A MOTORES ELÉCTRICOS UTILIZANDO UN SISTEMA EMBEBIDO PARA LA CAPTACIÓN DE ENERGÍA SOLAR" presentado por la señorita Carmen Cecilia Flores Castro, estudiante de la carrera de Electrónica y Automatización, me permito declarar que luego de haber orientado, analizado y revisado, es aprobado en todas sus partes.

Particular que informo para los fines consiguientes.



Ing. Sendey Vera González | MSc.

Docente Tutor

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN COMPONENTE PRÁCTICO

EXAMEN COMPLEXIVO



Ing. Ronald Rovira Jurado, Ph. D.
**DIRECTOR DE LA CARRERA
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

**BREMNEN
MARINO
VELIZ
NOBOA** Firmado digitalmente por
BREMNEN
MARINO VELIZ
NOBOA
Fecha: 2024.01.12
17:42:53 -05'00'

Ing. Bremnen Veliz Noboa, Ph.D.
DOCENTE ESPECIALISTA



Ing. Sendey Vera, Mgt.
DOCENTE TUTOR



LUIS ENRIQUE
CHUQUIMARCA JIMENEZ

Ing. Luis Chuquimarca Jiménez, Mgt.
DOCENTE GUÍA UIC



Ing. Corina Gonzabay De La A., Mgt.

SECRETARIA

RESUMEN

El proyecto propuesto aborda dos objetivos fundamentales: la implementación de un prototipo que aproveche la energía solar mediante un panel fotovoltaico, y la aplicación del control PID utilizando Simulink Matlab. El propósito de este dispositivo es captar, almacenar y utilizar la energía solar, proporcionando así una fuente sostenible de energía. El controlador PID se emplea específicamente en el motor a pasos, utilizando un sistema embebido compuesto por un microcontrolador Arduino, sensores LDR y un driver industrial para lograr la máxima eficiencia en la captación de energía solar.

En la práctica 1, Implementación del Prototipo de Captación Solar, se lleva a cabo el diseño y desarrollo de un prototipo de captación solar. El objetivo principal es establecer la disposición y geometría óptimas para los paneles solares, considerando variables ambientales como la iluminación.

Se proporcionan datos específicos sobre la salida del panel solar y detalles sobre la operación de la batería bajo condiciones mencionadas. La conexión del panel solar al controlador y a la batería optimiza la eficiencia del sistema, asegurando un suministro constante de energía. La configuración específica del driver DM556 garantiza las condiciones necesarias para el funcionamiento óptimo del motor paso a paso. La conexión de los sensores LDR al Arduino, con calibración individual, permite un monitoreo preciso de la intensidad lumínica en cada sección del panel solar.

En la practica 2. Se muestra la respuesta del controlador PID con sintonización de Ziegler-Nichols, obteniendo oscilaciones iniciales seguidas de estabilización. Asimismo, la gráfica del tren de pulsos indicando la estabilización del panel solar en una posición fija.

En el sistema dinámico y receptivo se tienen nuevas instrucciones del controlador PID para ajustes según sea necesario. El método de Ziegler-Nichols permite la sintonización efectiva del controlador PID para el seguimiento solar. Los parámetros del PID (K_p , T_i , T_d) se ajustan para lograr una respuesta rápida y estable del sistema. La implementación exitosa del control PID mejora la precisión y eficiencia del seguimiento solar en comparación con sistemas sin control PID. El sistema demuestra dinamismo al esperar continuamente nuevas instrucciones del controlador PID sintonizado.

Palabras claves: Control PID, Panel Solar, LDR, Sintonización.

ABSTRACT

The proposed project addresses two fundamental objectives: the implementation of a prototype that harnesses solar energy through a photovoltaic panel, and the application of PID control using Simulink Matlab. The purpose of this device is to capture, store and utilize solar energy, thus providing a sustainable source of energy. The PID controller is specifically employed in the stepper motor, using an embedded system consisting of an Arduino microcontroller, LDR sensors and an industrial driver to achieve maximum efficiency in capturing solar energy.

In Practice 1, Implementation of the Solar Harvesting Prototype, the design and development of a solar harvesting prototype is carried out. The main objective is to establish the optimal layout and geometry for the solar panels, considering environmental variables such as lighting.

Specific data on the output of the solar panel and details on the battery operation under the mentioned conditions are provided. The connection of the solar panel to the controller and battery optimizes system efficiency, ensuring a constant power supply. The specific configuration of the DM556 driver guarantees the necessary conditions for optimal operation of the stepper motor. The connection of the LDR sensors to the Arduino, with individual calibration, allows precise monitoring of the light intensity in each section of the solar panel.

Practice 2 shows the response of the PID controller with Ziegler-Nichols tuning, obtaining initial oscillations followed by stabilization. Also, the graph of the pulse train indicating the stabilization of the solar panel in a fixed position.

In the dynamic and responsive system, new PID controller instructions are available for adjustment as needed. The Ziegler-Nichols method allows effective tuning of the PID controller for solar tracking. The PID parameters (K_p , T_i , T_d) are adjusted to achieve fast and stable system response. Successful implementation of PID control improves the accuracy and efficiency of solar tracking compared to systems without PID control.

The system demonstrates dynamism by continuously waiting for new instructions from the tuned PID controller.

Keywords: PID Control, Solar Panel, LDR, Tuning.

INDICE

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
FIRMAS DE RESPONSABILIDAD	4
APROBACIÓN DEL TUTOR	5
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN COMPONENTE PRÁCTICO.....	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INDICE.....	9
INDICE DE FIGURAS	10
INDICE DE TABLAS	11
INTRODUCCIÓN	12
Contexto y relevancia del tema.....	12
Objetivos.....	14
Objetivos Específicos	14
CAPÍTULO 1: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	15
1.1 Marco conceptual.....	15
1.2 Antecedentes	18
1.3 Importancia y beneficios de la propuesta en la aplicación práctica.....	19
CAPÍTULO 2: DESARROLLO EXPERIMENTAL.	20
2.1 Plan de implementación.....	20
2.1.2 Estudio de factibilidad	20
2.2 Descripción de la solución propuesta	21
2.3 Práctica 1 - Implementación del Prototipo de Captación Solar	21
2.3.1 Objetivo de la práctica	21

2.3.2 Objetivos específicos	22
2.3.3 Procedimiento de la práctica.....	22
2.3.4 Pruebas y puesta en marcha de solución.....	29
2.3.5 Conclusiones de la práctica.....	31
2.4 Práctica 2: Control y Evaluación del Control PID.....	32
2.4.1 Objetivo de la práctica	32
2.4.2 Objetivos específicos	32
2.4.3 Procedimiento de la práctica.....	33
2.4.3.1 Control y Evaluación del Control PID.....	33
2.4.4 Resultados.....	39
2.4.5 Conclusiones de la práctica.....	41
2.6 Conclusiones Generales.....	41
2.7 Recomendaciones	41
BIBLIOGRAFÍA.....	43
ANEXOS	44

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Panel Solar.....	24
Figura 2. Batería	25
Figura 3. Sensor LDR.....	26
Figura 4. Motor Nema23.....	27
Figura 5. Driver DM556	28
Figura 6. Conexión eléctrica driver al Motor	30
Figura 7. Configuración Driver DM556.....	31
Figura 8. Configuración de sensores.....	33

Figura 9. Control del motor a pasos.....	34
Figura 10. Bloque generador de pulsos.	34
Figura 11. Configuración de tren de pulsos.....	35
Figura 12. Configuración de la generación de pulsos.....	35
Figura 13. Control PID del motor a pasos.	36
Figura 14. Oscilación permanente.	37
Figura 15. Parámetros del PID.....	38
Figura 16. Periodo de oscilación permanente.....	38
Figura 17. Respuesta del controlador PID.....	39
Figura 18. Grafica tren de pulsos con PID.	40

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Respuesta en frecuencia.....	17
Tabla 2. Cargas eléctricas.	22
Tabla 3. Características técnicas del panel solar monocristalino PMS120W.....	24
Tabla 4. Características técnicas del regulador de carga solar PWM.....	25
Tabla 5. Características técnicas de la batería de gel Bosch 55Ah.....	25
Tabla 6. Características técnicas de la batería BOSCH 55Ah.....	27
Tabla 7 Características técnicas de DM556.....	28
Tabla 8. Presupuesto.	29

ANEXO

Anexo A: Instalación del Panel solar y Medición.	44
Anexo B: Calibración del motor.....	44
Anexo C: Calibración de Sensores	45

INTRODUCCIÓN

Contexto y relevancia del tema

La energía solar es una fuente de energía renovable y abundante que puede contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia de combustibles no renovables [1]. En el actual panorama global centrado en la sostenibilidad, esta tecnología se destaca como una solución para abordar los desafíos ambientales y la transición hacia un futuro más limpio.

La relevancia de la energía solar se evidencia en su capacidad para impulsar la independencia energética a nivel nacional y mejorar la seguridad energética. Además, el desarrollo continuo de tecnologías solares impulsa la innovación y el progreso tecnológico, generando oportunidades económicas y de empleo en el sector de las energías renovables. La viabilidad económica de la energía solar, respaldada por la disminución constante de costos, la hace cada vez más competitiva en comparación con las fuentes de energía convencionales, ofreciendo no solo beneficios ambientales, sino también ventajas económicas a nivel global [2].

En tiempos recientes, ha aumentado la investigación para lograr obtener energía de manera sostenible y accesible, con beneficios medioambientales y económicos. No obstante, en lugares como Ecuador, la eficiencia energética no es común debido a la falta de conocimiento, lo que presenta una oportunidad para implementar tecnologías más limpias y económicamente viables

El proyecto propuesto aborda dos objetivos fundamentales: la implementación de un prototipo que aproveche la energía solar mediante un panel fotovoltaico, y la aplicación del control PID utilizando Simulink Matlab. El propósito de este dispositivo es captar, almacenar y utilizar la energía solar, proporcionando así una fuente sostenible de energía. El controlador PID se emplea específicamente en el motor a pasos, utilizando un sistema embebido compuesto por un microcontrolador Arduino, sensores LDR y un driver industrial para lograr la máxima eficiencia en la captación de energía solar

En la ejecución de un sistema residencial de energía solar mejorado, el proyecto aborda desafíos locales, como la carencia de eficiencia energética en lugares como Ecuador, que experimenta actualmente limitaciones en su suministro de energía [3]. La implementación de sistemas de control avanzados no solo perfecciona la administración de la energía solar, sino que también subraya la relevancia de la tecnología en la exploración de soluciones eficaces y sostenibles en el ámbito energético.

En la primera práctica, que se centra en la implementación del sistema de captura de energía, se abordan los requisitos técnicos y operativos esenciales para integrar el motor a pasos, el sistema embebido y los paneles solares. La evaluación y especificación de estos requisitos aseguran la compatibilidad y eficiencia del sistema, destacando su aplicabilidad en entornos residenciales.

En la segunda práctica, orientada al seguimiento solar, se implementa un controlador proporcional-integral-derivativo (PID) en el sistema embebido. Este enfoque dinámico permite un seguimiento solar a lo largo del día, ajustando la orientación del panel solar según las condiciones ambientales. La evaluación del rendimiento mediante pruebas y simulaciones revela la capacidad del controlador PID para optimizar la captación de energía solar.

Objetivos

Implementar un sistema de controlador PID para el seguimiento de radiación solar y captación mediante uso de LDR, panel solar y un motor a pasos.

Objetivos Específicos

Evaluar los requisitos técnicos necesarios para la implementación del sistema de radiación solar con panel, asegurando la compatibilidad con el motor a pasos y el controlador.

Implementar un controlador proporcional-integral-derivativo (PID) sintonizado por el método Ziegler-Nichols para controlar dinámicamente la orientación del panel solar.

Evaluar el rendimiento del sistema seguimiento de radiación solar y captación de energía mediante pruebas experimentales analizando la capacidad del controlador PID para ajustar la orientación del panel solar en respuesta cambios de la posición del sol.

CAPÍTULO 1: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Marco conceptual

1.1.1 Energía Solar

La energía solar es la radiación electromagnética proveniente del sol que puede convertirse en diversas formas de energía, como térmica o eléctrica, para su aprovechamiento en aplicaciones cotidianas [4].

La energía solar es una fuente abundante y sostenible que desencadena numerosas aplicaciones innovadoras. Su captura y conversión son importantes para avanzar hacia un futuro más sostenible y menos dependiente de combustibles fósiles.

1.1.2 Conversión de Energía Solar

La conversión de energía solar implica transformar la energía captada del sol en otra forma de energía útil, como electricidad o calor, mediante tecnologías y procesos específicos [5].

La conversión efectiva de la energía solar se aprovecha actualmente por su potencial. La investigación continua en tecnologías de conversión permite mejorar la eficiencia y expandir la adopción de sistemas de energía solar en todo el mundo.

1.1.3 Panel solar

Un panel solar, también conocido como módulo fotovoltaico, es un dispositivo compuesto por celdas solares que convierten la luz solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico [6]. Estos paneles son la base de los sistemas de generación de energía solar. Los paneles solares desempeñan un papel central en la captación de energía solar para su posterior conversión, siendo esenciales en proyectos que buscan aprovechar de manera sostenible la energía renovable disponible.

1.1.4 Controlador de carga solar

Un controlador de carga solar regula la corriente proveniente de los paneles solares para cargar la batería sin sobrecargarla ni dañarla. Ayuda a gestionar y proteger el sistema de almacenamiento de energía [7]. Los controladores de carga solar son fundamentales para prolongar la vida útil de las baterías y optimizar el rendimiento del sistema solar, garantizando una gestión inteligente y segura de la energía.

1.1.5 Batería

Una batería es un dispositivo que almacena energía en forma química y la libera cuando es necesario, proporcionando una fuente de energía portátil y almacenada. En sistemas solares, las baterías son para almacenar el exceso de energía generada [8]. Las baterías son componentes críticos para garantizar un suministro constante de energía, especialmente en momentos en que la generación solar no es óptima. Su eficiencia y capacidad de almacenamiento son factores clave.

1.1.6 Microcontroladores

Los microcontroladores son dispositivos integrados que combinan una unidad central de procesamiento (CPU) con periféricos, utilizados para controlar sistemas embebidos en diversas aplicaciones [9].

Los microcontroladores son la columna vertebral de la electrónica embebida, permitiendo el control en una amplia gama de aplicaciones. Su versatilidad y capacidad de procesamiento hacen posible la implementación de sistemas complejos.

1.1.7 Control PID

El control PID es un método de control automático que utiliza tres términos (proporcional, integral y derivativo) para ajustar y mantener un proceso en un valor deseado [10]. El control PID es una herramienta de constante aprendizaje e importante para mantener sistemas en condiciones deseadas. Su combinación de términos proporciona una respuesta rápida y estable, siendo esencial en el control de procesos dinámicos.

La ecuación del control PID es la siguiente:

$$c(t) = k_p \times e(t) + k_i \times \int e(t)dt + k_d \times \frac{\partial e(t)}{\partial t}$$

Para:

$c(t)$ = señal de control

$e(t)$ = señal de error

K_p , K_i , K_d = parámetros del controlador PID

Método Ziegler Nichols

El método de Ziegler-Nichols es una técnica clásica de ajuste de controladores PID (Proporcional, Integral y Derivativo) utilizada para sintonizar sistemas de control. Fue propuesto por John G. Ziegler y Nathaniel B. Nichols en 1942. Este método proporciona una aproximación empírica para determinar los parámetros óptimos del controlador PID, los cuales son cruciales para lograr un rendimiento estable y eficiente en sistemas de control automático. El método de Ziegler-Nichols utiliza un enfoque experimental para determinar los parámetros del controlador PID. Las ecuaciones básicas para el ajuste de los parámetros son derivadas de la respuesta al escalón del sistema controlado [11].

Método de la respuesta en frecuencia

Tabla 1. Respuesta en frecuencia.

Controlador	Kp	Ti	Td
P	$0.5K_u$		
PI	$0.4K_u$	$0.8T_u$	
PID	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$

Donde K_u es la ganancia última (ganancia crítica) y se obtiene experimentando con la ganancia del controlador hasta que el sistema alcance la oscilación continua y T_u es el periodo de oscilación [12].

1.1.9 Motores paso a paso

Los motores paso a paso son dispositivos electromecánicos que convierten pulsos eléctricos en movimientos angulares discretos, lo que los hace ideales para aplicaciones de control [13]. Los motores paso a paso son esenciales en aplicaciones que requieren precisión de posicionamiento, como impresoras 3D y máquinas CNC. Su capacidad para moverse en pasos discretos ofrece un control detallado.

1.1.10 Sensor LDR

Los sensores son dispositivos que detectan cambios en el entorno y convierten estos cambios en señales eléctricas, proporcionando información clave para el control y monitoreo de sistemas [14]. Los sensores son los "sentidos" electrónicos que permiten a

los sistemas percibir y responder a su entorno. Desde la monitorización de temperatura hasta la detección de luz, los sensores son fundamentales para la automatización y el control inteligente.

El LDR, o Resistencia Dependiente de la Luz, es un dispositivo semiconductor comúnmente construido con componentes como selenio, sulfuro de cadmio o sulfuro de plomo. Estos materiales exhiben la capacidad única de variar su resistencia eléctrica en función de la cantidad de luz incidente. En esencia, el LDR actúa como un sensor de luz, ajustando su resistencia de manera proporcional a la intensidad lumínica. Este cambio en la resistencia del LDR, explicado por el efecto fotoeléctrico, permite su implementación en circuitos electrónicos para detectar y medir la luminosidad ambiental [15].

1.2 Antecedentes

La utilización de la energía solar se remonta a la antigüedad, donde civilizaciones como la griega y la romana aprovechaban la luz solar para calentar sus edificaciones y baños públicos. La comprensión de los principios básicos de la energía solar, sin embargo, experimentó un progreso significativo en el siglo XIX. En esa época, el físico francés Alexandre Edmond Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico, la capacidad de ciertos materiales para generar electricidad cuando se exponen a la luz solar. Este hallazgo sentó las bases para el desarrollo posterior de tecnologías fotovoltaicas [16].

A lo largo del siglo XX, el interés en la energía solar fue en aumento, impulsado por la crisis energética y la conciencia ambiental. Los avances en la tecnología de paneles solares y la mejora en la eficiencia de conversión de la luz solar a electricidad llevaron a un crecimiento significativo en la instalación de sistemas solares fotovoltaicos. Además, la aplicación de controladores PID en sistemas solares para optimizar el seguimiento solar y aumentar la eficiencia de captación se convirtió en una práctica común [17].

Sin embargo, en regiones como Ecuador, a pesar de su abundante recurso solar, la implementación de sistemas de energía solar ha enfrentado obstáculos, especialmente en términos de eficiencia energética y conocimiento técnico [18]. La investigación y desarrollo continuo en este campo buscan abordar estos desafíos y mejorar la viabilidad y eficacia de la energía solar en Ecuador.

1.3 Importancia y beneficios de la propuesta en la aplicación práctica

La propuesta de instaurar un sistema que combine energía solar, microcontroladores y control PID en la gestión de paneles fotovoltaicos presenta varias ventajas significativas en su aplicación práctica. En principio, la adopción de esta tecnología contribuirá de manera considerable a la sostenibilidad y a la disminución de la dependencia de fuentes de energía no renovables.

Además, la propuesta tiene un impacto directo en la eficiencia energética, permitiendo la captación y utilización óptima de la energía solar disponible. La implementación de un sistema de control PID no solo optimiza el seguimiento solar para maximizar la exposición a la luz solar, sino que también contribuye a la estabilidad del sistema, mejorando la gestión y distribución de la energía generada.

Desde una perspectiva práctica y económica, la propuesta busca reducir los costos a largo plazo asociados con la energía convencional. La competitividad actual de la energía solar frente a las fuentes tradicionales ofrece una alternativa rentable y sostenible [19]. Además, la eficiencia energética no es común, como en Ecuador, la aplicación de esta propuesta podría no solo mitigar la dependencia de fuentes contaminantes, sino también generar ahorros significativos en costos de energía

CAPÍTULO 2: DESARROLLO EXPERIMENTAL.

2.1 Plan de implementación.

La primera práctica se centra en el diseño conceptual, abarcando la selección de equipos y la geometría para los paneles solares, así como la identificación de variables ambientales relevantes, con especial atención a la iluminación. Este diseño conceptual servirá como base para el desarrollo del prototipo.

En la etapa de desarrollo del prototipo, se integrará la variable ambiental de captura de luz. La construcción física del prototipo se llevará a cabo siguiendo las especificaciones definidas.

La implementación y las pruebas incluirán la consideración de sensores LDR para medir la iluminación. Se realizará una evaluación del rendimiento del prototipo en condiciones controladas, permitiendo la identificación de posibles mejoras y ajustes necesarios en el diseño original. Esta fase implica la integración de componentes clave como el motor paso a paso, el driver industrial, Arduino y Simulink, lo que permitirá el funcionamiento del sistema para el seguimiento solar.

La segunda práctica se enfoca en la implementación y evaluación de un controlador proporcional-integral-derivativo (PID) para el seguimiento solar, con la aplicación específica del método de sintonización de Ziegler-Nichols. Inicialmente, se llevará a cabo la configuración del entorno de control.

Posteriormente, se realizarán pruebas y optimización utilizando el método de Ziegler-Nichols. Se evaluará el rendimiento del control PID en tiempo real, observando cómo el sistema responde al seguimiento solar. Se llevarán a cabo ajustes iterativos de los parámetros del PID siguiendo el método establecido por Ziegler-Nichols, lo que permitirá optimizar la precisión del seguimiento y garantizar su funcionamiento.

Finalmente, se realizará el análisis de resultados y se generará una documentación detallada. Durante las pruebas, se recopilarán datos que posteriormente se compararán con los resultados esperados.

2.1.2 Estudio de factibilidad

En términos de viabilidad técnica, se realiza una evaluación detallada de la disponibilidad de tecnologías necesarias para el diseño del prototipo de captación solar y la aplicación

del control PID. Además, se analiza la capacidad técnica para integrar componentes como el motor paso a paso, el driver industrial, Arduino y Simulink, resolviendo posibles desafíos técnicos que puedan surgir.

Desde una perspectiva económica, se llevará a cabo una estimación de los costos asociados con la adquisición de materiales, componentes electrónicos y software esenciales para ambas prácticas. Este análisis se complementará con una evaluación de la relación costo-beneficio, teniendo en cuenta tanto la inversión inicial como los beneficios a largo plazo.

El entorno de Simulink ofrece una amplia gama de opciones para realizar simulaciones y controlar diversas acciones. Proporciona la posibilidad de implementar un control PID y enlazar con Arduino, permitiendo programar directamente en Simulink las instrucciones necesarias para que Arduino lea y envíe los parámetros requeridos para controlar el motor a pasos.

2.2 Descripción de la solución propuesta

En la primera práctica, se realiza la implementación de la captación de energía solar, incluyendo elementos clave como el panel solar, el controlador de carga y la batería de gel. Complementando esta iniciativa, la segunda práctica amplía su alcance al integrar componentes adicionales para lograr un seguimiento solar. Se incorpora el motor a pasos, que desempeñará un papel fundamental en la orientación del panel solar, junto con Arduino. Además, se incluye un driver industrial para controlar el motor a pasos. Con el objetivo de mejorar la precisión del seguimiento solar, se integran sensores LDR encargados de captar la luminosidad ambiental y proporcionar información para ajustar dinámicamente la posición del panel solar.

2.3 Práctica 1 - Implementación del Prototipo de Captación Solar.

En esta práctica, se propone el diseño y desarrollo de un prototipo de captación solar como ejercicio central. La meta es establecer la disposición y geometría óptimas para los paneles solares, además de integrar la variable ambiental de la iluminación.

2.3.1 Objetivo de la práctica

Implementar un prototipo de captación solar, centrándose en establecer la disposición y geometría óptimas para el panel solar, así como en integrar variables ambientales como la iluminación.

2.3.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un prototipo físico que refleje la disposición y geometría óptimas determinadas, integrando el sensor LDR.
- Documentar los procedimientos de diseño, las decisiones tomadas y los resultados obtenidos.
- Identificar posibles mejoras o adaptaciones al diseño inicial en función de los hallazgos y conclusiones obtenidos durante la práctica.

2.3.3 Procedimiento de la práctica

Adquisición de equipos

Elección del panel solar

En el proceso de diseño y planificación de nuestro sistema, es esencial considerar la selección de un panel solar adecuado para alimentar las diversas cargas eléctricas que compondrán nuestro sistema. Para tomar esta decisión de manera fundamentada, hemos recopilado información detallada sobre las cargas eléctricas involucradas en nuestro sistema, incluyendo motor, sensores, reguladores y microcontroladores.

Tabla 2. Cargas eléctricas.

Cargas	Cantidad	Voltaje (V) DC	Potencia (W)	Corriente (A)	Consumo (W-h)	Consumo (W-h/día)
Motor a pasos	1	12	18	1.5	18	216
Sensor de Temperatura	4	3.3	0.6	0.2	2.4	28.8
Arduino	1	5.5	0.3	0.05	0.05	0.48

La tabla muestra los componentes eléctricos de nuestro sistema y detalla el consumo energético de tres elementos. Un motor a pasos, que opera a 12 V, tiene una potencia de 18 W y consume 216 Wh diariamente. Cuatro sensores de temperatura, con una alimentación de 3.3 V cada uno, presentan un consumo individual de 0.6 W, totalizando 2.4 Wh al día. El Arduino, funcionando a 5.5 V, tiene una potencia de 0.3 W y consume 0.48 Wh diariamente. La suma del consumo total diario es:

Consumo Total diario= 216Wh/día+2.4Wh/día + 0.48Wh/día = 218.88Wh/ día.

Ahora, para dimensionar el panel solar, se debe considerar la radiación solar promedio en la ubicación donde se instalará el sistema. Supongamos una radiación solar promedio de 8 horas al día. Entonces, la potencia del panel solar necesaria se calcula dividiendo el consumo total diario entre las horas de radiación solar:

$$P_{\text{solar}} = \text{Consumo total diario} / \text{Horas de radiación solar diarias}$$

$$P_{\text{solar}} = \frac{218.88}{8}$$

$$P_{\text{solar}} = 27.38 \text{ w}$$

Se considera un panel solar de al menos 30 W. Además, si el panel solar debe suministrar energía a algún equipo eléctrico, se seguirá el mismo proceso, incluyendo los valores del consumo eléctrico diario de los equipos. Dicho esto, en la práctica se utilizará un panel solar de 120 W, con la previsión de conectar más dispositivos en futuras prácticas.

Panel solar

El panel tiene una potencia máxima (P_{max}) de 120W, con una tensión de potencia máxima (V_{mpp}) de 18.00V y una corriente de potencia máxima (I_{mpp}) de 6.67A. Además, muestra valores en condiciones normales de operación de 80W P_{max} , 16.80V V_{mpp} y 5.24A I_{mpp} . El panel tiene un voltaje de circuito abierto (V_{oc}) de 22.50V junto con una corriente de cortocircuito de 7.21 A. La eficiencia del módulo en STC es del 18.46%, y se especifica una tolerancia de potencia del 5%. En cuanto a las características mecánicas, se trata de un panel mono cristalino con un tamaño de célula de 156.75x156.75mm, compuesto por 36 células (4x9). Sus dimensiones son de 670x970x30mm, utiliza conectores MC4 y cables de salida de 2mm² con una longitud de 900mm. Además, tiene un rango de temperatura de operación que abarca desde -40°C hasta 85°C.



Figura 1. Panel Solar

Tabla 3. Características técnicas del panel solar mono cristalino PMS120W

Característica	Condiciones estándar	En funcionamiento
Máxima potencia (Pmax)	120W	80W
Tensión de potencia máxima (Vmpp)	18.00V	16.80V
Corriente de potencia máxima (Impp)	6.67A	5.24A
Voltaje de circuito abierto (Voc)	22.50V	21.20V
Corriente de cortocircuito (Isc)	7.21A	5.66A
Eficiencia del módulo	18.46%	
Tolerancia de potencia	5%	
Rango de temperatura de operación	-40°C a 85°C	
Tipo de celda	Monocristalino 156.75x156.75[mm]	
Número de celdas	36(4x9)	
Dimensiones [mm]	670x970x30	
Tipo de conector	MC4	
Peso	16 kg	

Controlador de carga solar

Con una capacidad de corriente de 20A, es capaz de gestionar una carga eléctrica considerable. Es compatible tanto con sistemas de 12VDC como de 24VDC, con una potencia de entrada máxima de 260W y 520W, respectivamente, lo que sugiere su versatilidad para sistemas solares de diferentes tamaños.

Tabla 4. Características técnicas del regulador de carga solar PWM

Capacidad corriente	20 ^a
Voltaje nominal	12VDC/24VDC
Corriente de descarga	10mA
Potencia de entrada máxima	Para 12VDC 260W Para 24VDC 520W
Carga flotante	13.7VDC/27.4VDC (Predeterminado)
Parada de descarga	10.7VDC/21.4VDC (Predeterminado)
Voltaje de recuperación de carga	12.6VDC/25.2VDC (Predeterminado)

Batería

En primer lugar, se destaca su capacidad nominal de 55Ah a una tasa de descarga C20. Además, la capacidad de reserva mínima es de 100 minutos, lo que sugiere que la batería puede mantener una carga suficiente durante ese período en caso de una interrupción en el suministro eléctrico. La polaridad de la batería se indica como negativa (-) y positiva (+), lo que es esencial para garantizar la correcta conexión en el sistema eléctrico.



Figura 2. Batería

Tabla 5. Características técnicas de la batería de gel Bosch 55Ah

Capacidad C20(Ah)	55Ah
Capacidad reserva min.	100min.

Polaridad	- +
-----------	-----

Modulo sensor de luz fotorresistencia LDR



Figura 3. Sensor LDR.

Este módulo incluye una fotorresistencia que es altamente sensible a la intensidad de la luz ambiental. Su función es determinar el brillo y la intensidad lumínica del entorno. A través de su salida digital, el módulo establece un umbral de luminosidad, lo que resulta en una señal de voltaje alta o baja, dependiendo de la configuración. Mediante la salida analógica del módulo, se puede transmitir información precisa sobre la luminosidad a un ordenador, permitiendo así obtener valores más precisos.

Simulink

Simulink es una plataforma de computación en Matlab diseñada para llevar a cabo proyectos que involucran cálculos matemáticos avanzados y la representación gráfica de los mismos. Ofrece capacidades equiparables a las de una calculadora científica, como el análisis numérico, el cálculo matricial, el procesamiento de señales y la visualización gráfica en un entorno integral.

Motor Paso A Paso Nema23

Dado que la fuerza gravitacional es aproximadamente 156.8 N para una carga de 16 kg y asumiendo un brazo de palanca de 0.05 metros, el torque requerido se estima en 15.68 Nm según la fórmula $\tau = Fg \cdot r$. El motor a pasos seleccionado, con un torque de 20 Nm, supera este requisito, proporcionando un margen adicional para otros factores como la inercia, la resistencia del sistema y posibles variaciones en la carga. Además, se implementa un sistema de engranaje con una relación de 4 a 1 para ajustar la salida del

motor. Este sistema permite adaptar la velocidad y el torque de salida, brindando una mayor flexibilidad y precisión en el movimiento del panel.

El motor Nema 23 Kenshi STP-59D3 ofrece rendimiento, condición y compatibilidad con microcontroladores. Su evaluación positiva en funcionamiento y estado estético respalda su calidad, mientras que su versatilidad en proyectos DIY, electrónica y robótica amplía su aplicabilidad.



Figura 4. Motor Nema23.

Tabla 6. Características técnicas de la batería BOSCH 55Ah

Características	Detalles
Marca	Shinano Kenshi
Modelo	STP-59D3
Tipo	Unipolar (se puede conectar también en bipolar)
Paso	1.8 grados
Fases	2
Corriente	1.5 Amperios
Torque	20 N-m
Medidas	Ancho 56 mm, Alto 56 mm, Largo 54 mm
Eje	Diámetro 5/6.33 mm – Largo 30 mm
Condición	Usado, recuperado de equipos en desuso
Funcionamiento	10/10, testeado con garantía
Estado Estético	9/10, algunos rastros de polvo y marcas de uso

Incluye	Damper antivibraciones tipo collarín
Uso Recomendado	Proyectos DIY, prototipos de electrónica y robótica
Compatibilidad con	Microcontroladores PIC, ARM, AVR, STM32, placas de desarrollo Arduino, STM32, Raspberry, etc.
Aplicaciones Ideales	Proyectos de automatización, robótica y máquinas CNC de 3 planos

Controlador de motor paso a paso DM556

El driver DM556 destaca por su amplio rango de voltaje de operación de 20V a 50V DC y su capacidad de corriente pico de salida ajustable entre 1.4A y 5.6A. La inclusión de 15 resoluciones de micro-pasos seleccionables y la protección contra sobretensión y sobre corriente subrayan la versatilidad y seguridad de este controlador. Además, su compatibilidad con motores de 2 fases, modos de operación PUL/DIR y CW/CCW, y la posibilidad de ajustar la corriente de salida a través de interruptores DIP brindan flexibilidad en diversas aplicaciones.



Figura 5. Driver DM556

Tabla 7 Características técnicas de DM556

Modelo	DM556
Voltaje de operación	20V – 50V DC

Corriente pico de salida	1.4 ~ 5.6A
Corriente de señal lógica	7 ~ 10 mA (típico 10 mA)
Frecuencia de entrada de pulso	0~200kHz
Resoluciones de micro-pasos	15 seleccionables de 400-25600
Protección contra sobretensión y sobre corriente	Sí
Resistencia de aislamiento	500MΩ
Adecuado para motores de 2 fases	Sí
Vibración	10-55Hz/0.15mm
Modos de operación	PUL/DIR y CW/CCW
Ajustes de corriente de salida	8 seleccionables de 1.4A a 5.6A a través de interruptores DIP
Dimensiones	118 x 76 x 34 mm

Presupuesto

Tabla 8. Presupuesto.

Descripción	Precio
Motor Paso A Paso Nema23 STP-59D3	\$50,00
Panel Solar	\$90,00
Controlador de motor paso a paso DM556	\$40,00
Sensor	\$20,00
Base del panel	\$100,00
Bateria	\$60,00
Cables	\$25,00
Gastos Varios	\$35,00
Total	\$435,00

2.3.4 Pruebas y puesta en marcha de solución.

Se lleva a cabo la instalación y conexión del panel solar, implementando un proceso organizado y cuidadoso.

Paso 1: Conexión Eléctrica y Mecánica del Panel Solar

La instalación se inicia con la conexión eléctrica y mecánica del panel solar. Se colocan cuatro sensores LDR en paralelo entre sí, distribuidos estratégicamente para dividir el panel en cuatro secciones. Este diseño permitirá una mayor eficiencia en la captación solar, ya que se ajusta a las variaciones de iluminación en diferentes áreas. Además, se orienta el panel en la dirección este-oeste, siguiendo la trayectoria del sol. Se han establecido límites en la instalación mecánica del panel para restringir el rango de giro del motor.

Paso 2: Conexión de Sensores LDR al Arduino

Los cuatro sensores LDR se conectan al Arduino, donde se realiza una calibración individual de cada uno. Este proceso asegura un monitoreo preciso de la intensidad lumínica en cada sección del panel.

Paso 3: Conexión del Motor al Driver

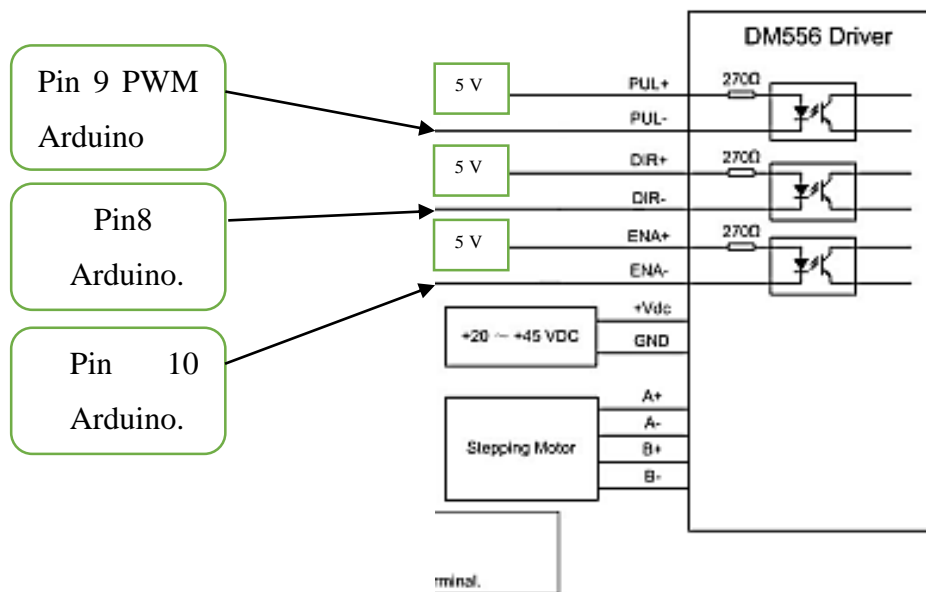


Figura 6. Conexión eléctrica driver al Motor

El motor se conecta al driver según las especificaciones proporcionadas. En este caso, la configuración específica es con el switch 1 y 2 en posición off, el switch 3 en posición on, y la configuración de pulso se establece en 400 pulsos con los switches 5, 6 y 7 en posición off y el octavo switch en posición on.



Figura 7. Configuración Driver DM556

Paso 4: Ubicación en un Área con Suficiente Iluminación Solar

La instalación se realiza en una ubicación específica con suficiente iluminación solar. Esta selección de área garantiza un rendimiento óptimo del panel solar al recibir una exposición adecuada a la luz solar.

Paso 5: Conexión del Panel Solar al Controlador y Batería

Finalmente, el panel solar se conecta al controlador, y este a su vez se enlaza a una batería. Esta configuración permite la carga continua de la batería, optimizando la eficiencia del sistema y asegurando un suministro constante de energía.

El panel solar proporciona una salida de 22V y una corriente de 5A, con una potencia de 120W. La batería opera bajo las condiciones mencionadas anteriormente. El driver proporciona las condiciones necesarias para el funcionamiento del motor. Los sensores están previamente calibrados en Arduino y filtrados en Simulink.

2.3.5 Conclusiones de la práctica

Se proporcionan datos específicos sobre la salida del panel solar, con una potencia de 120W, y detalles sobre la operación de la batería bajo condiciones mencionadas.

La conexión del panel solar al controlador y, posteriormente, a una batería, finaliza el proceso de instalación. Esta configuración permite la carga continua de la batería, optimizando la eficiencia del sistema y garantizando un suministro constante de energía.

La configuración específica del driver DM556, según las indicaciones proporcionadas, garantiza las condiciones necesarias para el funcionamiento óptimo del motor paso a paso. La elección de la cantidad de pulsos y la posición de los interruptores es esencial para el control preciso del motor.

La conexión de los sensores LDR al Arduino, con una calibración individual de cada sensor, proporciona un monitoreo preciso de la intensidad lumínica en cada sección del panel solar, (Anexo A, B, C).

2.4 Práctica 2: Control y Evaluación del Control PID

Se propone como ejercicio central la implementación y evaluación de un controlador proporcional-integral-derivativo (PID) con sintonización Ziegler Nichols para el seguimiento solar. Este control PID se aplicará a un sistema que involucra un motor paso a paso, un driver industrial, Arduino y Simulink.

2.4.1 Objetivo de la práctica

Implementar y evaluar un sistema de control proporcional-integral-derivativo (PID) con sintonización Ziegler-Nichols para el seguimiento solar, utilizando un motor paso a paso, un driver industrial, Arduino y Simulink

2.4.2 Objetivos específicos

Programar e implementar el controlador proporcional-integral-derivativo (PID) en el entorno de Simulink.

Aplicar el método de Ziegler-Nichols para determinar los parámetros óptimos del controlador PID que garanticen una respuesta dinámica eficiente y estable.

Realizar la calibración y verificación del sistema asegurando que la respuesta del motor sea coherente con las señales de control generadas por el PID

Realizar ajustes y optimizaciones en los parámetros del PID, si es necesario, para mejorar la precisión y eficiencia del seguimiento solar.

2.4.3 Procedimiento de la práctica

2.4.3.1 Control y Evaluación del Control PID.

Para implementar un control PID en Simulink, se inicia modelando la planta del sistema. En este caso, el enfoque se centra en la posición del panel solar, por lo que los sensores se convierten en variables que capturan la información del entorno. El trabajo radica en la capacidad de estos sensores para medir la posición actual del panel en relación con la fuente de luz. Al emplear los sensores como variables en el control PID, se logra un sistema dinámico que ajusta automáticamente la posición del panel solar para la captación de luz solar. La inclusión de un control PID, que abarca las componentes proporcional, integral y derivativa, permite un control favorable del sistema, garantizando una respuesta rápida y estable ante cambios en la posición del panel.

Configuración de sensores

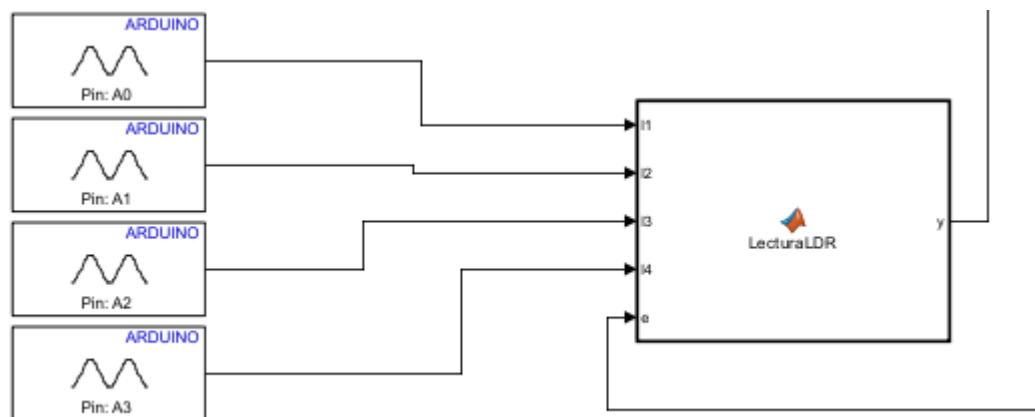


Figura 8. Configuración de sensores.

En la Figura 8, se observa la creación de las entradas analógicas de los sensores, las cuales atraviesan un proceso de filtrado de señales en el bloque de la función "Lectura LDR". Este bloque no solo filtra las señales no deseadas, sino que también proporciona un valor representativo de la sección del panel solar con mayor iluminación, manteniéndose perpendicular a la fuente de luz. La señal resultante se envía al bloque siguiente.

Configuración tren de pulsos

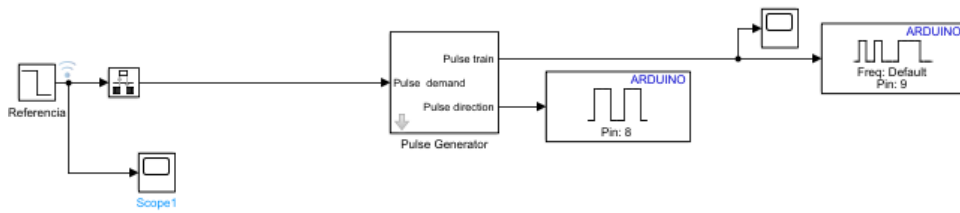


Figura 9. Control del motor a pasos.

En la Figura 9, se presenta el esquema principal sin la conexión de los sensores, que demuestra el control del motor paso a paso a través de la plataforma Simulink. La generación del tren de pulsos se dirige al pin 9, mientras que la información sobre la dirección del motor se transmite mediante el pin 8. Estas señales son enviadas al driver, que, al recibir la instrucción, ejecuta el movimiento correspondiente en el motor de pasos, permitiendo una gestión controlada y precisa del sistema.

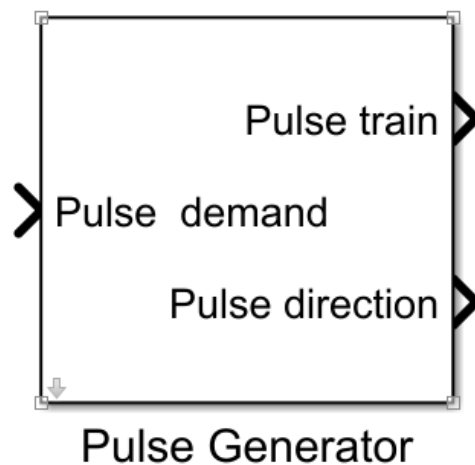


Figura 10. Bloque generador de pulsos.

En la Figura 10 se visualiza el bloque generador de pulsos. En la entrada, se especifica la cantidad de pasos deseados. Las dos salidas incluyen, en primer lugar, el tren de pulsos generado y, en segundo lugar, el pulso de dirección.

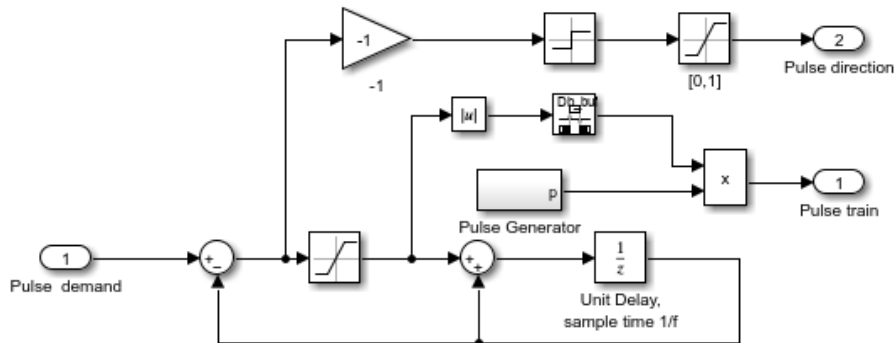


Figura 11. Configuración de tren de pulsos.

"En la Figura 11, se presentan los elementos del subsistema dedicado a la generación del tren de pulsos para el motor paso a paso. En el inicio, se muestra el término 'pulse demand', que representa la posición deseada o de referencia para el motor paso a paso. En la sección superior, este término se dirige hacia la dirección especificada.

Siguiendo la línea principal, el 'pulse demand' se multiplica por la saturación y se retroalimenta, junto con un sumador y un bloque 'delay' de $1/f$, utilizado para la sincronización. Una parte de la saturación se multiplica por el valor absoluto y, posteriormente, se emplea el bloque 'rate transition', encargado de gestionar la transferencia de datos entre diferentes tasas y tareas. Finalmente, se realiza la multiplicación por el generador de pulsos para obtener el tren de pulso resultante.

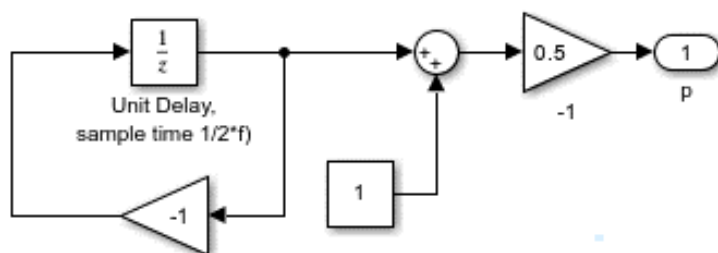


Figura 12. Configuración de la generación de pulsos.

Dentro del sistema de "pulse generator", encontramos el subsistema que se visualiza en la Figura 12. En esta configuración de pulsos, se utiliza el bloque "unit delay"

con un tiempo de muestreo de $\frac{1}{2} * f$ para realizar una retroalimentación de la creación de pulsos. Además, se emplea un sumador que agrega una constante multiplicada por una ganancia como la primera parte del proceso. Este sumador posibilita realizar ajustes y correcciones en la señal de entrada, asegurando una respuesta controlada en la generación de pulsos.

Implementación de sintonización Ziegler Nichols

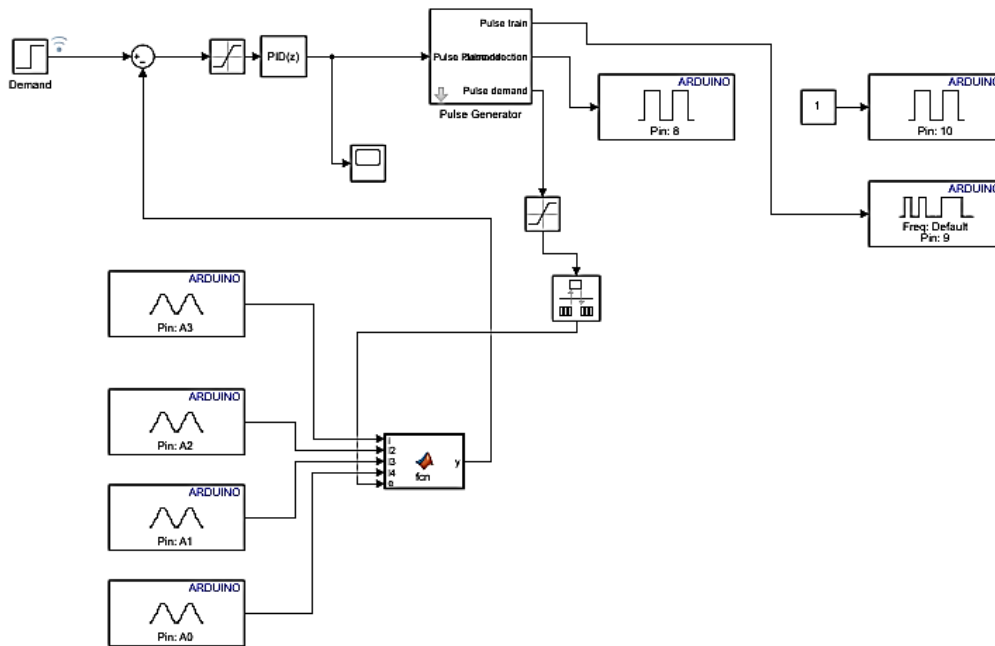


Figura 13. Control PID del motor a pasos.

En la Figura 13, se observa el funcionamiento del control PID, donde el error se retroalimenta al bloque de lectura LDR. Cuando todos los sensores registran un nivel de iluminación superior al 80%, el error se mantiene en 0. Sin embargo, si alguno de los sensores está por debajo del 80%, el error se resta a la entrada. La salida consiste en un tren de pulsos dirigido al pin 9 del Arduino, el cual, a su vez, lo transmite al driver. Este último es responsable de generar el movimiento correspondiente en el motor a pasos.

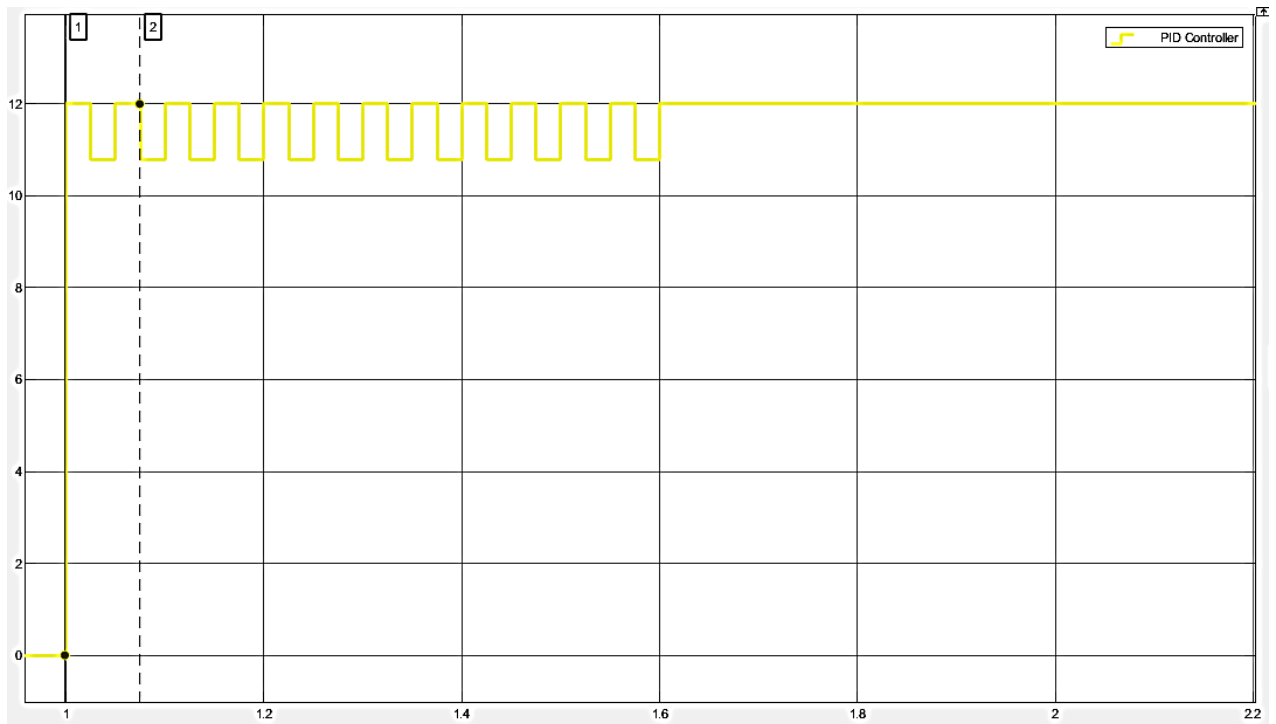


Figura 14. Oscilación permanente.

Para determinar los parámetros del controlador PID mediante el método de Ziegler-Nichols, se emplea el método de la frecuencia. Una vez que el sistema de control ha sido retroalimentado, se inicia el proceso asignando valores al componente proporcional. Se comienza con un valor bajo, generalmente 0.1, mientras que los componentes derivativo e integral se mantienen en 0.

A medida que se incrementa gradualmente el valor del componente proporcional, se observa la respuesta del sistema en forma de una gráfica. El objetivo es aumentar el valor proporcional hasta que la gráfica revele una oscilación continua y estable. En este punto, el valor del componente proporcional que produce esta oscilación continua se identifica como la ganancia última, representada como K_u . Los componentes integral y derivativo se mantienen desactivados durante esta etapa del proceso.

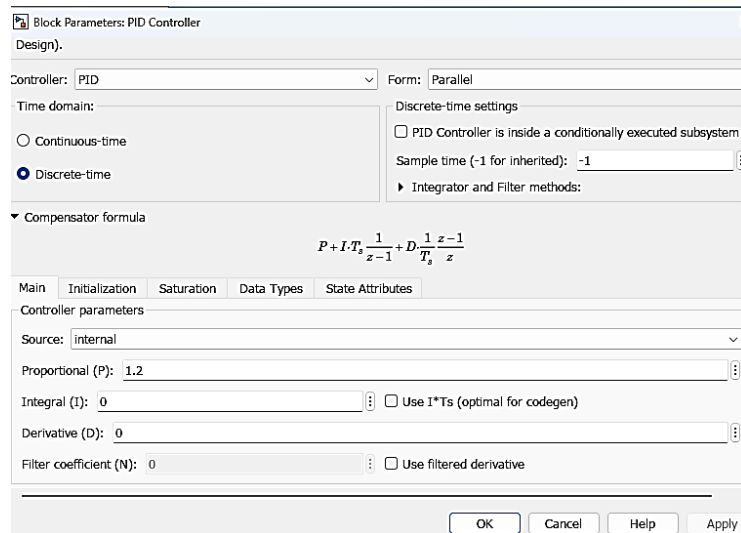


Figura 15. Parámetros del PID.

En la Figura 15, podemos visualizar el proceso descrito anteriormente. Al asignar valores al componente proporcional y observar la respuesta del sistema, hemos llegado a la conclusión de que $K_u = 1.2$. Este valor ha sido identificado en la gráfica como aquel que produce una oscilación continua y estable en el sistema de control. Con K_u establecido, este valor se convierte en un punto de referencia para la posterior sintonización de los componentes integral y derivativo del controlador PID.

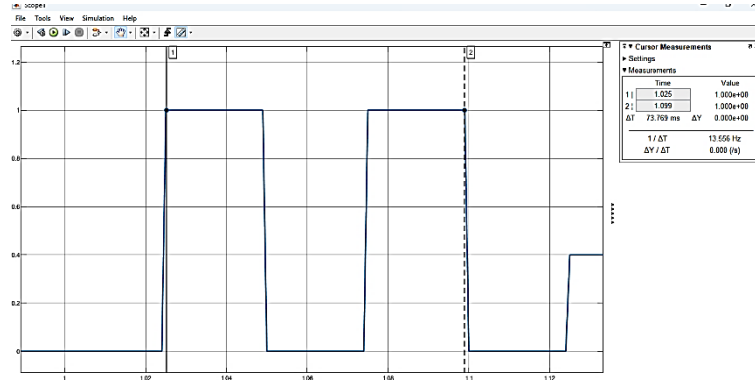


Figura 16. Periodo de oscilación permanente.

En la Figura 16, observamos el siguiente paso del método. Para determinar el periodo de oscilación T_u , se utiliza la información proporcionada por la gráfica resultante. Utilizando la regla proporcionada por el programa de Simulink, colocamos la primera marca en la primera cresta de la oscilación y la segunda marca en la segunda cresta. Medimos el periodo al encontrar la diferencia de tiempo entre estas dos marcas. En este caso, el periodo de oscilación T_u ha sido calculado como 73.76973.769 milisegundos,

representando el tiempo entre dos crestas consecutivas en la respuesta oscilante del sistema.

2.4.4 Resultados

De acuerdo con la Tabla 1 de la respuesta en frecuencia, utilizando los valores previamente obtenidos para K_u y T_u mediante el método de Ziegler-Nichols, podemos calcular los parámetros específicos para la sintonización del controlador PID.

$$K_p=0.72$$

$$T_i=36.88\text{ms}$$

$$T_d=9.22\text{ms}$$

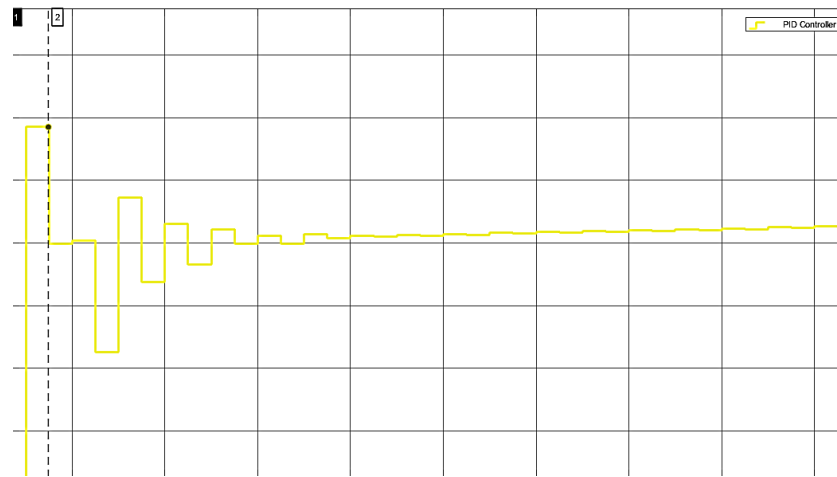


Figura 17. Respuesta del controlador PID

En la Figura 17, se visualiza la respuesta del controlador PID con la sintonización de Ziegler-Nichols. En la representación gráfica, observamos oscilaciones iniciales que, sin embargo, se estabilizan de manera inmediata. Estas oscilaciones iniciales son una característica común al aplicar el método de Ziegler-Nichols y, en muchos casos, son seguidas por una rápida estabilización del sistema. La estabilidad resultante indica que los parámetros del controlador PID, obtenidos a través del método de Ziegler-Nichols, están contribuyendo a un rendimiento satisfactorio del sistema de control

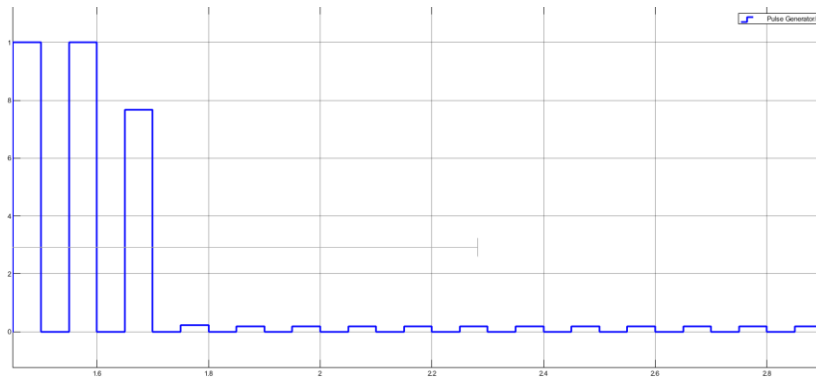


Figura 18. Grafica tren de pulsos con PID.

En la Figura 18, se presenta la gráfica del tren de pulsos enviado al pin 9. Con la ayuda de los sensores, una vez que el motor ha girado para alcanzar la posición solar, se estabiliza y permanece estático, indicando que el panel solar no experimenta más cambios en su orientación. Este estado estacionario es resultado de la sintonización del controlador PID utilizando el método de Ziegler-Nichols, donde se ha logrado un equilibrio entre la velocidad de respuesta del sistema y la minimización del error.

Se observa que el sistema se mantiene en espera, lo que sugiere que está aguardando nuevas órdenes del controlador para realizar ajustes adicionales según sea necesario. Este comportamiento dinámico demuestra la capacidad del sistema para recibir continuamente instrucciones del controlador PID sintonizado con el método de Ziegler-Nichols.

En el sistema embebido del tren de pulsos sin el PID, tiende a permanecer estático y no responde a cambios adicionales. En cambio, con la implementación del control PID y la adición de los sensores, el sistema embebido se encuentra constantemente a la espera de nuevas indicaciones para llevar a cabo el movimiento del motor a través del tren de pulsos y orientar así el panel solar para el seguimiento solar.

Para controlar el motor a pasos en Simulink, es necesario utilizar un tren de pulsos que se genere aparte del tiempo de simulación, permitiendo así una respuesta rápida. Si se genera a través de PWM durante el tiempo de simulación en Simulink, no resulta eficaz, ya que el tiempo transcurrido afecta directamente al momento de controlar, lo que provoca que los giros no se realicen de manera correcta Anexo D.

2.4.5 Conclusiones de la práctica

La aplicación del método de Ziegler-Nichols para la sintonización del PID demostró ser efectiva al proporcionar parámetros iniciales que permitieron una respuesta dinámica adecuada del sistema. La identificación de la ganancia última K_u y el periodo de oscilación T_u facilitó una configuración inicial precisa.

2.6 Conclusiones Generales.

El proyecto se enfocó en la evaluación y especificación de los requisitos técnicos y operativos necesarios para la implementación exitosa del sistema de seguimiento solar. Durante la ejecución del proyecto, se alcanzó una comprensión detallada de los componentes clave, como el motor a pasos, el sistema embebido y los paneles solares, asegurando una compatibilidad efectiva entre ellos.

La inclusión del panel solar, junto con un sistema de control, ha demostrado ser altamente productiva. Los resultados obtenidos revelan una capacidad de captación de energía solar que puede generar voltaje y corriente suficientes para abastecer un sistema con una capacidad máxima de 120 w.

Las pruebas y simulaciones realizadas han proporcionado una evaluación integral del rendimiento del sistema. El controlador PID ha demostrado su capacidad para ajustar dinámicamente la orientación del panel solar, optimizando así la captación de energía solar en respuesta a cambios en las condiciones ambientales. Este resultado confirma la eficacia del diseño propuesto.

2.7 Recomendaciones

- Se debe considerar la opción de paneles solares de mayor potencia para futuras expansiones del sistema.
- Realizar cálculos detallados para determinar la capacidad del panel solar en relación con las cargas eléctricas diarias y la radiación solar promedio en la ubicación.
- Asegurarse de que el controlador de carga solar sea adecuado para la capacidad de la batería y el panel solar.
- Realizar pruebas de descarga profunda y carga para asegurarte de que la batería funcione correctamente y se adapte a las necesidades del sistema.

- Considerar la posibilidad de utilizar sensores más avanzados que puedan proporcionar mediciones más precisas y estables en diversas condiciones de iluminación.
- Explorar las capacidades adicionales de Simulink para modelar y simular comportamientos más complejos del sistema.
- Implementar sistemas de control más avanzados en Simulink para mejorar la eficiencia del seguimiento solar.
- Realizar pruebas bajo diversas condiciones de iluminación para asegurarte de que el sistema funcione de manera robusta y eficiente.
- Considerar la implementación de sistemas de monitoreo remoto para facilitar el mantenimiento y la detección de problemas.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] “¿Qué beneficios tiene la energía solar? | ACCIONA | Business as unusual”. [En línea]. Disponible en: <https://www.accion.com/es/energias-renovables/energia-solar/>
- [2] “La energía solar y su potencial para ayudar a reducir el calentamiento global”, National Geographic. Consultado: el 7 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.nationalgeographic.com/medio-ambiente/2022/04/la-energia-solar-y-su-potencial-para-ayudar-a-reducir-el-calentamiento-global>
- [3] “Ecuador_RAGA_ES_Released.pdf”. Consultado: el 15 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.seforall.org/sites/default/files/Ecuador_RAGA_ES_Released.pdf
- [4] J. A. Duffie y W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 1a ed. Wiley, 2013. doi: 10.1002/9781118671603.
- [5] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, 1a ed. Wiley, 2004. doi: 10.1002/0471668826.
- [6] Vinod, R. Kumar, y S. K. Singh, “Solar photovoltaic modeling and simulation: As a renewable energy solution”, *Energy Rep.*, vol. 4, pp. 701–712, nov. 2018, doi: 10.1016/j.egy.2018.09.008.
- [7] E. Koutroulis y F. Blaabjerg, “A New Technique for Tracking the Global Maximum Power Point of PV Arrays Operating Under Partial-Shading Conditions”, *IEEE J. Photovolt.*, vol. 2, núm. 2, pp. 184–190, abr. 2012, doi: 10.1109/JPHOTOV.2012.2183578.
- [8] X. Xiang, K. Zhang, y J. Chen, “Recent Advances and Prospects of Cathode Materials for Sodium-Ion Batteries”, *Adv. Mater.*, vol. 27, núm. 36, pp. 5343–5364, sep. 2015, doi: 10.1002/adma.201501527.
- [9] M. A. Mazidi, R. D. McKinlay, y D. Causey, *PIC microcontroller and embedded systems: using Assembly and C for PIC18*. Upper Saddle River, N.J: Pearson Prentice Hall, 2008.
- [10] K. J. Åström y R. M. Murray, *Feedback systems: an introduction for scientists and engineers*, Second edition. Princeton: Princeton University Press, 2021.
- [11] J. G. Ziegler y N. B. Nichols, “Optimum Settings for Automatic Controllers”, *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 115, núm. 2B, pp. 220–222, jun. 1993, doi: 10.1115/1.2899060.
- [12] R. M. M. Trujillo, “Algoritmos bioinspirados para la sintonización de sistemas de control con retardo”, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, Ensenada, Baja California, México.
- [13] *Electric Motors and Drives*. Elsevier, 2019. doi: 10.1016/C2017-0-03226-3.
- [14] D. Patranabis, *Sensors and transducers*, 2. ed. Delhi: PHI Learning Private, 2003.
- [15] Jorge, “□ TRABAJO PRÁCTICO 1: COMPORTAMIENTO DE UNA LDR COMO SENSOR DE LUZ”.
- [16] A. E. Becquerel, “Memoire sur les effects d’électriques produits sous l’influence des rayons solaires”, *Ann. Physick Chem.*, vol. 54, pp. 35–42, 1841.
- [17] A. Luque y S. Hegedus, Eds., *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 1a ed. Wiley, 2010. doi: 10.1002/9780470974704.
- [18] “Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021 Toda una Vida’ de Ecuador | Observatorio Regional de Planificación para el Desarrollo”. Consultado: el 7 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en:

<https://observatorioplanificacion.cepal.org/es/planes/plan-nacional-de-desarrollo-2017-2021-toda-una-vida-de-ecuador>

[19] “▷ Captación de energía solar [2021] ”. [En línea]. Disponible en: <https://energiasolar1.com/blog/captacion-de-energia-solar/>

ANEXOS

Anexo A: Instalación del Panel solar y Medición.



Anexo B: Calibración del motor



Anexo C: Calibración de Sensores



Anexo D: Puesta en marcha del sistema 14:33 Pm

