

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPO DE CONTROL AUTOMÁTICO DE
POSICIÓN ANGULAR PARA OPTIMIZACIÓN DE CAPTURA DE RADIACIÓN SOLAR
EN UN PANEL SOLAR

CARLOS AUGUSTO ZIPA BERMUDEZ

YESICA LORENA FARFÁN ERAZO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

BOGOTÁ D.C

2021

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPO DE CONTROL AUTOMÁTICO DE
POSICIÓN ANGULAR PARA OPTIMIZACIÓN DE CAPTURA DE RADIACIÓN SOLAR
EN UN PANEL SOLAR

CARLOS AUGUSTO ZIPA BERMUDEZ
YESICA LORENA FARFÁN ERAZO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones

Director
MSc. JOSÉ LEÓN LEÓN

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ D.C
2021



Atribución-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the license. [Advertencia.](#)

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material

La licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciente.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es>

DEDICATORIA

Este trabajo de grado está dedicado a nuestras familias, por brindar apoyo y consuelo en los momentos más difíciles de nuestra carrera, por entender que el tiempo que se dejó de compartir en familia estaba destinado a cumplir la meta de un título profesional y por forjarnos el carácter necesario para no rendirnos en el proceso.

Dedicado también a aquellas personas importantes en nuestra vida que perdimos y que nos motivaron a cumplir nuestros sueños.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por permitirnos culminar esta carrera profesional, por permitirnos disfrutar de cada momento de la academia, por conferirnos la oportunidad de aprender de nuestros errores y gozar de nuestros triunfos con nuestros seres queridos.

Gracias a nuestras familias por brindarnos todo su apoyo para lograr esta meta y ser nuestra motivación para levantarnos de las dificultades.

Gracias a nuestros, compañeros, colegas y amigos que nos han acompañado durante este tiempo, por su apoyo tiempo y disposición para formar un equipo dispuesto siempre a la ayuda y a no abandonar a nadie en el proceso.

Gracias a todos los profesores que hicieron parte del proceso de formación, gracias por dedicación, paciencia y vocación para transmitir conocimientos, algunos que no solo fueron docentes de una materia, sino, verdaderos maestros y ejemplos de vida.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
1. GENERALIDADES	12
1.1. ANTECEDENTES.....	12
1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	18
1.3. OBJETIVOS.....	20
1.3.1. General	20
1.3.2. Específicos.....	20
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	20
1.5. ALCANCES	22
1.6. LIMITACIONES	22
1.7. MARCO DE REFERENCIA	23
1.7.1. Marco teórico	23
1.7.2. Marco Legal y Normativo	40
1.8. METODOLOGÍA	41
1.8.1. Fase de análisis e investigación.....	42
1.8.2. Fase de diseño y estructuración	42
1.8.3. Fase de desarrollo e implementación.....	43
1.8.4. Fase de pruebas y validación.....	43
2. ANÁLISIS E INVESTIGACIÓN.....	44
2.1. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.....	44
2.2. DEFINICIÓN Y SELECCIÓN DE ACTUADORES	44
2.2.1. Sistema fotovoltaico – Paneles Solares	45
2.2.2. Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica	46
2.2.3. Servomotores.....	48
2.2.4. Controlador o regulador de voltaje	49
2.2.5. Microcontrolador.....	50
2.3. DEFINICIÓN Y SELECCIÓN DE SENSORES	51
3. DISEÑO Y ESTRUCTURACIÓN.....	52
3.1. DISEÑO ESTRUCTURAL PANEL FIJO	52
3.2. DISEÑO ESTRUCTURAL SEGUIMIENTO ANGULAR	54
3.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	56
3.3.1. Diseño sistema de control	57
3.4. DIAGRAMA DE FLUJO	62
3.5. DISEÑO ELECTRÓNICO	64
3.5.1. Alimentación del sistema general.....	64
3.5.2. Sistema de control.....	65
3.5.3. Diseño PCB.....	65
3.5.4. Adquisición y almacenamiento de datos	66
4. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN	67

4.1.	SELECCIÓN DE MATERIAL	67
4.2.	CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURA DEL PANEL FIJO	67
4.3.	CONTRUCCÓN DE ESTRUCTURA DE SEGUIMIENTO.....	69
5.	PRUEBAS Y VALIDACIÓN	72
5.1.	PRUEBAS DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO.....	72
5.2.	PRUEBAS A LA INTEMPERIE	74
5.3.	PRUEBA DE CAPTACIÓN DE ENERGIA	76
6.	CONCLUSIONES.....	88
7.	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	90
	BIBLIOGRAFIA.....	91
	ANEXOS.....	101

TABLA DE FIGURAS

Figura 1 Prototipo control automático a panel solar de 30 W	14
Figura 2 Ubicación de Sensores fotovoltaicos de lectura	15
Figura 3 Funcionamiento Motor y Engranajes Prototipo de Seguimiento Solar de paneles	16
Figura 4 Prototipo Final de Seguimiento Solar de paneles	16
Figura 5 Ubicación de Sensores en Panel Solar.....	17
Figura 6 Prototipo Control Automático de un eje a panel solar	18
Figura 7 Distancia entre la Tierra y el Sol con respecto a la traslación.....	25
Figura 8 Espectro radiación solar	26
Figura 9 Incidencia radiación solar	27
Figura 10 Intensidad de radiación solar en la Tierra [W/m ²]	28
Figura 11 Distribución de la Radiación solar promedio en Colombia.....	30
Figura 12 Composición célula fotovoltaica.....	32
Figura 13 Estructura panel solar	33
Figura 14 Esquema de bloques de un sistema de control	35
Figura 15 Esquema de bloques de un sistema de control en lazo abierto	36
Figura 16 Esquema de bloques de un sistema de control en lazo cerrado...	37
Figura 17 Esquema de bloques de un controlador PID híbrido.....	38
Figura 18 Diagrama de bloques de un microprocesador	39
Figura 19 Diagrama de bloques de un microcontrolador	40
Figura 20 Panel solar modelo SL5TU-18P	46
Figura 21 Batería de 12V 5Ah.....	48
Figura 22 Servomotor MG90S	49
Figura 23 Controlador Regulador solar.....	50
Figura 24 Diseño estructura de panel fijo	52
Figura 25 Diseño estructura panel fijo con ubicación de elementos	53
Figura 26 Inclinación y orientación de panel solar	53
Figura 27 Diseño estructura de seguimiento angular de 360°	54
Figura 28 Diseño estructura de seguimiento angular de 360° con ubicación de servomotores	54
Figura 29 Diseño estructura de seguimiento angular de 360° con ubicación de servomotores y panel solar	55
Figura 30 Diseño estructura de seguimiento angular de 180°	55
Figura 31 Diseño estructura de seguimiento angular de 180° con ubicación de servomotores	55
Figura 32 Diseño estructura de seguimiento angular de 180° con ubicación de servomotores y panel solar	56
Figura 33 Diagrama P&ID de sistema de control de posición angular	57
Figura 34 Sistema de control en lazo abierto.....	58

Figura 35 Sistema de control en lazo cerrado.....	59
Figura 36 Modelo linealizado de sistema de control de posición angular de paneles solares.....	60
Figura 37 Diagrama celda fotovoltaica.....	61
Figura 38 Diagrama de flujo sistema de control.....	63
Figura 39 Regulación de voltaje.....	64
Figura 40 Sistema de Control	65
Figura 41 PCB diseñada	65
Figura 42 Divisor de voltaje - adquisición de datos del panel solar.....	66
Figura 43 Estructura panel fijo con elementos instalados N°1	68
Figura 44 Estructura panel fijo con elementos instalados N°2	68
Figura 45 Estructura panel fijo con elementos instalados N°3	68
Figura 46 Estructura de seguimiento con elementos instalados N°1	70
Figura 47 Estructura de seguimiento con elementos instalados N°2	70
Figura 48 Estructura final de Sistema de control posición angular	72
Figura 49 Edificación (obstáculo) que limita la línea de vista en la dirección Occidente.....	73
Figura 50 Edificación (obstáculo) que limita la línea de vista en la dirección oriente.....	73
Figura 51 Ubicación geográfica del lugar de la ejecución de las pruebas	74
Figura 52 Curva I-V.....	75
Figura 53 Curva P-V	75
Figura 54 Diagrama final P&ID de sistema de control de posición angular ..	76
Figura 55 Diagrama de conexión tarjeta Arduino, modulo SD, servomotores y LDR's	77
Figura 56 Energía captada	77
Figura 57 Voltaje capturado 09 de mayo 2021	78
Figura 58 Panorámica climática 09 de mayo	78
Figura 59 Voltaje capturado 10 de mayo 2021	79
Figura 60 Panorámica climática 10 de mayo	79
Figura 61 Voltaje capturado 11 de mayo 2021	80
Figura 62 Nubosidades presentadas 11 de mayo.....	80
Figura 63 Voltaje capturado 12 de mayo 2021	81
Figura 64 Nubosidades presentadas 12 de mayo.....	82
Figura 65 Voltaje capturado 12 de mayo 2021	82
Figura 66 Voltaje capturado 14 de mayo 2021	83
Figura 67 Voltaje capturado 15 y 16 de mayo 2021.....	84
Figura 68 Voltaje capturado 15 de mayo 2021	84
Figura 69 Voltaje capturado 16 de mayo 2021	85
Figura 70 Ubicación sistemas de control en lazo cerrado y abierto	87
Figura 71 Orientación sistemas de control en lazo cerrado y abierto	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Precio promedio de paneles solares vs características principales .	45
Tabla 2 Características principales panel SL5TU-18P.....	46
Tabla 3 Características de baterías ofrecidas como almacenamiento de energía solar capturada	47
Tabla 4 Características servomotor MG90S	49
Tabla 5 Dimensiones estructura fija.....	67
Tabla 6 Dimensiones estructura de seguimiento	69
Tabla 7 Costo de implementación del proyecto.	71
Tabla 8 Dimensiones estructura final de seguimiento.....	72
Tabla 9 Valores promedio capturados en periodo de pruebas	86

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Características de paneles solares de 5W en el mercado	101
Anexo 2 Características de servomotores en el mercado.....	102
Anexo 3 Características de reguladores controladores de voltaje en el mercado	103
Anexo 4 Características de sensores lumínicos en el mercado.....	104
Anexo 5 Calificación dada a cada sensor	104
Anexo 6 Modelamiento matemático de sistema de control desarrollado en Simulink	105
Anexo 7 Calificación dada a posibles materiales de construcción de estructuras	106
Anexo 8 Valores de voltaje capturado el 09 de mayo	107
Anexo 9 Valores de voltaje capturado el 10 de mayo	108
Anexo 10 Valores de voltaje capturado el 11 de mayo	110
Anexo 11 Valores de voltaje capturado el 12 de mayo	112
Anexo 12 Valores de voltaje capturado el 13 de mayo	115
Anexo 13 Valores de voltaje capturado el 14 de mayo	117
Anexo 14 Valores de voltaje capturado el 15 y 16 de mayo	119
Anexo 15 Video de funcionamiento sistema de control de posición angular para paneles solares.....	124

INTRODUCCIÓN

El incremento de la población mundial ha acelerado de manera considerable¹ el consumo de combustibles fósiles y de recursos naturales no renovables, consecuencia del aumento en la demanda de la energía eléctrica requerida para cubrir ciertas necesidades con el paso del tiempo, pero que en cierta medida son una amenaza para el planeta debido a la contaminación que generan. En Colombia un gran porcentaje de la energía consumida es generada por la manipulación de recursos hídricos², en ciertas ocasiones es necesario la modificación de cauces de ríos y corrientes hídricas generando daños ambientales irreparables y, por otro lado, dada la diversidad étnica, cultural y geográfica de Colombia, no se puede garantizar a muchas comunidades que se encuentran lejanas a una ciudad o un área metropolitana brindar una conexión o un suministro de energía eléctrica al menos estable.

Una de las energías de mayor aumento, es la derivada del uso de la captación de radiación solar a través de paneles solares, llegando a cubrir varias zonas en las que un tendido eléctrico es de difícil implementación. Sin embargo, la eficiencia de captación de estos paneles aún es baja, siendo alrededor del 20%³. En este documento, se plantea una opción para aumentar la captación de radiación solar de los paneles o módulos solares a través de un sistema de control automático de posición angular, el cual mantendrá el panel solar a una posición ideal para el aprovechamiento máximo de la radiación y energía derivada de esta.

En el Capítulo 1 sección 1.2 del documento se describe con mayor profundidad el problema que se busca resolver a través de este proyecto; en el Capítulo 1 sección 1.1, se describen algunos antecedentes nacionales e internacionales que se han registrado abordando la misma problemática, además de algunos avances e investigaciones realizadas a las tecnologías usadas en paneles solares. En el Capítulo 1 sección 1.4, se presenta una justificación del proyecto para abordar la problemática presentada. En el Capítulo 1 sección 1.6, se presentarán las definiciones de algunos aspectos clave para el desarrollo del proyecto. En el Capítulo 1 sección 1.3 y 1.5 se presentan los objetivos a alcanzar, al igual que las limitaciones analizadas que abarcarán la elaboración de este proyecto y la descripción de sus actividades que harán parte de la metodología para el desarrollo de este. A partir del Capítulo 2, se describe el procedimiento realizado para dar cumplimiento al proyecto propuesto.

¹ United Nations, "Población | Naciones Unidas", United Nations (United Nations), accedido 27 de abril de 2021, <https://www.un.org/es/global-issues/population>.

² "CENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN COLOMBIA", accedido 27 de abril de 2021, <https://www.arcgis.com/apps/MapTour/index.html?appid=704786e586d1439bbf8d3419200b02db>.

³ "Rendimiento de Placas Solares - Dimensiones, Potencias y Eficiencia", accedido 12 de mayo de 2021, <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/rendimiento/>.

1. GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

A continuación, se encontrarán algunos proyectos de investigación que se han realizado sobre optimización de captura de radiación solar en paneles por medio de control angular de su posición con el propósito de entender sus resultados, elementos y tecnologías usadas además de enfatizar ideas que puedan aportar en el desarrollo del prototipo de optimización de captura de radiación solar en un panel solar.

Colombia es considerado uno de los países con mayor potencial para el aprovechamiento de energías renovables o limpias como es el sol y el viento, pero su mayor producción energética es basada en la actividad de plantas hidroeléctricas distribuidas por el país, las cuales producen cerca de un 66% de la energía consumida por el país, pero las plantas o centrales termoeléctricas, con un funcionamiento basado en el uso de carbón, diésel o gas, aseguran la producción de energía eléctrica, sobre todo en temporadas de sequía o escasez hídrica⁴. Es allí donde es indispensable aprovechar el potencial que se tiene en energías producidas por el viento y el sol, donde su mayor fuente es evidenciable en el Caribe Colombiano, principalmente en la Guajira.

En la Guajira donde EPM (Empresas Públicas de Medellín), en el año 2014, desarrollaron el “Proyecto parque eólico Jeparachi”, el cual es el primer proyecto impulsador de energía renovable como estrategia para combatir el cambio climático registrado por la ONU⁵.

En Yumbo, Antioquia, Epsa filial de Celsia, realizó la instalación de una granja solar la cual genera un estimado de 16 GWh de energía al año, un promedio a la energía consumida por 8.000 hogares. Este proyecto fue considerado de gran impacto, ya que fue construido en el lugar de antiguo funcionamiento de Termoyumbo, central energética a base de carbón⁶.

Conociendo el éxito de la Granja Solar en Yumbo, Celsia en el año 2018 desarrollo otro proyecto de granja solar, pero en el municipio de Santa Rosa

⁴ “¿Colombia tiene potencial en fuentes de energía renovables? - ELESPECTADOR.COM”, accedido 4 de abril de 2020, <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/colombia-tiene-potencial-en-fuentes-de-energia-renovables-articulo-877125>.

⁵ “¿Colombia tiene potencial en fuentes de energía renovables? - ELESPECTADOR.COM”.

⁶ Proyectos de energía solar que debes conocer en Colombia. Eficiencia energética y energía solar en Colombia [blog]. Blogs CELSIA. 21 de junio de 2018, [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: <https://blog.celsia.com/new/proyectos-de-energia-solar-en-colombia/>.

de Lima, Bolívar. Esta granja solar de 12 hectáreas y 32 mil paneles solares recauda un promedio de 15.7 GWh de energía al año⁷.

Los estudios han demostrado que el ángulo de luz afecta la potencia de salida de un panel solar, como lo indica Yoshitake, un panel o modulo solar que es exactamente perpendicular al Sol produce más energía que un panel solar que no es perpendicular⁸. Teoría también comprobada por Maity Rittick, Mathew Jami, y Hossain Jami, presentado en un artículo a la IEEE, en el cual se estudia el efecto del seguimiento solar en el rendimiento energético usando el simulador PVsyst, donde se modelan sistemas de eje único y eje doble de rastreo en paneles monocristalinos, policristalinos y paneles de silicio amorfo⁹.

Continuando con la mecánica necesaria tras un sistema de control automático, en un artículo publicado por la Universidad de Connecticut (Estados Unidos), en el año 2017, Suneetha Racharla, examina diferentes tipos de sistemas de seguimiento y analizan en detalle sus pros y sus contras. Arrojando entre sus resultados, que el sistema de seguimiento de doble eje de acimut y altitud es más eficiente en comparación con otros sistemas de seguimiento. Sin embargo, en el punto de vista de costo y flexibilidad, el sistema de seguimiento de eje único es más factible que el seguimiento de eje doble¹⁰.

En contraposición, unos estudiantes de ingeniería del EXCT Thadomal Shahani Engineering College de Mumbai (India), en el año 2017 realizaron un prototipo de doble eje y controlado por un Microcontrolador ATmega328, determinaron un aumento del 36% en la captación de energía¹¹.

Con base a las premisas anteriores, estudiantes de la Universidad Politécnica Salesiana de Quito (Ecuador) desarrollaron un prototipo Fuzzy-PID como se observa en la Figura 1, para el control automático de un panel solar de 30W con materiales de PVC, el cual realizaba el giro del rotor a un máximo de 90°

⁷ CELSIA. Inicia operaciones Celsia Solar Bolívar, la nueva granja de generación de energía solar de Celsia para beneficio de los colombianos. [sitio web] [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.celsia.com/es/sala-prensa/inicia-operaciones-celsia-solar-bol237var-la-nueva-granja-de-generaci243n-de-energ237a-solar-de-celsia-para-beneficio-de-los-colombianos>.

⁸ YOSHITAKE Jake. Solar tracker [sitio web]. Enciclopedia Britannica. [Consultado: 3 de abril de 2020], Disponible en: <https://www.britannica.com/technology/solar-tracker>.

⁹ MAITY, Rittick, MATHEW, Jami, HOSSAIN, Jami. Increase in Power Production of Rooftop Solar Photovoltaic System Using Tracking. *2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC)*, 2018 n.5° IEEE (2018), [Consultado: 3 de abril de 2020], Disponible en: <https://doi.org/10.1109/PEEIC.2018.8665488>.

¹⁰ SUNEETHA, Racharla. Solar Tracking System – a Review. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1939-7046, 11 (4 de enero de 2017). [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/19397038.2016.1267816>.

¹¹ MAKHIJA, S. et al., Design implementation of an automated dual-axis solar tracker with data-logging. *International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, 2017, p.1-4, [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ICISC.2017.8068708>.

dividiéndolos en dos movimientos de máximo 45° grados para cada orientación¹².

Figura 1 Prototipo control automático a panel solar de 30 W



Fuente: Repositorio Universidad Politécnica Salesiana de Quito

Así mismo, en la Universidad de Bahrain, de acuerdo a un artículo publicado por la revista Energy Reports, se realizó la implementación de un sistema de control automático para paneles solares usando un PIC18F4455 llamado piloto y un panel solar, ambos montados sobre un motor y a su vez con una resistencia fotovoltaica instalada, donde el piloto realizó un giro constante controlado y el microcontrolador captura los datos de la resistencia fotovoltaica sobre éste, luego realiza una comparación con los datos capturados por la resistencia del panel y el piloto, y si los datos capturados por la resistencia del piloto son mayores se ejecutó una rotación del motor del panel a la ubicación donde fue registrado el valor por el piloto¹³.

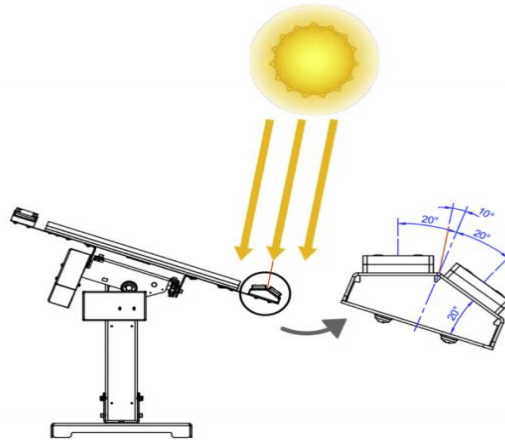
En la Universidad Santa Cruz do Sul, Brasil, en el 2016 se desarrolló un sistema de control, con el fin de realizar un seguimiento de la radiación solar apoyado con lecturas de dos sensores fotovoltaicos (Figura 2), instalados en la cara superior e inferior del panel, los cuales transmitían sus valores a un

¹² RECALDE, Néstor y PRIETO, Fernando. Diseño e implementación de un sistema fuzzy-pid para el control del ángulo de inclinación del panel solar monocristalino de 30 watt. (octubre de 2014). [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7088>.

¹³ GHASSOUL, Mostefa. Single Axis Automatic Tracking System Based on PILOT Scheme to Control the Solar Panel to Optimize Solar Energy Extraction [en línea]. *Energy Reports* 4 (noviembre de 2018): 520-27, [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2018.07.001>.

microcontrolador, y este realizaba el ajuste del panel a un máximo de 180° gracias a un motor instalado en el eje x¹⁴.

Figura 2 Ubicación de Sensores fotovoltaicos de lectura



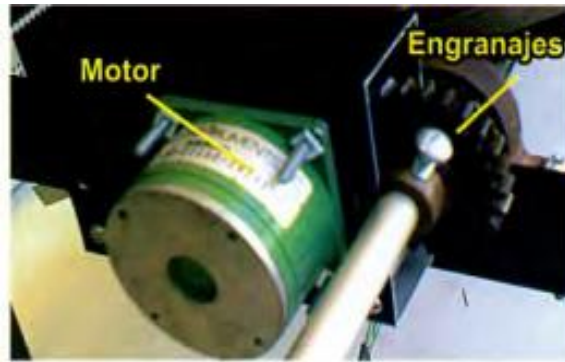
Fuente: Fabio Moacir Hoffmann, University of Santa Cruz do Sul, Brazil

En un artículo de la revista “Ciencia & Tecnología” de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna (Perú), se menciona un desarrollo de dos de sus estudiantes (Edith Paredes Choque y Alberto Cohaila) los cuales diseñaron un sistema de seguimiento solar usando como controlador un PIC 16F84 y un Motorreductor (Figura 3 y 4), el cual dividía un total de 72 pasos en un periodo de 8 horas (Un paso aproximadamente 7 minutos), tiempo estimado como periodo de máximo aprovechamiento solar¹⁵.

¹⁴ HOFFMANN, Fábio Moacir, et al., Monthly Profile Analysis Based on a Two-Axis Solar Tracker Proposal for Photovoltaic Panels [en línea]. *Renewable Energy* 115 (enero de 2018). P 750-59. [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.079>.

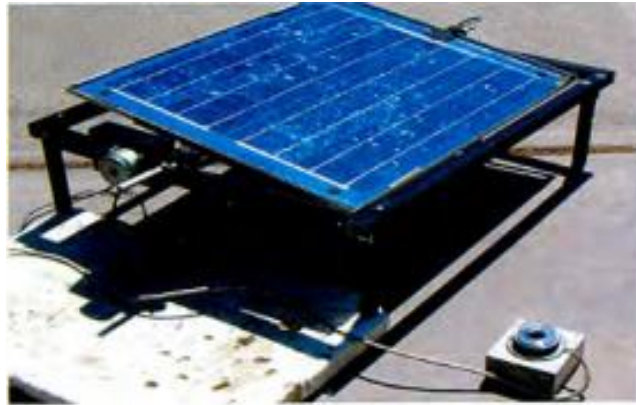
¹⁵ GONZALES, Manuel, COHALIA, Alberto, PAREDES, Edith. Diseño de un sistema de seguimiento solar de un eje para el aprovechamiento de la energía solar en sistemas fotovoltaicos. [Consultado: 3 de abril de 2020] Disponible en: <http://revistas.unjbg.edu.pe/index.php/cyd/article/view/196/189>.

Figura 3 Funcionamiento Motor y Engranajes Prototipo de Seguimiento Solar de paneles



Fuente: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann

Figura 4 Prototipo Final de Seguimiento Solar de paneles



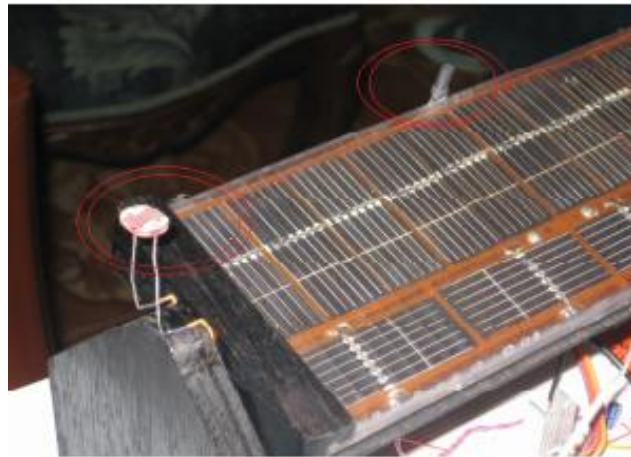
Fuente: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann

Mario Arrieta realizó la implementación de un prototipo con ángulo de inclinación destinado a determinar la eficiencia de este frente a la captura de energía fotovoltaica. En este artículo se especifica con cálculos matemáticos los pronósticos esperados con la implementación del prototipo, llegando a la conclusión que la cantidad de energía recaudada por el panel solar con optimización de ángulo no cumple el mínimo esperado, ya que el sistema usado para realizar la retroalimentación y cambio de su posición consume demasiada potencia dejando un pequeño diferencial positiva de energía recaudada a comparación de un panel fijo¹⁶.

¹⁶ PATERNINA, Mario Arrieta et al., Diseño de prototipo de sistema solar fotovoltaico optimizando el ángulo de inclinación de los paneles solares» 10, n.º 1 (2012): 12.

En la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) en Colombia, se realizó una mejora en un sistema de control automático de posición de paneles solares, anteriormente ya implementado en esta universidad, en el cual se realizó un cambio de sistema de analógico a digital implementando un sistema de control programado en un microcontrolador y basado en la lectura de sensores fotovoltaicos en las esquinas del panel (Figura 5)¹⁷.

Figura 5 Ubicación de Sensores en Panel Solar



Fuente: Universidad Tecnológica de Pereira

En el ámbito local, en la Universidad Católica de Colombia, en el año 2015 estudiantes de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones desarrollaron un sistema de control automático de un eje (Figura 6), para la ubicación de un panel solar monocristalino, usando Arduino Uno como controlador y un display para observación de los datos recaudados por los sensores ubicados en los extremos del panel¹⁸, obteniendo un valor promedio de 53W/h, logrando alimentar un circuito eléctrico de 7 bombillos de 7W de forma ininterrumpida.

¹⁷ FORERO, Jaime Alberto, panel solar con control de posición angular. [en línea]. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, agosto de 2009.

¹⁸ ESLAVA, Andrés. OLAYA, Jonny. Implementación de un panel solar móvil automatizado para la generación de energía limpia [en línea]. Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones. Facultad de Ingeniería. Bogotá. 2015. [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/2511>.

Figura 6 Prototipo Control Automático de un eje a panel solar



Fuente: Universidad Católica de Colombia

1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El desmedido crecimiento poblacional mundial en los últimos 50 años ha generado un aumento en el consumo energético. Sumado a esto, la urbanización que se presenta junto a este proceso ha iniciado una transformación de las fuentes eléctricas que alimentan dichos territorios.

En Colombia el consumo de energía eléctrica demandada en noviembre del año 2019 exhibió un aumento del 4,4% aproximadamente con respecto a noviembre de 2017, el cual fue de 2,7%, es decir, la energía demandada en noviembre del año 2019 fue de 5819 Gw/h (Gigavatios por hora), en tanto que la energía demandada en noviembre de 2017 fue de 5573 Gw/h, según cifras de XM, operador del Sistema Interconectado Nacional (SIN). En el informe presentado por XM, se presenta un aumento aproximado de 3.8% en residencias y pequeñas empresas, mientras que el aumento de energía consumida a nivel industria fue de 5.6% aproximadamente¹⁹.

El crecimiento energético que actualmente presenta Colombia no es ajeno a

¹⁹ FINANZAS. Crece el consumo de energía. [en línea] En: *El Tiempo-Portafolio*, [Consultado: 8 de mayo de 2020], Disponible en: <https://www.portafolio.co/economia/crece-el-consumo-de-energia-524629>.

los problemas energéticos mundiales, ya que de acuerdo a la AIE (Agencia Internacional de Energía), el consumo demandado mundialmente de electricidad aumentará cerca de un 70% en el año 2040²⁰; pero aun así no se puede pensar que lo más preocupante será el aumento energético, sino las consecuencias que este conlleva, entre las cuales se encuentran el incremento de la temperatura global y la emisión de gases que presentan algunos elementos productores de energía eléctrica usados, principalmente los derivados de combustibles fósiles.

Una tecnología que ha crecido mundialmente es la implementación de energías renovables para disminuir el uso de la energía eléctrica producida por fuentes convencionales, tal como es estipulado en el 'Acuerdo de París'²¹, donde 21 de los principales países productores se proponen a partir del año 2020 iniciar un proceso para acelerar la implementación de energías renovables y de esta forma, disminuir la emisión de gases y por lo tanto reducir la temperatura global.

Una de estas energías renovables es la solar, una de las mejores fuentes para suplir la demanda de energía en la actualidad por ser considerada un recurso inagotable²². La captación de radiación solar se realiza a través de sistemas solar fotovoltaicos; estos sistemas están compuestos por paneles solares que han evolucionado con el avance tecnológico y el tiempo, sin embargo presentan una baja eficiencia llegando máximo a un 20% en pruebas de laboratorio²³, debido a varios factores a los cuales se ven expuestos; algunos de estos son propios como las tecnologías de las celdas solares con las cuales se ha fabricado y otros externos como los ambientales, los climáticos y la posición en las cuales son instalados. Este último es de gran importancia debido a que la radiación solar no es emitida en un solo punto ni se presenta de la misma manera, debido a los movimientos de traslación y rotación que realiza la Tierra, reduciendo el rango de energía o potencia que se puede obtener del sistema fotovoltaico.

²⁰ PERIODICO ENERGÍA. La demanda eléctrica mundial crecerá un 70% hasta 2040 y la mitad de la nueva capacidad será renovable. [en línea]. En: *El Periódico de la energía*. [Consultado: 8 de mayo de 2020], Disponible en: <https://elperiodicodelaenergia.com/la-demanda-electrica-mundial-crecera-un-70-hasta-2040-y-la-mitad-de-la-nueva-capacidad-sera-renovable/>.

²¹ GARCÍA ARBELÁEZ, Carolina, et al., el acuerdo de parís así actuará Colombia frente al cambio climático, s. f., 60.

²² GONÇALVES P., SAMPAIO, V. ORESTES, M., Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. vol. 74, no. December 2016, pp. 590–601, 2017.

²³ TOUATI, F., AL-HITMI, M., BOUCHECH, H. (2012). Towards understanding the effects of climatic and environmental factors on solar PV performance in arid desert regions (Qatar) for various PV technologies. *Renewable Energies and Vehicular Technology (REVET)*, 2012 First International Conference on, 78 – 83, Disponible en: <https://doi.org/10.1109/REVET.2012.6195252>

Teniendo en cuenta el incremento del consumo energético y la necesidad de la implementación de sistemas de energía renovable eficientes, se planteó la siguiente pregunta, que se buscó solucionar a través de la aplicación de la Ingeniería Electrónica y su campo de Control Automático:

¿Cómo desarrollar un sistema de control de posición angular de paneles solares para la optimización y aprovechamiento de la radiación solar?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. General

Desarrollar un sistema de control de posición angular de paneles solares que permita aumentar su eficiencia en la captación de energía solar.

1.3.2. Específicos

- Identificar las diferentes tecnologías de paneles solares y su eficiencia en la recolección de energía solar.
- Definir los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema.
- Identificar la instrumentación requerida por el sistema de control.
- Diseñar el sistema de control que permita el seguimiento de la radiación solar para la mayor captación de esta.
- Implementar el prototipo del sistema de control de paneles solares.
- Validar el funcionamiento del sistema.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Actualmente, Colombia busca cubrir la alta solicitud de energía eléctrica eficientemente en las regiones del país, ya que se mantiene la dependencia de fuentes energéticas que se basan en el uso de recursos naturales, las cuales contaminan y dañan gravemente al medio ambiente. Para el 2015 las energías que se consideran renovables representaron el 23,7% de la capacidad de generación de energía en el mundo, dentro de estas destaca la energía fotovoltaica representada por alrededor del 1,2%. Los países líderes en la generación y distribución de energía eléctrica fotovoltaica son: Japón, Estados Unidos, China y Alemania donde se estima que este tipo de energía

ha generado más de 2500 empleos a nivel mundial con un mercado aproximado a los 300 millones de dólares (\$US) anualmente²⁴.

En Colombia, la energía considerada limpia o renovable más distinguida, es la que hace uso del recurso hídrico. Existen represas, embalses, centrales hidráulicas y pozos, aprovechando el agua como el recurso energético que abastece en algunas regiones y zonas alejadas en el país. Cada central no logra abastecer de energía eléctrica a aquellas regiones donde a pesar del tiempo transcurrido, se han presentado distintos inconvenientes dificultando el acceso al servicio, persiste el déficit energético el cual para el 2016 se encontraba alrededor del 32.0%²⁵, representando un valor notorio. De acuerdo con lo anterior, la energía solar es un recurso eficiente para utilizar en esta situación, por su facilidad en la operación e instalación en lugares apartados, presentando una fuente ilimitada, ya que en el país por su ubicación cuenta con una buena capacidad de adquisición solar y principalmente es un recurso amigable con el medio ambiente.

Colombia supera el promedio mundial en cuanto a la irradiación solar, beneficiando y aumentando el potencial del país en la aplicación de energía solar fotovoltaica. La radiación, se presenta con mejor concentración en la región central, la Orinoquía y regiones costeras (Atlántica y Pacífica). El promedio generado es de 4.5 kWh/m²/d, óptimo para cubrir los requerimientos energéticos por medio de sistemas solares fotovoltaicos. Esta radiación logra superar a Alemania (3,0 kWh/m²/d), uno de los países que hace mayor uso de este recurso a nivel mundial²⁶.

El potencial de recursos de Fuentes de Energía Renovable (FER) en Colombia es alto, cuenta con los recursos y con alto potencial de desarrollo. Sin embargo, el avance de estas fuentes es limitado, debido a los altos costos y las barreras en cuanto a la legislación para la generación de electricidad por medio de fuentes renovables, la competencia de las tecnologías convencionales en el SIN (sistema interconectado nacional), la falta de conocimiento sobre las formas, tecnologías y uso de las energías renovables.

Mediante la medición de variables físicas dentro de la electrónica industrial y la instrumentación en los procesos industriales, se busca diseñar, aplicar y mantener sistemas de control automático con componentes eléctricos y electrónicos, usados generalmente en el mejoramiento o aumento de la

²⁴ ZERVOS, Arthouros. LINS, Christine, *Renewables 2016 Global Status Report*, 2016, Disponible en: <https://www.deslibris.ca/ID/10091391>.

²⁵ HERNÁNDEZ RUEDA, Nicolás. RAMÍREZ CONTRERAS, Andrea Ximena. Estudio sobre la sustitución por Energías Renovables (solar fotovoltaica) en las instituciones educativas de básica primaria y secundaria en Colombia: Análisis y posibilidades» En: *Universidad Santo Tomás*, 2015, Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/1071>.

²⁶ ZERVOS, LINS. Op. cit., p.52

productividad de algunos sectores que han evolucionado en los últimos años, debido a las condiciones climáticas y otros factores expuestos anteriormente, los cuales exigen dispositivos que satisfagan o solucionen estas problemáticas, reduciendo costos y tiempos en reprocesos.

A través de este proyecto se busca integrar la energía renovable, en específico la energía solar al sistema eléctrico de alguna comunidad, por lo tanto se realiza una investigación y desarrollo de un prototipo de un panel solar rotatorio, con el fin de disminuir los problemas que se generan en estos, como la alta contaminación, los costos a largo plazo al realizar una disminución en el uso de energía eléctrica generada con tecnologías que puedan contaminar o no contribuyan mitigando el efecto invernadero en el país y así mismo ser capaces de suplir los problemas derivados del insuficiente servicio eléctrico que se presenta en algunas regiones actualmente.

De igual forma, se busca crear un campo nuevo de investigación dentro de la Universidad Católica de Colombia, que permita contribuir al desarrollo e implementar nuevas tecnologías con energía solar para el sector energético del país, la cual puede ser una gran fuente de ingresos para Colombia.

1.5. ALCANCES

- Se desarrollo un sistema de control de posición angular para un panel solar de 5 W.
- Se realizo la implementación y pruebas en una vivienda de un estudiante desarrollador del proyecto.
- Las mediciones comparativas de energía captada por ambos tipos de instalación de panel solar (Fijo y Orientación Automática) se realizaron por un período de 8 días con ambos sistemas de manera simultánea.

1.6. LIMITACIONES

- El rango de tiempo indicado para la ejecución de las pruebas es corto, la duración del proyecto limita la realización de pruebas por un período más largo.
- El presupuesto para el desarrollo del proyecto es limitado, por lo que la elección de los actuadores, sensores y demás elementos deben acogerse a este presupuesto cumpliendo lo mejor posible con criterios de calidad.

1.7. MARCO DE REFERENCIA

Durante el desarrollo de este trabajo de grado fue necesario comprender ciertos conceptos sobre sistemas de control automático y tecnología fotovoltaica entre otros. En el presente capítulo, se exponen los principales conceptos que se tuvieron en cuenta durante el desarrollo de este trabajo.

1.7.1. Marco teórico

1.7.1.1. Energías limpias y renovables

La energía a nivel mundial se produce en su mayoría a partir del aprovechamiento de combustibles fósiles como el petróleo o el carbón, el avance de la tecnología ha permitido implementar nuevas tecnologías para generar un mayor porcentaje de energía eléctrica de forma limpia, disminuyendo el impacto ambiental generado al planeta, con la disminución de gases de efecto invernadero (GEI)²⁷. Estas tecnologías se enfocan en la adquisición de energía de fuentes renovables, las cuales se caracterizan por ser inagotables en su mayoría, por la capacidad de recuperarse por medios naturales o la intensidad de energía que puede contener.

Las fuentes de energía renovables como se mencionan anteriormente son aquellas que por sus características se convierten en inagotables, aunque su disponibilidad en algunas condiciones es intermitente²⁸; pero su uso no causa al medio ambiente alteraciones graves, como la actual dependencia de combustibles fósiles y otros, existen varios tipos de fuentes de energía que son renovables las más utilizadas son:

- Energía solar
- Energía hidráulica
- Energía eólica
- Energía mareomotriz

La universidad de Stanford clasificó las fuentes de energía de acuerdo con el impacto ambiental, consumo de recursos y contaminación, obteniendo como principales resultados²⁹:

²⁷ BBC. Las innovadoras soluciones para generar más y mejores fuentes de energías renovables en el planeta, [en línea] En: *BBC News Mundo*, sec. Otras noticias, (12 de abril de 2018) [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-43712276>.

²⁸ GÓMEZ ROLDAN, Jorge Alberto. Diseño y desarrollo de un sistema solar para la purificación del agua en zonas rurales de Colombia, s. f., 130.

²⁹ ELENES FÉLIX, Natanael, Análisis de factibilidad de un sistema de bombeo de agua con energía solar como propuesta de adaptación para riego en rayón, sonora [en línea]. (octubre

- Hidroeléctrica
- Centrales de carbón
- Gas natural
- Petróleo
- Etanol

- **Energía Solar**

Actualmente y de acuerdo con la clasificación anterior, las fuentes de energía son abundantes, entre los cuales destacan las fuentes de energía renovables, en especial la energía solar, la que proporciona luz y calor, una fuente renovable, universal, gratuita e inagotable hasta el momento, conocida por todos y descrita más a fondo en el siguiente apartado³⁰.

En Colombia, de acuerdo con la Agencia Internacional de Energía, en el entorno energético actualmente la rentabilidad económica de la energía renovable ha adquirido mayor relevancia, por lo tanto, se debe aprovechar su potencial energético. El potencial energético de este tipo de energía genera grandes oportunidades para colaborar a las condiciones energéticas, disminuir el impacto ambiental y contribuir con el desarrollo económico y sustentable del país.

1.7.1.2. Movimiento de la Tierra

- **Rotación**

El movimiento de la tierra contribuye con la recaudación de energía solar, ya que a partir de variaciones respecto a la radiación recibida que dependen de la composición y movimiento de la Tierra, dado que esta se traslada alrededor del sol describiendo una órbita elíptica, por lo tanto, hay días en los cuales esté más cerca y otros más lejos del sol; adicionalmente rota en su eje cambiando el lugar al cual llega la radiación o luz del sol³¹.

La radiación absorbida o dispersada, al atravesar la atmosfera terrestre depende de la trayectoria en el momento de ingreso además de factores como:

- Geografía: Latitud, Irregularidades de la superficie.

de 2012). [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: http://irsitio.com/refbase/documentos/123_ElenesFelix2012.pdf.

³⁰ UNIVERSITAT DE BARCELONA. Nuevas fuentes de energía para un futuro sostenible. ¿Petróleo caro o protección del medio?, [Consultado: 8 de mayo de 2020], Disponible en: <http://www.ub.edu/geocrit/-xcol/143.html>.

³¹ IDEAM [sitio web]. Radiación Solar, [Consultado: 2 de mayo de 2020]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar>.

- Atmosféricos: Vapor, gases (Nubes), partículas naturales y antrópicas
- Otros: Estaciones, hora del día

La distancia entre la Tierra y el Sol es de 149.46×10^6 Km aproximadamente, el cual es llamado Unidad Astronómica (U.A), donde las coordenadas polares de la órbita de la Tierra se describen por:

$$D = UA(1 - e^2)(1 + e \cos \alpha) \quad (1)$$

Donde,

D = Distancia del planeta Tierra al Sol

UA = Unidad Astronómica

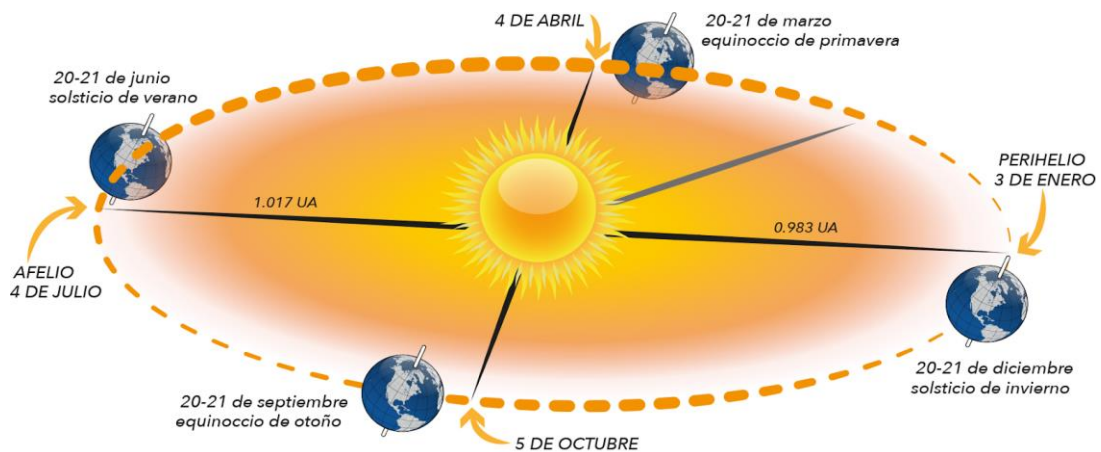
$e = 0,01673$ (Excentricidad de la órbita del planeta Tierra)

α = Posición angular del planeta Tierra

$$\alpha = \frac{2}{(nd - 1)/365} \quad (2)$$

nd = Número del día del año

Figura 7 Distancia entre la Tierra y el Sol con respecto a la traslación



Fuente: Universidad de Veracruz ³²

³² UNIVERSIDAD VERACRUZANA. Estaciones Del Año Y Temporadas Climáticas – Dirección de Comunicación De La Ciencia. [en línea]. México, Veracruz [Consultado: 2 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.uv.mx/cienciauv/blog/estacionesdelanoytemporadasclimaticas/>.

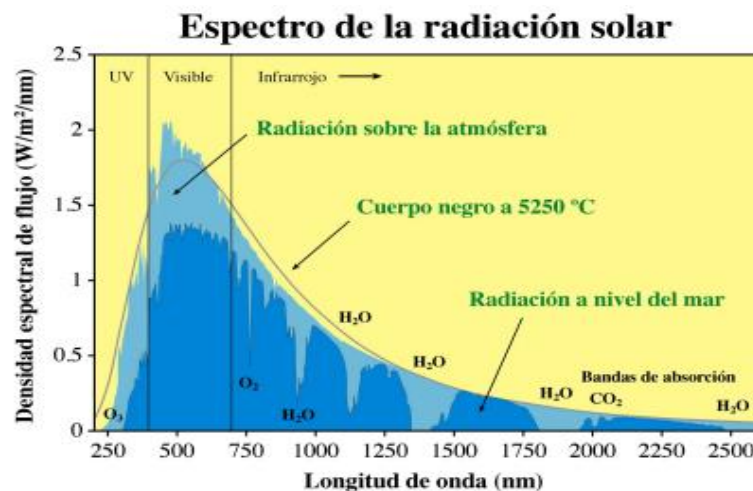
En la Figura 7, se observa la posición y movimiento que efectúa la Tierra alrededor del sol en un año, al igual que la distancia a la cual se encuentra en algunos momentos, donde se muestra que debido a la forma elíptica un sol distante genera menos radiación solar para la Tierra.

1.7.1.3. Variables y sensores para sistemas de control de paneles solares

- Radiación Solar

El Sol como estrella, se encuentra alrededor de una temperatura aproximada a los 5800°K ³³ debido a los procesos mencionados en el apartado anterior (Energía solar), transmite al exterior la energía liberada mediante la radiación solar. Esta transferencia de energía por ondas electromagnéticas no tiene la misma intensidad, por lo tanto, no solo emite energía en el rango óptico visible³⁴ y viajan con cierta distribución espectral desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, la energía liberada transmitida al exterior se conoce como radiación solar³⁵ (Figura 8).

Figura 8 Espectro radiación solar



³³ VISO, Esteban. Más caliente que el interior del Sol [en línea], Xatakaciencia. (9 de marzo de 2016). [Consultado: 8 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.xatakaciencia.com/fisica/mas-caliente-que-el-interior-del-sol>.

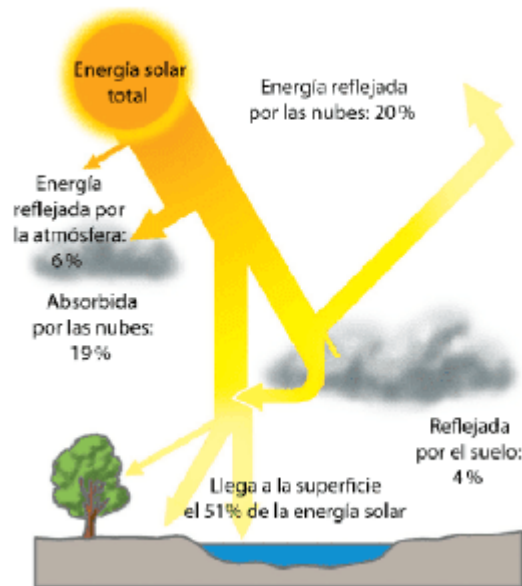
³⁴ BACHILLER, Rafael, El Sol: Nuestra Estrella, Nuestra Energía, s. f., 12.

³⁵ INZUNZA, Juan, Cap. 1 Conociendo la atmósfera. s. f., 34.

Fuente: Trabajo de Grado, Rafael Bachiller, *El Sol: Nuestra Estrella*

Para medir la radiación que alcanza a la Tierra se utiliza la magnitud de irradiación, la cual calcula la energía que alcanza a la Tierra por área y unidad de tiempo, debido a que la radiación saliente del Sol no es la misma que entra en la tierra (*Figura 9*), por las condiciones atmosféricas, como la absorción por los gases de la capa de ozono y la reflexión en las nubes.³⁶

Figura 9 Incidencia radiación solar³⁷



Fuente: *Energeticafutura – Posible energía extraída del Sol*

Algunos tipos de radiación:

- **Difusa:** Es la parte de la radiación emitida por el Sol, sufre cambios por las condiciones atmosféricas.
- **Directa:** Las ondas pasan directamente a través de la atmósfera, sin tener ningún tipo de incidencia por las condiciones atmosféricas.
- **Reflejada:** Las ondas no solo sufren cambios por causas atmosféricas sino también por la reflexión que ocurre en superficies planas, por lo tanto, la radiación es reflejada en suelos, cuerpos u otras superficies situadas alrededor.

³⁶ TEJADA, Carlos y MOTOCHÉ, Leonardo, Posicionamiento de paneles solares usando lógica difusa para prácticas de laboratorio de control automático, s. f., 113.

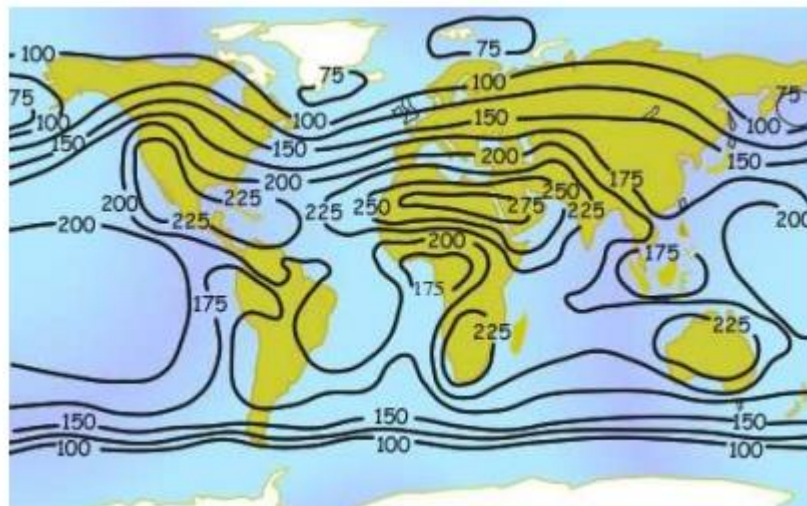
³⁷ ¿Cuánta energía se puede extraer de la radiación solar? [blog], *ENERGÉTICA FUTURA - BLOG del autoconsumo energético actual y del futuro*. 8 de junio de 2018, [Consultado: 8 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://energeticafutura.com/blog/cuanta-energia-se-puede-extraer-de-la-radiacion-solar/>.

Para la energía fotovoltaica la radiación más importante es la directa, debido a la baja incidencia de condiciones atmosféricas pero que no se pueden descartar, al igual que los factores de traslación y rotación, que generan inclinaciones sobre las superficies que recibirá la radiación.

La potencia se denomina irradiancia. En contexto de radiación aceptable, la irradiancia o potencia corresponde a 1 KWatt/m² aproximadamente (cantidad de energía calórica sobre unidad de área) en la superficie de la Tierra.

No obstante, se presenta una diferencia notable entre la radiación recibida y la radiación emitida. La radiación es aplicada solo en los componentes difusos y directos, o en la suma de estos. La irradiancia perpendicular a los rayos solares (o normal directa) fuera de la atmósfera, se llama irradiancia solar la cual equivale en promedio a 1.3 KW/m²

Figura 10 Intensidad de radiación solar en la Tierra [W/m²]³⁸



Fuente: Universidad de Cuenca

En la Figura 10, se muestra la distribución de posible aprovechamiento de la radiación directa como recurso para la generación de energía eléctrica tiene un mayor rendimiento en zonas donde la luz emitida por el Sol presenta escenarios de mayor concentración y constancia, sin disminuir considerablemente su magnitud. Los territorios correspondientes a los trópicos o territorios costeros poseen las más altas condiciones para implementar el aprovechamiento de esta radiación, pero, debido a la alta concentración de contaminación y polución en estas zonas, se presenta obstrucción de la luz solar afectando directamente el principio de funcionamiento de los paneles o módulos solares, por lo tanto se debe procurar la instalación de los paneles en lugares donde el nivel de polución y contaminación no sea muy elevado.

³⁸ MACANCELA ZHUMI, Luis Gerardo, Diagnóstico de la implementación de los sistemas fotovoltaicos correspondientes a la primera etapa del proyecto Yantsa Etsari, s. f., 232.

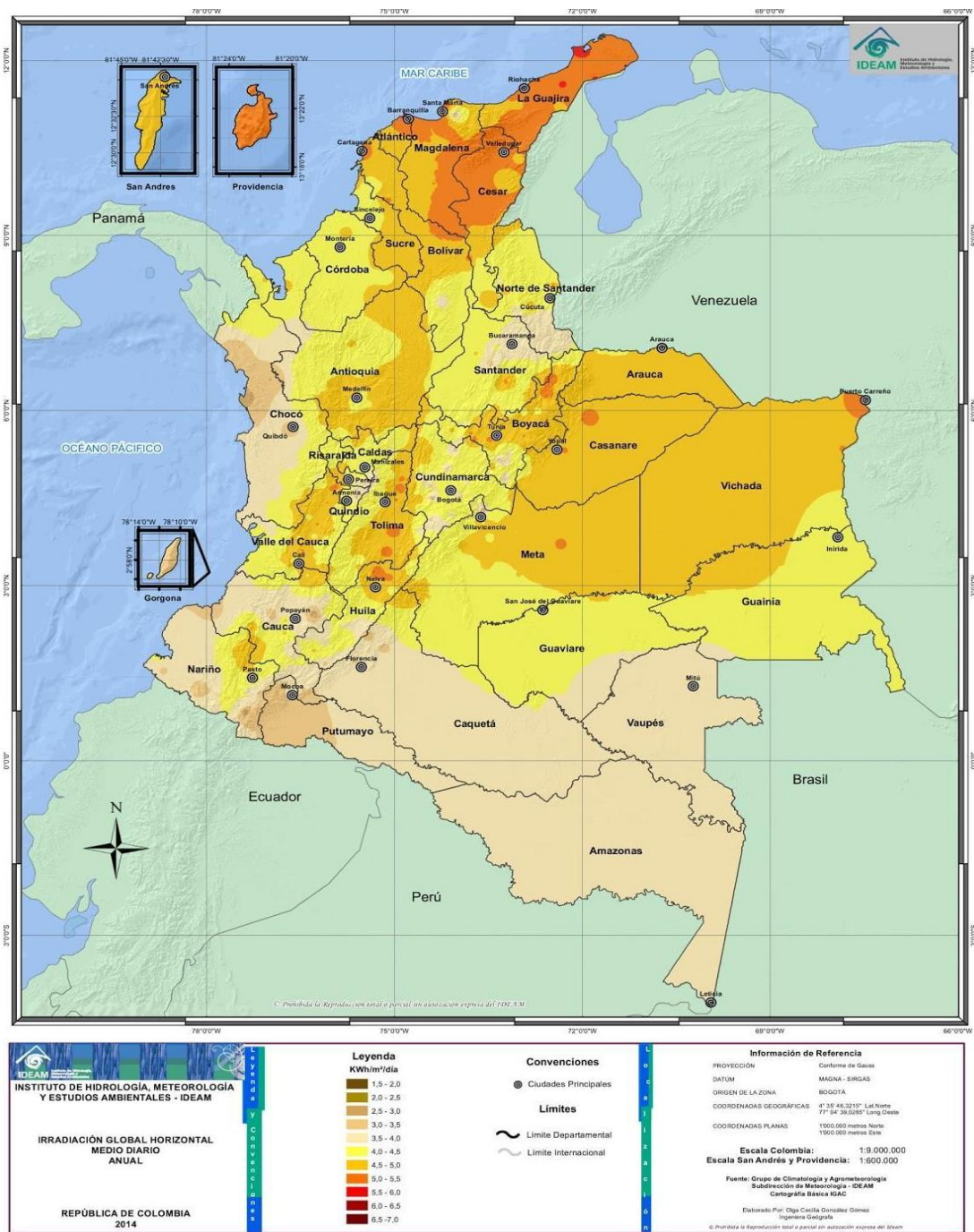
- **Métodos de medición de radiación solar**

El dispositivo o instrumento usado para cuantificar el nivel de radiación es el pirómetro, el cual es expuesto a radiación, donde se utiliza un termopar que mide la diferencia de temperaturas que genera una superficie reflectante contra otra absorbente³⁹, otra forma para medir la radiación es de manera indirecta a través de modelos matemáticos de estimación entre la relación de la radiación y el brillo solar.

La entidad colombiana Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), estableció una RED de vigilancia y monitoreo en cinco lugares ubicados en Riohacha, Bogotá, Pasto, Leticia y San Andrés, para facilitar el reconocimiento y detectar las zonas o regiones nacionales en las cuales las condiciones son las más adecuadas para el uso de la energía solar para la solución de la problemática energética.

³⁹ CANAZA CHIQUÉ, Darwin. Desarrollo de un sistema de control para la medición experimental de la eficiencia en tiempo real de un sistema fotovoltaico (38.4 watts) en el departamento de Puno [en línea]. Trabajo de investigación ingeniero mecánico electricista. Universidad Nacional del Altiplano. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica Electrónica y sistemas. 2018. 95 p. [Consultado: 8 de mayo de 2020]. Disponible en: http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/8052/Canaza_Chique_Darwin.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Figura 11 Distribución de la Radiación solar promedio en Colombia



Fuente: Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia⁴⁰

⁴⁰ IDEAM [sitio web]. Atlas Interactivo - Radiación IDEAM, [Consultado: 8 de mayo de 2020]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>.

En la Figura 11 se presenta el promedio de KWh/m² (unidades de energía calórica sobre la unidad de área) de la radiación solar incidente reunida durante el día en Colombia, encabezando el norte del país con una mayor recepción de radiación solar, seguido de la zona occidental y finalizando con el suroccidente del país.

Colombia se ve favorecida con una alta disponibilidad del recurso solar, gracias a su posición geográfica, comprobable al igual en la Figura 11, en la cual se puede identificar un promedio diario de radiación solar recibida entre 4 y 4.5 KWh/m²⁴¹ en la mayor parte del país, especialmente sobre, la región Andina y Orinoquia; donde, los departamentos del territorio colombiano que reciben mayor intensidad de radiación solar son Casanare y Meta, pequeños sectores de Valle, Tolima, Cauca, Antioquia, Cundinamarca, San Andres y Providencia, Huila, Santander y Boyacá, donde el promedio aumenta a 5 KWh/m². Por el contrario, los departamentos que presentan un menor porcentaje de radiación solar son Nariño, Putumayo y Choco, con 3.5 KWh/m².

1.7.1.4. Principio fotovoltaico

Los materiales semiconductores presentan un comportamiento diferente ante la electricidad, dependiendo de una fuente energética externa, la cual sería en este caso la radiación solar. El efecto fotovoltaico comienza en el instante en el que el fotón (partícula luminosa) impacta con el electrón de valencia de un átomo del material de construcción del panel solar, comúnmente de silicio, recibiendo la energía cinética con la que viajaba el fotón, y si esta energía recibida es superior a la fuerza de atracción del núcleo, el electrón se desprende de su órbita “liberándose” del átomo, por consiguiente, obtiene la propiedad de viajar a través del material. Cada electrón extraído del átomo deja un espacio libre, que a su vez es ocupado por otro electrón extraído de otro átomo. Este movimiento o traslado de los electrones golpeados por el fotón se llama carga eléctrica⁴². La corriente generada por este salto de electrones puede salir del material debido a la presencia de un campo eléctrico polarizado constantemente, ocasionando la polarización de las partículas y el impulso los electrones en un sentido.

- **Panel solar**

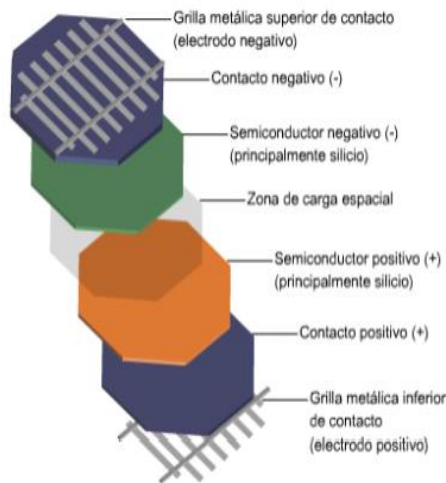
Los paneles o módulos solares es una tecnología la cual permite obtener energía eléctrica aprovechando la radiación solar recibida por el mismo,

⁴¹ IDEAM [sitio web]. Radiación IDEAM, [Consultado: 8 de mayo de 2020]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>.

⁴² PLANAS, Oriol. Efecto fotovoltaico: Energía solar fotovoltaica [en línea]. Energía Solar. (13 de mayo de 2015). [Consultado: 25 de abril de 2020]. Disponible en: <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/efecto-fotovoltaico>.

haciendo uso del principio fotovoltaico el cual consiste en la transformación de la radiación solar en energía eléctrica a través de las células fotovoltaicas (*Figura 12*), definidas como unos dispositivos semiconductores basados en materiales puros o combinados, como el caso de silicio con adición de algunos elementos químicos.

*Figura 12 Composición célula fotovoltaica*⁴³

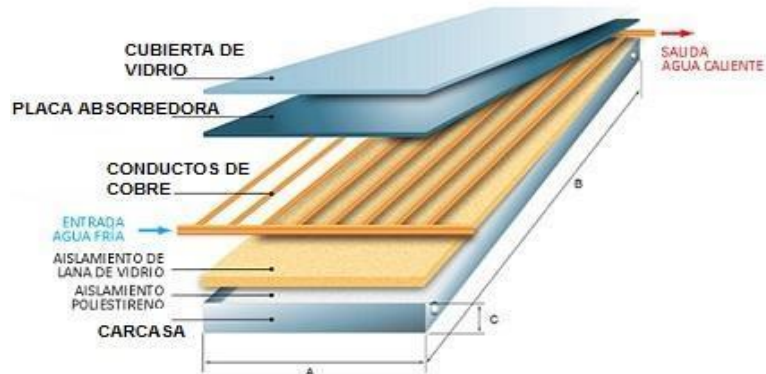


Fuente: Blog Función de la Célula Fotovoltaica

Las células se ensamblan en serie sobre estructuras comúnmente de aluminio (*Figura 13*), las cuales al ser expuestas a la luz o radiación solar reaccionan y generan un voltaje, donde una parte de la radiación recibida rebota (perdida por reflexión), otra cantidad atraviesa la célula (transmisión) y el resto de la radiación logra excitar electrones haciéndolos saltar de una capa o lamina (*Figura 12*) a la otra formando una corriente eléctrica proporcional a la radiación recibida.

⁴³ ARRIETA, Luisa. Energía Solar: Función de la célula fotovoltaica [blog]. Blogspot. 01 de noviembre de 2012. [Consultado: 8 de mayo de 2020]. Disponible en: <http://luisarrieta14.blogspot.com/p/funcion-de-la-celula-fotovolcaica.html>.

Figura 13 Estructura panel solar⁴⁴



Fuente: Menna - ¿Cómo Funciona un panel Solar?

○ Clasificación paneles solares

Actualmente existen distintos criterios o características para clasificar a los paneles o módulos solares como las tecnologías de fabricación, los sistemas fotovoltaicos están compuestos por células solares los cuales cuentan en su mayoría con una baja tasa de contaminación y buenas propiedades fisicoquímicas, a su vez se pueden categorizar en tres principales clases de acuerdo con su proceso de fabricación:

- Las células o paneles monocristalinos se fabrican de un cristal continuo, generalmente silicio, con tonalidades negras y azules. El silicio se caracteriza por su alta pureza y una morfología cristalina casi perfecta, estos paneles miden alrededor de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ y $350 \mu\text{m}$ de espesor, y presentan una eficiencia de uso directo entre el 14% y 17%
- Las células o paneles policristalinos están fabricados de un material similar al de los paneles monocristalinos además de poseer semejanza en las dimensiones de sus células, fundido y vertido en un molde, con forma cuadrada, donde el material a medida que se enfría cristalizándose con imperfectos en algunas zonas, adquiriendo diferentes tonalidades. Alcanzan una eficiencia de hasta el 12%.
- Las células de película delgada pueden ser de silicio galio, telurio de cadmio o el Cobre Indio Diselenido, llamadas amorfas contenidos en dos vidrios, uno frontal y otro de protección posterior. Alcanzan una eficiencia no mayor del 10%.

⁴⁴ MENNA, ¿Como funciona un PANEL SOLAR? Tipos, partes y capacidad, [Consultado: 8 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://como-funciona.co/un-panel-solar/>.

○ Características propias de los paneles solares

Los factores o características propias son los que el panel solar puede llegar a tener en su estructura interna, por defectos de fabricación, cambios en la temperatura de funcionamiento y efectos de reflexión.

La temperatura de funcionamiento del panel fotovoltaico afecta el rendimiento eléctrico y la potencia de salida, los paneles o módulos solares típicos capturan un promedio de 80% de la irradiación solar o potencia recibida, no obstante, una parte de la radiación se transforma en electricidad y la parte restante se convierte en calor, la cual aumenta la temperatura del módulo, produciendo concentraciones y una mayor saturación de corriente, reduciendo la eficiencia y acelerando el deterioro del panel fotovoltaico.

- a) **Tensión en circuito abierto (Voc):** Corresponde al voltaje máximo que se logra obtener del panel solar, bajo condiciones de temperatura e iluminación definidas, correspondiente a una corriente igual a cero.
- b) **Corriente en cortocircuito (Isc):** Es la intensidad de corriente máxima que genera el panel, en ausencia de cargas externas y con las terminales en cortocircuito, bajo ciertas condiciones de iluminación y temperatura, con un voltaje correspondiente a cero.
- c) **Potencia máxima (Pmax):** Cantidad máxima de potencia que produce un panel bajo ciertas condiciones de temperatura e iluminación ya definidas, de acuerdo con el par máximo de la relación I-V.
- d) **Rendimiento o eficiencia del panel:** Hace referencia al porcentaje de potencia de la energía solar convertida en energía eléctrica.

Los modelos de algunos paneles solares pueden alcanzar una potencia de 60W, con diferencias en cuanto al voltaje pico, de acuerdo si el circuito es abierto o cerrado.

Para regular la temperatura varios autores como Bahaidarah⁴⁵, Chandel⁴⁶ y Schiro⁴⁷ proponen las siguientes técnicas para controlar este aumento, como: aire acondicionado, enfriamiento a base de agua con chorros o con micro canales.

⁴⁵ Haitham M.S. Bahaidarah, Ahmer A.B. Baloch, y Palanichamy Gandhidasan, "Uniform Cooling of Photovoltaic Panels: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57 (mayo de 2016): 1520–44, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.064>.

⁴⁶ Haitham M.S. Bahaidarah, Ahmer A.B. Baloch, y Palanichamy Gandhidasan, "Uniform Cooling of Photovoltaic Panels: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57 (mayo de 2016): 1520–44, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.064>.

⁴⁷ Fabio Schiro et al., "Improving Photovoltaics Efficiency by Water Cooling: Modelling and Experimental Approach", *Energy* 137 (octubre de 2017): 798–810, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.164>.

1.7.1.5. Control automático

Los sistemas de control son el resultado de lograr decidir sobre el desarrollo de un sistema o proceso, alterando algunas variables para conseguir que estas o distintas variables actúen de la manera deseada. La teoría de control describe que los procesos o sistemas son formados por varios elementos relacionados, los cuales brindan en su salida señales o datos dependiendo de su entrada (Figura 14). Para realizar la caracterización del sistema no se necesita conocer su funcionamiento interno, o la interacción entre sí con varios elementos, sólo hace falta con saber la relación existente entre la entrada y la salida del proceso que realiza el mismo. La dinámica en los sistemas es uno de los aspectos más importantes, dada su relación entre la variable controlada medida y la alterada por el controlador para incidir en la variable controlada modificando el comportamiento de la señal de salida frente a ciertas variaciones de la señal de entrada.

Figura 14 Esquema de bloques de un sistema de control



Fuente: Elaboración propia

Algunos conceptos que intervienen en los sistemas de control son los siguientes:

- **Sensores:** Son dispositivos que dan a conocer los valores de las variables que se han medido en el sistema, capaces de detectar magnitudes tanto físicas como químicas, también denominadas variables de instrumentación y cambiarlas a variables resistivas o eléctricas. Las magnitudes eléctricas pueden ser una de tipo capacitancia de voltaje, valor de voltaje, corriente eléctrica, resistencia eléctrica, etc.
- **Controlador:** A partir de los valores entregados por los sensores y valores impuestos, se logra realizar el cálculo de la magnitud de la acción que debe ejercerse para cambiar las variables de control de acuerdo con ciertas directrices, hasta lograr disminuir los errores de control a cero.
- **Actuador:** Es el dispositivo encargado de ejecutar la acción calculada por el controlador modificando las variables de control, transforma la energía

eléctrica con la finalidad de generar una acción de modificación sobre un proceso automatizado, para lograr activar el elemento final del proceso de control dependiendo de su origen puede ser denominado “neumático”, “hidráulico” o eléctrico.

- **Técnicas de Control**

- **Lazo Abierto**

En la técnica de control de lazo abierto la salida no afecta la acción de control, por lo tanto, la entrada de referencia tiene una operación o condición fija, en la Figura 15 se observa el diagrama de bloques que conforma un sistema de control de lazo abierto.

Figura 15 Esquema de bloques de un sistema de control en lazo abierto



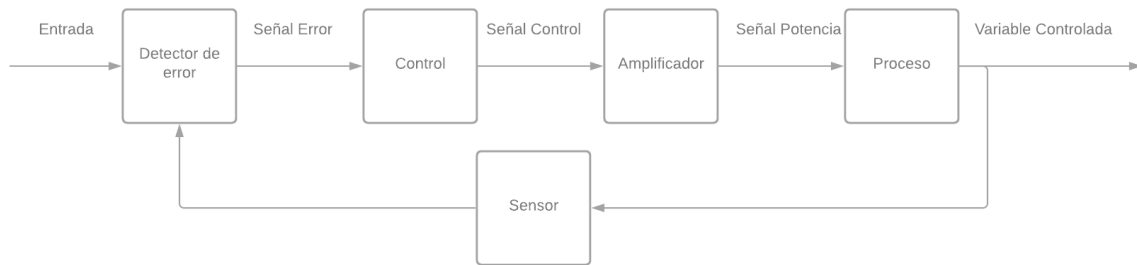
Fuente: Elaboración propia

La exactitud de este sistema en gran parte depende de la calibración de este, la aparición de perturbaciones (señales no deseadas) causa que éste no ejerza la tarea asignada.

- **Lazo Cerrado**

En la técnica de control de lazo cerrado la salida afecta proporcionalmente la acción de control, acción que es conocida como “retroalimentación”, en la Figura 16 se observa el diagrama de bloques que conforma un sistema de control de lazo cerrado.

Figura 16 Esquema de bloques de un sistema de control en lazo cerrado.



Fuente: Elaboración propia

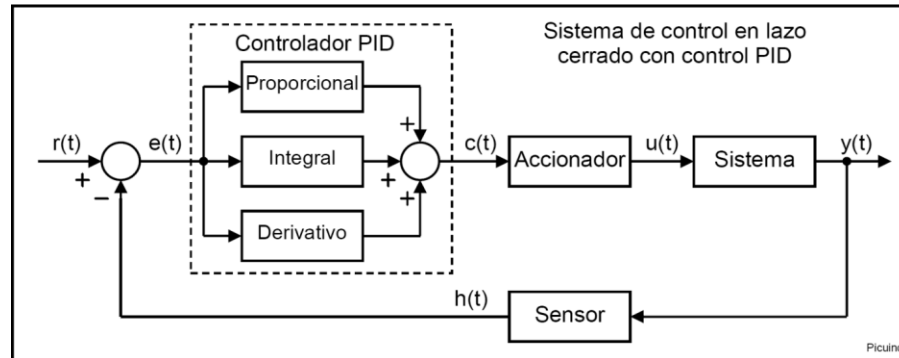
La señal controlada realimenta y compara la entrada de referencia, después a través del sistema envía una señal, proporcional a la diferencia de la señal de entrada y con la señal a la salida, corrigiendo el error o desviación existente, generando un sistema con mayor resistencia a las perturbaciones externas y/o parámetros internos.

○ Control PID

Es una de las estructuras de control comúnmente utilizadas, también llamada regulador PID es uno de los dispositivos que controla el sistema en lazo cerrado (Figura 17), donde las siglas PID corresponden a las siguientes acciones:

- *Proporcional*: Ayuda ingresando los valores presentes del error de control $e(t)$, internamente multiplica la señal de error por K_p , con el fin de minimizar los errores del sistema y aumentar su velocidad cuando el valor es grande al igual que la inestabilidad de este.
- *Integral*: Da valores proporcionales al error acumulado o errores anteriores (adicionados), es decir, calcula las integrales de la señal del error, reduciendo el error en régimen permanente, pero añadiendo cierta inercia al sistema e inestabilidad. La reacción de un sistema depende del error en estado estacionario que presente en comparación con la referencia de entrada.
- *Derivativa*: Aporta valores conforme a la razón de cambio de los errores de control, es decir, a la acción derivada de la señal tomada como error $e(t)$, de modo tal que reacciona rápidamente a los cambios y desaparece en presencia de errores que sean constantes. Presenta una limitación cuando genera grandes señales en presencia de errores de control para frecuencias altas.

Figura 17 Esquema de bloques de un controlador PID híbrido⁴⁸



Fuente: Controlador PID - Control Automático

1.7.1.6. Unidades digitales de control

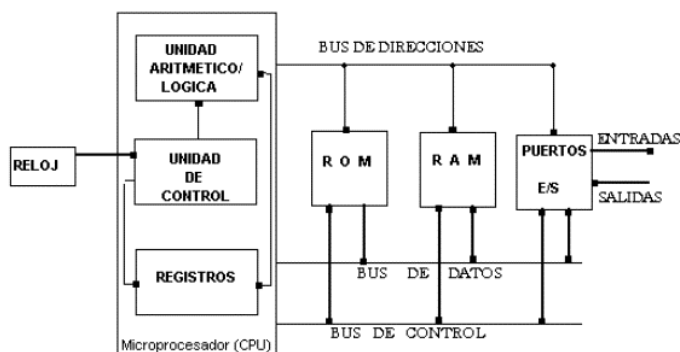
Un controlador es un dispositivo generalmente utilizado para la administración de unos o varios procesos, la unidad de control digital, es una unidad digital capaz de actuar como un sistema de control. De acuerdo con los requerimientos del controlador, estos pueden tomar la forma de un sistema de cómputo avanzado, como los computadores de escritorio o más pequeños como un microcontrolador. Las nuevas aplicaciones dentro del control han sido las promotoras de nuevas tecnologías aplicadas a la electrónica del hardware como al desarrollo del software que lo controla, relacionando varios componentes que en principio parten del microprocesador.

○ Microprocesadores

Los microprocesadores son circuitos los cuales contienen una CPU (Unidad Central de Procesamiento) el cual se ocupa de tomar las instrucciones desde la memoria, interpretarlas y ejecutarlas. La CPU está conformada por el camino de datos, encargado de ejecutar las instrucciones y la Unidad de Control, que las interpreta (Figura 18). Las terminales de un microprocesador se encargan de llevar la información al exterior las líneas de sus buses de direcciones (direcciones de memoria o direcciones de entrada y salida), datos o instrucciones y control (transporte de diversas señales de control), para permitir la conexión con la memoria (RAM y ROM) y los Módulos, el microprocesador es considerado un sistema abierto, ya que dependiendo de la aplicación a la que se destine, su configuración varía.

⁴⁸ Controlador PID - Control Automático [en línea]. Picuino. [Consultado: 2 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.picuino.com/es/arduprog/control-pid.html>.

Figura 18 Diagrama de bloques de un microprocesador ⁴⁹



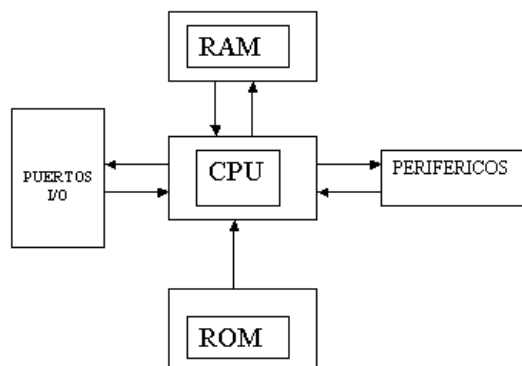
Fuente: ITphone Soluciones - Diagrama de bloques de un microprocesador

○ Microcontroladores

El microcontrolador (UC, μC , o MCU) es considerado un sistema cerrado, un circuito integrado de escala superior, compuesto de varios bloques donde las partes que están contenidas en su interior son la CPU y memoria (RAM y ROM), saliendo las líneas que administran los periféricos de entrada/salida que soportan la conexión por ejemplo de actuadores o sensores de los dispositivos a controlar (Figura 19). Estos son diseñados para aplicaciones embebidas, donde en su memoria solo puede existir un programa que ejecute la tarea asignada, por lo tanto, es comúnmente designado con la denominación de “embedded controller” (controlador incrustado) y en contraste con los microprocesadores utilizados en computadoras personales u otras aplicaciones de propósito general, presenta limitaciones que no es posible modificar, pero reduce el espacio utilizado al igual que el hardware

⁴⁹ Diagrama de Bloque de un Microprocesador. ITphone Soluciones (blog), 6 de febrero de 2013, [Consultado: 08 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://itphones.wordpress.com/2013/02/06/diagrama-de-bloque-de-un-microprocesador/>.

Figura 19 Diagrama de bloques de un microcontrolador⁵⁰



Fuente: *Electrónica Estudio - Diagrama de bloques de un microcontrolador*

Los microcontroladores interpretan y procesan datos e instrucciones de forma binaria o lenguaje máquina (conocido también como un lenguaje de bajo nivel). Algunos de los fabricantes más distinguidos son, Texas Instruments, Motorola, Atmel, Intel, y Toshiba, los cuales ofrecen microcontroladores con características similares, pero todos cumplen con uno de los principales objetivos: leer y componer los programas del usuario.

1.7.2. Marco Legal y Normativo

El sector energético, en específico el sector de energías no convencionales se basan en la siguiente normatividad:

- Ley 51 de 1989, bajo la cual se crea la CNE (Comisión Nacional de Energía), se describen sus funciones, en los cuales destacan la coordinación y aprobación de programas para la generación de energía eléctrica no convencional, sobre todo en áreas no interconectadas⁵¹.
- Ley 697 de 2001. Se definen las fuentes no convencionales de energía (FNCE), al igual que se declara un asunto de interés social el uso racional de energía (URE), avanzando en las políticas de Estado con respecto al URE y las FNCE, reasignando funciones y exigencias en planes de desarrollo para fomentar el uso de energía no convencional⁵².
- Decreto 3683 de 2003⁵³. Creación de la Comisión Intersectorial para el Uso Racional y Eficiente de la energía y Fuente no convencionales de energía (CIURE)

⁵⁰ CALZADA TALAVERA, Michel Vanesa. PICmicro® MCU Estudio - ¿qué es un microcontrolador? [en línea]. Electrónica Estudio. [Consultado: 2 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.electronicaestudio.com/que-es-un-microcontrolador/>.

⁵¹ Congreso de la República Colombia, “Ley 51 de 1989” (1989).

⁵² Congreso de la República Colombia, “Ley 697 de 2001” (2001).

⁵³ Congreso de la República Colombia, “Decreto 3683 de 2003” (2003).

El prototipo de control de posición angular de paneles solares ha sido trabajado en un marco legal en el que se aborda lo referente a los beneficios obtenidos por su implementación a gran escala, donde permite acceder a algunos incentivos tributarios y fiscales con la conformación de la ley 1715 de 2014, donde se controla y normatiza la incorporación de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético colombiano, expresando entre otras palabras la promoción de la investigación y el desarrollo de la energía eléctrica con FNCE y la correcta administración de esta a cambio de beneficios como la reducción del 50% de su declaración de renta a quienes realicen inversiones en este campo; de esta forma logrando fortalecer y unir la participación en el desarrollo e importación de este tipo de tecnología.

Por otra parte, de acuerdo con la resolución 0549 de 2015⁵⁴ del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, expresa la obligación de las constructoras en dar cumplimiento a una serie de parámetros mínimos de construcción sostenible para que todas las nuevas edificaciones desarrolladas en el territorio nacional sean más eficientes en términos de consumo de agua y energía.

Adicionalmente, los generadores de energía renovable tanto en pequeña como a gran escala tendrán la posibilidad de vender la energía eléctrica excedente a la compañía energética de la ciudad, según lo disponga la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG).

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC) ha expedido algunas normas técnicas para ser aplicadas en el diseño y construcción de los sistemas fotovoltaicos, como lo son la NTC 2775 (termino y definiciones), NTC 2883 (módulos FV) y NTC 5287, siendo este último importante en la definición de las baterías solares.

1.8. METODOLOGÍA

Con el fin de cumplir los objetivos propuestos se planeó la siguiente metodología compuesta por cuatro fases. En cada fase se describen las respectivas actividades.

⁵⁴ Escrito por CCCS, “Resolución 0549 de 2015 – Consejo Colombiano de Construcción Sostenible – CCCS”, accedido 6 de abril de 2021, <https://www.cccs.org.co/wp/download/resolucion-0549-de-2015/CCCS>.

1.8.1. Fase de análisis e investigación

En esta fase se recolectó la información necesaria de cada uno de los actores del sistema de control automático y las variables de mayor relevancia para su proceso. Para ello se realizaron las siguientes actividades:

- Determinar las variables involucradas en el proceso de captación de radiación Solar. Esta actividad tuvo como objetivo identificar las diferentes variables a medir por el sistema de control.
- Definición de requerimientos funcionales y requerimientos no funcionales del prototipo.
- Identificación de los métodos de control posibles para el prototipo. En esta actividad se investigó a profundidad los antecedentes correspondientes a control automático de paneles solares. Lo anterior, con el fin de identificar el tipo de sensor a utilizar para el desarrollo del proyecto y las técnicas de control más efectivas.
- Indagación acerca de características de dispositivos y sensores requeridos en el diseño de control automático. Esta actividad tuvo como finalidad recolectar la información necesaria que permitirá determinar los dispositivos apropiados tales como sensores, actuadores y unidades de control, a utilizar de acuerdo con criterios técnicos y económicos.
- En la actividad de selección de sensores y actuadores se dispuso de la información recolectada en las actividades anteriores y a los requisitos definidos para elegir los sensores y actuadores participes en el proyecto desarrollado.

1.8.2. Fase de diseño y estructuración

En esta fase se realizó el diseño lógico del Sistema de Control y físico de las estructuras correspondientes, de acuerdo con la información recolectada en la fase anterior, desarrollando las siguientes actividades:

- Diseño estructural. Se diseñó la estructura física del sistema, teniendo en cuenta los ángulos de inclinación posibles y factores de peso y mecánica del panel solar.
- Diseño del sistema de control. Se seleccionó una técnica de control y se diseñó el sistema lógico definiendo sensores, actuadores y unidad de control.
- En la actividad correspondiente al diseño electrónico se realizó el diseño electrónico de acuerdo con los diferentes componentes seleccionados en actividades pasadas. Se diseñaron los diagramas esquemáticos y placas de circuito impreso.
- Validar el diseño mediante simulación. Se diseñó un modelo dinámico simple del sistema a controlar para simular en el software Matlab.

1.8.3. Fase de desarrollo e implementación

En esta fase se realizó el montaje físico de la estructura y su correspondiente sistema de control y la creación del circuito electrónico de acuerdo con el diseño definido en la etapa anterior. Para dar cumplimiento a esta fase se desarrollaron las siguientes actividades:

- Adquisición de materiales. En esta actividad se realizó la compra y adquisición de los diferentes elementos electrónicos y demás, para iniciar la creación del montaje.
- Construcción de estructura. En esta actividad se construyó la estructura que cumplirá con la función de soporte y transporte del panel solar y el circuito electrónico.
- Creación del sistema mecánico. En esta actividad se realizó el montaje del motor y engranajes necesarios para el movimiento del eje.
- Ensamble electrónico. En esta actividad se llevó a cabo la interconexión de los diferentes módulos electrónicos, como sensores, actuadores y batería.
- En la actividad de programación del controlador se realizó la materialización del diagrama de flujo creado en la fase de diseño, en un código o sketch.
- Conexión de elementos. Siguiendo el esquema electrónico planteado, se realizó la conexión entre sensores y actuadores.

1.8.4. Fase de pruebas y validación

En la fase final, se realizaron las pruebas de funcionalidad y operación del sistema mecánico, de control y las pruebas de eficiencia en la recolección de energía solar en comparación con un panel fijo. Las actividades realizadas en esta etapa fueron:

- Pruebas del sistema de control automático. En esta actividad se probaron los diferentes elementos del sistema de control como sensores y motores con el fin de garantizar el óptimo desempeño de este.
- Pruebas a la intemperie. En esta actividad se probaron diferentes escenarios y en ambiente para determinar la resistencia de este a circunstancias ambientales.
- Prueba de captación de energía. Esta actividad tuvo como objetivo determinar la energía captada por paneles solares con sistema de control de posición angular frente a un panel instalado de manera fija en una estructura.

2. ANÁLISIS E INVESTIGACIÓN

Siguiendo la metodología planteada en el capítulo anterior, se documentó aquella información recopilada en la fase de análisis e investigación. La información obtenida se empleó para dar definición a los parámetros principales, condiciones, variables y elementos activos apropiados para el funcionamiento adecuado del sistema de control.

2.1. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Tras definir los elementos a utilizar teniendo en cuenta sus características y mejor ajuste al presupuesto destinado, se establecieron los siguientes requerimientos que el sistema de control deberá cumplir:

- Se debe garantizar que la energía de alimentación tanto de los sensores como de los motores sea otorgada por la energía capturada por el panel solar y almacenada en la batería.
- El sistema de control debe estar cerrado totalmente.
- El sistema debe garantizar su calibración automática tan pronto es iniciado o cuando se realiza modificaciones.
- Las dimensiones y diseño de la estructura mecánica deberán ser proporcional a las dimensiones del panel solar definido.
- El sistema deberá poseer un punto identificado para situar el controlador, la batería y/o el regulador, el cual no puede ser modificado por el usuario externo, a menos que se genere alguna falla en los elementos.

Los requerimientos no funcionales están definidos de acuerdo con las restricciones y características generales, aunque no se refieren a las funciones específicas que entregaría el sistema mencionadas anteriormente, a continuación, se listan los requerimientos no funcionales siguiendo sus correctas implicaciones:

- El sistema no operara si la temperatura excede las limitaciones de este, ni en caso de daños en la estructura física.

2.2. DEFINICIÓN Y SELECCIÓN DE ACTUADORES

Los actuadores son los elementos que directamente afectan o modifican los procesos del sistema de control, en el caso puntual del “Sistema de control automático de posición angular para optimización de captura de radiación solar en un panel solar” se definieron los siguientes elementos:

2.2.1. Sistema fotovoltaico – Paneles Solares

La elección de los dispositivos a ser usados depende de las características del elemento principal, es decir, el panel solar, para ello, dado el presupuesto destinado para el desarrollo de este proyecto, se realiza una investigación con el fin de determinar el precio promedio de los distintos tipos de paneles solares:

Tabla 1 Precio promedio de paneles solares vs características principales

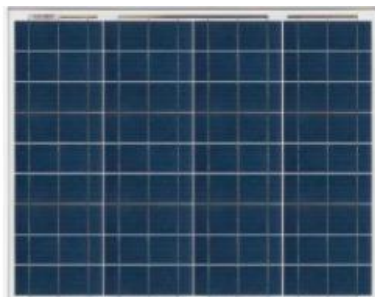
Potencia (W)	Voltaje (V)	Precio Promedio (COP)
55	18	\$ 227.136
320	36	\$ 849.660
80	18	\$ 278.000
20	18	\$ 109.480
180	24	\$ 497.420
5	12	\$ 42.166

Fuente: Elaboración propia

El resultado de la investigación, arrojo que el panel solar de mejor ajuste al presupuesto destinado es un panel de 5W de Potencia y un voltaje de 12 V. Tras esto, se amplía la investigación con el fin de determinar la oferta de paneles solares en el mercado con sus correspondientes características, obteniendo los resultados mostrados en el **Anexo 1**.

Dado las características adquiridas en la investigación y los beneficios ofrecidos por el proveedor, se realiza la selección de un panel solar modelo SL5TU-18P (*Figura 20*) en el cual resaltan las características descritas en la Tabla 2.

Figura 20 Panel solar modelo SL5TU-18P ⁵⁵



Fuente: SolarConsum Green Energy

Tabla 2 Características principales panel SL5TU-18P

Especificación	Valor
Potencia Máxima [W]	5W
Tensión [V]	12V
Voltaje de Max potencia [V]	18,36
Numero celdas	4*9
Dimensión [mm]	250*220*18
Peso [kg]	0,8
Tecnología	Policristalino

Fuente: Elaboración propia

2.2.2. Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica

Posterior a la definición del panel solar a ser usado, se debe realizar la selección del sistema de almacenamiento de energía eléctrica (batería) a ser usado para reunir la energía capturada por el panel, para ello, se utiliza el parámetro Ah⁵⁶ (Amperios por hora). Las variables fundamentales que definen la capacidad de la batería se describen en la tabla 2.

Apoyados en la ecuación 3, se realiza el cálculo de la capacidad de la batería requerida:

⁵⁵ "Módulo fotovoltaico policristalino 50W 12V 36 células", Solar Consum - Tienda online de energía solar, accedido 30 de marzo de 2021, <https://www.solarconsum.com/solar/paneles-solares-modulos-fotovoltaicos/40-modulo-fotovoltaico-policristalino-50w-12v-36-celulas.html>.

⁵⁶ "Conceptos básicos sobre baterías solares", accedido 30 de marzo de 2021, <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/equipos-fotovoltaicos-baterias-solares-parte-iii/>.

$$C_n[Ah] = I_n[A] * Duración\ de\ la\ carga / descarga [h] \quad (3)$$

Donde:

C_n = Capacidad nominal de la batería

I_n = La corriente de carga o descarga.

Se considera la corriente nominal o corriente de carga/descarga en 800 mA, dado que es la corriente de consumo promedio de los servomotores.

Teniendo en cuenta la exposición a la radiación del territorio colombiano de un promedio de 12 horas en la mayoría del ciclo traslacional terrestre, se toma como periodo de carga de la batería la mitad del periodo de tiempo de exposición diario promedio, es decir, 6 horas.

$$C_n[Ah] = 800mA * 6 [h] \quad (4)$$

$$5[Ah] \quad (5)$$

Tras obtener el valor nominal de la batería, se realiza una cotización de los distintos tipos de baterías ofrecidas en el mercado, obteniendo como resultado los valores mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3 Características de baterías ofrecidas como almacenamiento de energía solar capturada

Variable	Batería	Netion 12V-5Ah	Netion 12V 12AH	HKbil 6FM5.0
Capacidad nominal (Ah)		5	12	5
Temperatura nominal de Funcionamiento (°C)		25 °C ± 3 °C	25 °C ± 3 °C	25 °C
Tensión final de carga (V)		12	12	12
Dimensiones (cm)		10.7 * 10.1 * 7	10.1 * 9.5 * 9.8	9 * 7 * 10.1
Peso Aproximado (Kg)		1.65 Kg ± 5 %	3.65 Kg ± 3 %	1.65 Kg
Precio promedio (cop)		\$47.309	\$ 99.400	\$ 78.290

Fuente: Elaboración propia

Dada las dimensiones del proyecto y de acuerdo con la ecuación 3 se elige la batería de ciclo profundo de 12V, con una carga nominal de 5Ah mostrada en la Figura 21.

Figura 21 Batería de 12V 5Ah⁵⁷



Fuente: Osaka Electronics LTDA

2.2.3. Servomotores

Un servomotor es un motor eléctrico que podrá controlar tanto la velocidad, como la posición del eje⁵⁸, estos realizan el giro controlado del panel solar dirigidos por un sistema de control en Arduino Mega basado en un posicionamiento del sol detectado por LDR's (*Light Dependant Resistor*). Al igual que lo realizado con los elementos anteriores, se ejecuta una investigación con el fin de determinar los tipos de servomotores, sus características de mejor ajuste para el sistema de control de posición angular de paneles solares. De acuerdo con el **Anexo 2** se elige el servomotor MG90S debido a la piñonera metálica y la capacidad de torque que posee a pesar de su tamaño. (*Figura 22*), los detalles específicos del servomotor se pueden observar en la Tabla 4.

⁵⁷ "Bateria Ciclo Profundo 12V 5Ah", Osaka Electronics Ltda, accedido 10 de abril de 2021, <https://osakaelectronicsltda.com/pilas-baterias/baterias-ciclo-profundo/bateria-ciclo-profundo-12v-5ah.html>.

⁵⁸ <https://www.areatecnologia.com>, "servomotores", accedido 31 de marzo de 2021, <https://www.areatecnologia.com/electricidad/servomotor.html>.

Figura 22 Servomotor MG90S⁵⁹



Fuente: Sandorobotics

Tabla 4 Características servomotor MG90S

Características servomotor MG90S	
Tipo de piñonería	Metálica
Peso (g)	13.4
Dimensiones (mm)	22.5 x 12 x 35.5
Voltaje de operación (V)	4.8 - 6
Fuerza de torque a 4.8 V (kgf·cm)	1.8
Fuerza de torque a 6 V (kgf·cm)	2.2
Velocidad de operación a 4.8 V (s/60°)	0.1
Velocidad de operación a 6 V (s/60°)	0.08
Ancho de pulso (μs)	5

Fuente: Datasheet fabricante

2.2.4. Controlador o regulador de voltaje

Un controlador o regulador de voltaje cumple una función principal de protección al elemento de almacenamiento de energía eléctrica, es decir, la batería, con el fin que esta no entre en situaciones atópicas que puedan afectar su funcionamiento o dañarla. Su funcionamiento es basado en un comparativo de los valores de carga de la batería y suministrar únicamente aquellos que se encuentran en un rango determinado, con el fin de no afectar sus ciclos de carga y descarga⁶⁰. Al igual que lo realizado con los elementos anteriores, se ejecuta una investigación con el fin de determinar los tipos de reguladores y sus características de mejor ajuste para el sistema de control de posición angular de paneles solares. **Anexo 3.** El controlador regulador que mejor se

⁵⁹ “Servomotor Metálico Tower Pro MG90S – Giro Continuo | SANDOROBOTICS”, accedido 10 de abril de 2021, [https://sandorobotics.com/producto/mg90s-gc/..](https://sandorobotics.com/producto/mg90s-gc/)

⁶⁰ “Equipos solares: Regulador (controlador) de carga”, accedido 31 de marzo de 2021, [https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/equipos-solares-regulador-controlador-de-carga/.](https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/equipos-solares-regulador-controlador-de-carga/)

adapta al sistema a desarrollar es el Regulador Controlador Solar por PWM de 12/24V 10A mostrado en la *Figura 23* debido a la capacidad para controlar la corriente de carga para las baterías, modificando los ciclos de trabajo del voltaje recibido de los paneles.

Figura 23 Controlador Regulador solar⁶¹



Fuente: Osaka Electronics LTDA

2.2.5. Microcontrolador

El microcontrolador del sistema cumple la función principal del sistema de control, la cual será el análisis de la información capturada por los sensores y su posterior transformación en señales eléctricas para el movimiento de los motores a la posición indicada. Tal como se realizó en la elección de los elementos anteriores, se ejecuta una investigación con el fin de determinar los tipos de microcontroladores y características útiles con el fin de seleccionar uno y usar en el sistema de control de posición angular de paneles solares. En primer lugar, se identificó el posible uso de un PIC (Programmable Integrated Circuit), dada su reducción de espacio y facilidad de incorporación en la PCB desarrollada, el cual fue descartado, ya que para realizar la programación de este elemento es necesario contar con un dispositivo de programación al cual se dificulta su acceso a las instalaciones de la Universidad Católica de Colombia dado la situación sanitaria pública mundial actual ocasionada por la propagación del virus Co-Vid19.

Por el anterior motivo, se decide usar alguna de las tarjetas de Arduino, dado principalmente su fácil programación y reuso sumados al fácil acceso. Finalmente, se decide usar el microcontrolador Arduino Uno basado en chip ATmega328 que brinda entre sus posibilidades la interacción entre pines

⁶¹ "Módulo fotovoltaico policristalino 50W 12V 36 células".

PWM, digitales y análogos, además de la posibilidad de brindar alimentación a otros dispositivos.

2.3. DEFINICIÓN Y SELECCIÓN DE SENSORES

Teniendo en cuenta los requerimientos planteados en el numeral 2.1 “Requerimientos del Sistema”, se realizó la elección del sensor de mejor ajuste dependiendo de una serie de características mostradas en el **Anexo 4**, con el objetivo de dar cumplimiento a los requerimientos planteados.

De acuerdo con los datos mostrados en el **Anexo 4**, se eligió el sensor del sistema de control de posición angular, las fotorresistencias o LDR (*Light Dependant Resistor*), ya que, con estos, se facilita su incorporación y manejabilidad en conjunto con el panel solar.

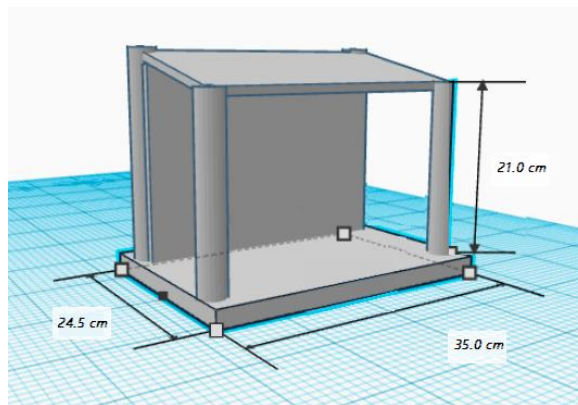
3. DISEÑO Y ESTRUCTURACIÓN

En este capítulo, se documentará y describirá las estructuras usadas para apoyar los paneles solares en sus modelos de panel fijo y de control automático de posición angular, así mismo, el diseño lógico de su correspondiente sistema de control.

3.1. DISEÑO ESTRUCTURAL PANEL FIJO

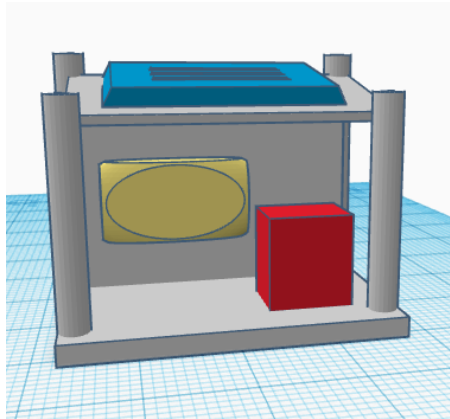
Apoyados en el software Tinkercad, se realizó el diseño preliminar de la estructura en la cual se ubicará uno de los paneles solares, esta estructura cuenta con un espacio disponible para la instalación de la batería, regulador de voltaje y sus correspondientes conexiones.

Figura 24 Diseño estructura de panel fijo



Fuente: Elaboración propia

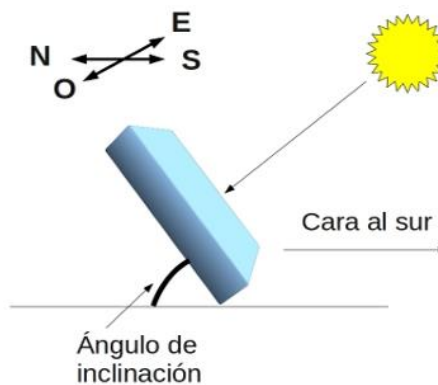
Figura 25 Diseño estructura panel fijo con ubicación de elementos



Fuente: Elaboración propia

Para el diseño de la estructura mostrada en lo figuras 24 y 25, se tuvo en cuenta las dimensiones de los actuadores y su correspondiente orientación para la lectura de los datos, en el caso del regulador; respecto a la inclinación del panel solar, la cual de acuerdo con investigaciones desarrolladas entre ellas una por la Universidad de la Salle⁶², se determinó que gracias a la ubicación geográfica de Colombia, la cual se encuentra cercana a la línea del ecuador, la posición del sol durante la mayoría del año presenta poca inclinación, por tal motivo se sugiere que su instalación sea correspondiente a 10° de inclinación y una orientación hacia el sur (*Figura 26*).

Figura 26 Inclinación y orientación de panel solar



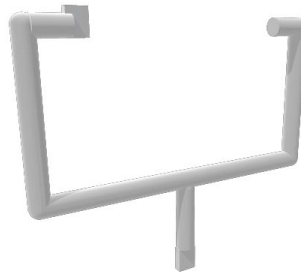
Fuente: Solesco

⁶² Andres Felipe Neira Reyes y Angie Yuranys Ardila Torres, "Metodología para el diseño de sistemas de generación distribuida para zonas rurales en Colombia", s. f., 58.

3.2. DISEÑO ESTRUCTURAL SEGUIMIENTO ANGULAR

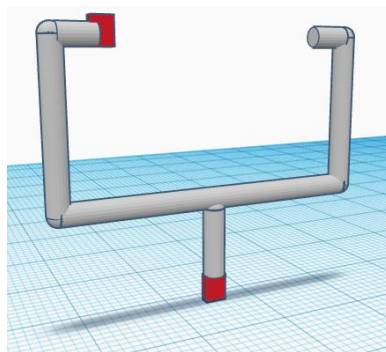
Apoyados en el software Tinkercad, se realizó dos diseños preliminares de la estructura de seguimiento angular de la energía solar, una de las estructuras con un cubrimiento de 360° (Figuras 27,28 y 29) en la cual se imitará el movimiento de un girasol, caracterizado por la ubicación del motor principal en la parte inferior de la estructura; mientras, la otra estructura se diseñó con un cubrimiento de 160° (Figuras 30, 31 y 32) caracterizada por distribuir el esfuerzo del movimiento del panel en ambos servomotores y una base ancha para mantener el equilibrio.

Figura 27 Diseño estructura de seguimiento angular de 360°



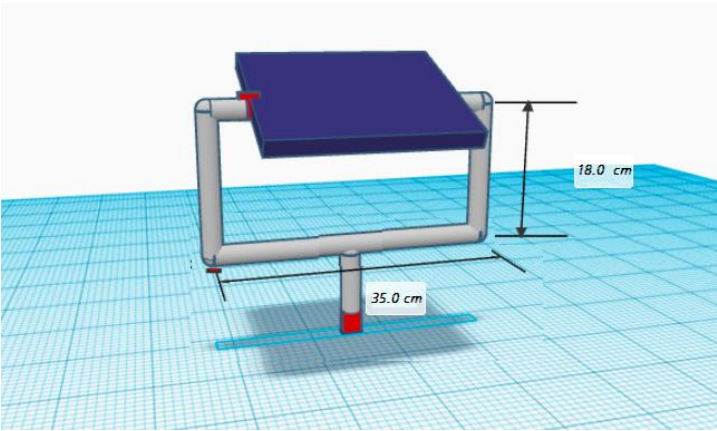
Fuente: Elaboración propia

Figura 28 Diseño estructura de seguimiento angular de 360° con ubicación de servomotores



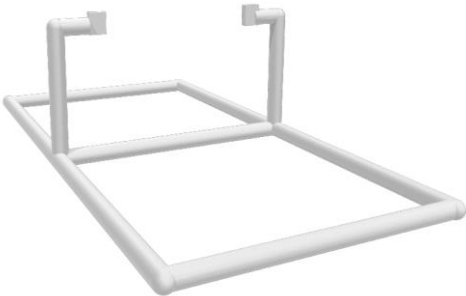
Fuente: Elaboración propia

Figura 29 Diseño estructura de seguimiento angular de 360° con ubicación de servomotores y panel solar



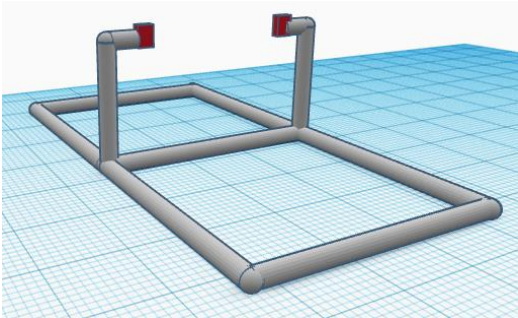
Fuente: Elaboración propia

Figura 30 Diseño estructura de seguimiento angular de 180°



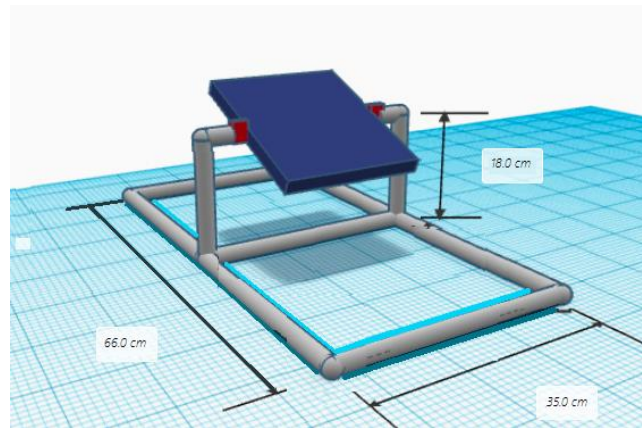
Fuente: Elaboración propia

Figura 31 Diseño estructura de seguimiento angular de 180° con ubicación de servomotores



Fuente: Elaboración propia

Figura 32 Diseño estructura de seguimiento angular de 180° con ubicación de servomotores y panel solar



Fuente: Elaboración propia

3.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Siguiendo la norma ANSI/ISA 5.1 de estandarización de simbología para la representación de procesos, se realizó el diseño de un diagrama P&ID mostrado en la *Figura 33* con el fin de identificar el lazo de control del sistema y su correspondiente conexión.

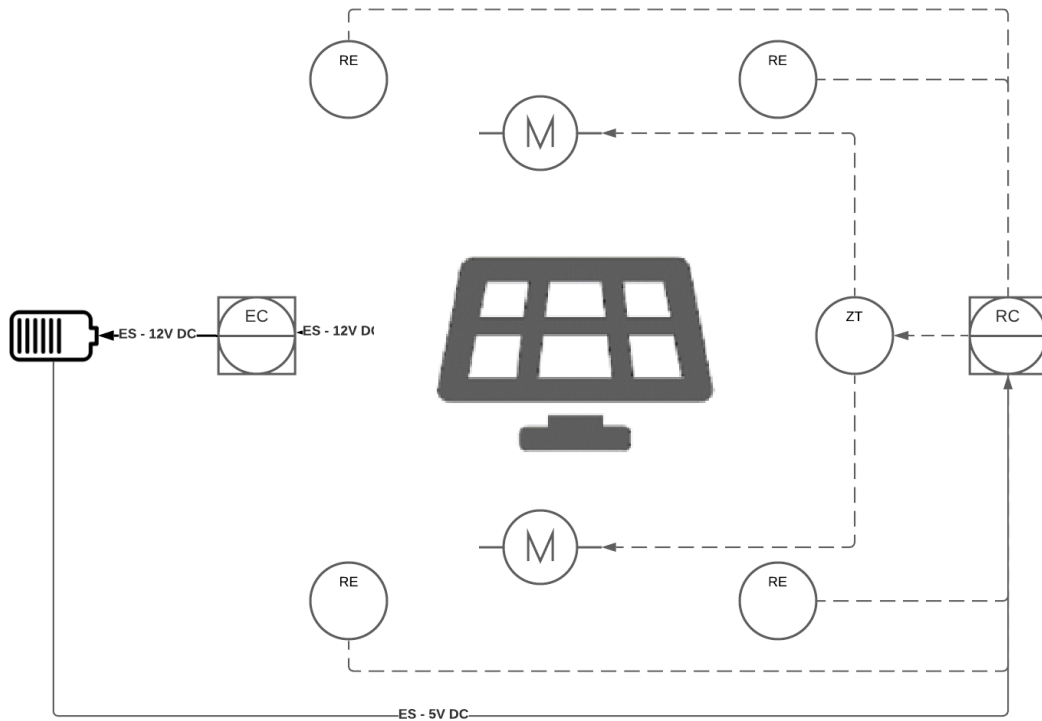
Dicho lazo consta de cuatro (4) sensores de radiación, que envían una señal eléctrica al controlador, el cual realizara un comparativo entre los valores leídos por cada sensor con el fin de determinar el posible movimiento de los servomotores e identificar su grado de movimiento de ser necesario, donde, a su vez el controlador envía una señal eléctrica a los dos (2) servomotores.

Así mismo, se identifica el tipo de alimentación eléctrica que poseerá el sistema de control, el cual, será extraída directamente de la energía capturada por el panel solar, con el fin de asegurar un sistema de control totalmente independiente.

En la *Figura 33* se detalla el uso de dos servomotores (M) en los extremos del panel solar, los cuales son controlados a través de una señal eléctrica por un transmisor de posición (ZT) que actuara de acuerdo con los valores capturados por un control de radiación (RC), roles cumplidos por el microcontrolador ATmega328 de la tarjeta Arduino Uno.

El microcontrolador recibirá los valores leídos por los cuatro sensores de radiación lumínica (RE) por medio de una señal eléctrica; el microcontrolador y servomotores son alimentados desde la batería del sistema de almacenamiento de energía solar, esta última será cargada a través de una línea de 12 V DC y regulada por el controlador de tensión (EC).

Figura 33 Diagrama P&ID de sistema de control de posición angular



Fuente: Elaboración propia

3.3.1. Diseño sistema de control

Para el modelamiento matemático y dinámico del sistema no se tuvieron en cuenta algunas perturbaciones como el viento y sus efectos, al igual que la fricción, presentados en el prototipo, considerando la dinámica de un actuador lineal similar al seguidor, el módulo se replantea en las ecuaciones 6 y 7:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{J} & \frac{K}{J} \\ 0 & -\frac{K}{L} & -\frac{K}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \theta \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} V \quad (6)$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \theta \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} v \quad (7)$$

Donde, θ es la posición angular, i es la corriente, b es la constante de fricción, J es el momento de inercia, k es la constante de torque y L es la inductancia eléctrica.

- **Estimador por espacio de estados**

Para el diseño de control del sistema, se usó la retroalimentación a través de ganancias constantes. Considerando el sistema de lazo cerrado, este se encuentra ilustrado en la *Figura 34* y descrito en la ecuación 8:

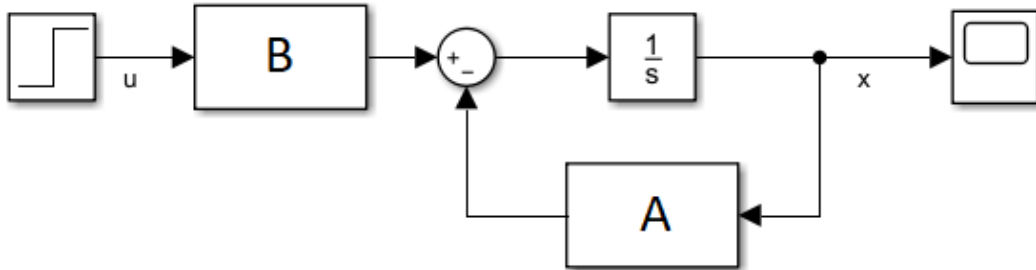
$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (8)$$

Donde:

x =vector de estado

u =señal de control

Figura 34 Sistema de control en lazo abierto



Fuente: *Elaboración propia*

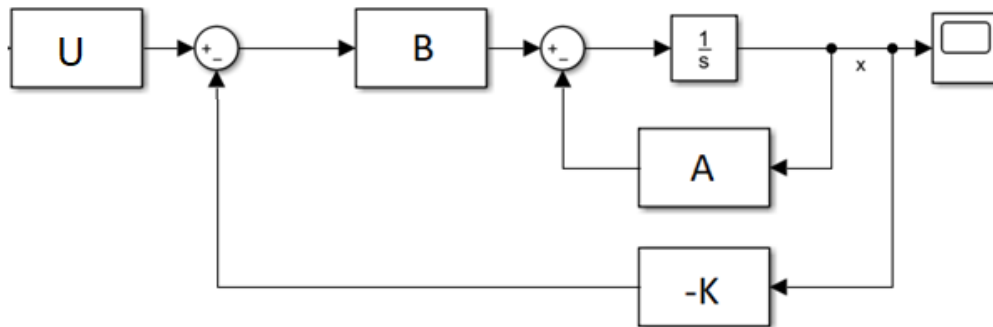
Definiendo la realimentación del estado como:

$$u = -Kx \quad (9)$$

Donde K es la matriz de realimentación de estado con ganancias constantes y el sistema se convierte en lazo cerrado como se aprecia en la *Figura 34*, sustituyendo la ecuación (9) en (8) se obtiene:

$$\dot{x} = (A - BK)x(t) \quad (10)$$

Figura 35 Sistema de control en lazo cerrado



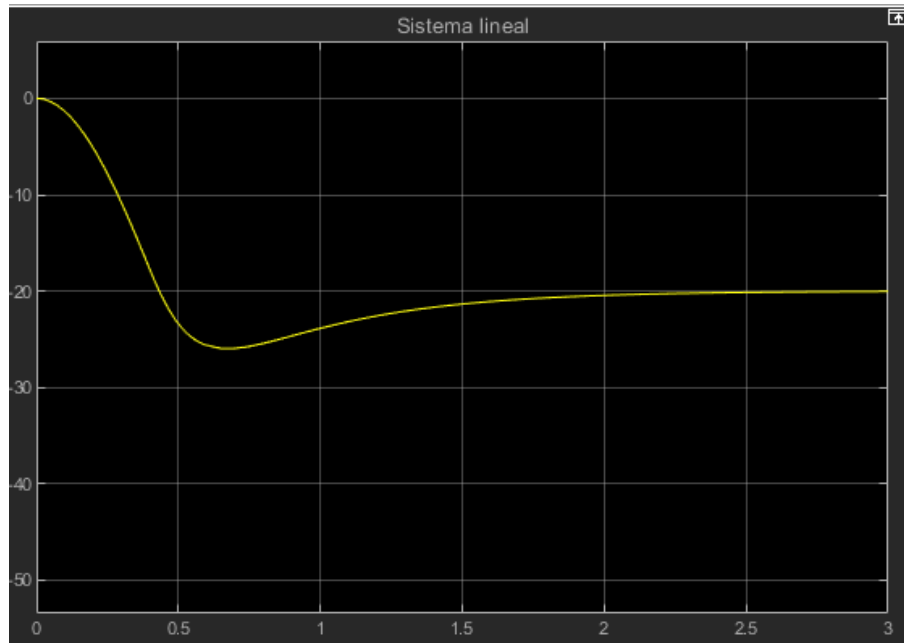
Fuente: *Elaboración propia*

De acuerdo con el sistema descrito en la ecuación 10 y la señal 9, se determina la matriz de realimentación K por medio la controlabilidad del sistema. Para este trabajo se realiza la linealización a partir de cuatro puntos de operación, $x_1 = 20^\circ$, $x_2 = 0$, $x_3 = 20^\circ$ y $x_4 = 0$

Donde x_1 y x_2 , corresponden al movimiento norte-sur y x_3 y x_4 al movimiento oriente-occidente.

Al evaluar el sistema linealizado se obtuvo C_0 , la matriz de control y K las ganancias para el controlador. Siguiendo los resultados obtenidos anteriormente, se realizó en Simulink la simulación del modelo matemático linealizado mostrado en el **Anexo 6** y cuyo resultado es mostrado en la *Figura 36*.

Figura 36 Modelo linealizado de sistema de control de posición angular de paneles solares



Fuente: Elaboración propia

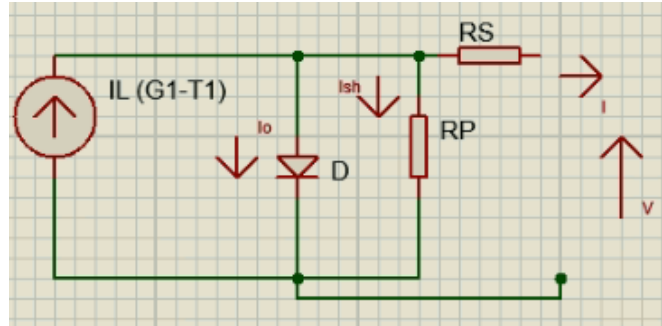
Como se observa en la figura el controlador se estabiliza en 2 segundos. Es decir, teóricamente el sistema de control tardaría aproximadamente dos segundos para llegar a los 20°.

- **Modelamiento matemático del panel**

Para describir el modelamiento de una celda solar se ha implementado el propuesto por Eduardo Ortiz⁶³ en su estudio “*Modeling and analysis of solar distributed generation*”, donde la corriente generada por el panel solar es directamente proporcional a la radiación solar, en la *Figura 37* se representa el circuito eléctrico a modelar.

⁶³ ORTIZ, E. Modeling and analysis of solar distributed generation. Disertación doctoral. Doctor of Philoshopy. Michigan State University. Estados Unidos. 2006.

Figura 37 Diagrama celda fotovoltaica



Fuente: Elaboración propia

$$I_{pv} = I_m - I_{sh} \quad (11)$$

Donde I_{sh} es la corriente a través de la resistencia en paralelo dada por:

$$I_{sh} = \frac{V + I_{pv}R_s}{R_p} \quad (12)$$

$$I_m = I_g - I_d \quad (13)$$

Donde I_g es la corriente proporcional a la insolación solar y está dada por

$$I_g = (I_{g,n} + K_1\Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (14)$$

Donde I_d es la corriente del diodo dada por

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V + I_{pv}R_s}{v_t n}} - 1 \right) \quad (15)$$

Donde I_0 es la corriente de saturación inversa del diodo dado por

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_1\Delta T}{e^{\frac{V_{oc,n} + K_v\Delta T}{av_t}} - 1} \quad (16)$$

Y v_t es el voltaje equivalente a la temperatura dado por

$$v_t = \frac{N_s k T}{q} \quad (17)$$

Por último, la expresión que describe el modelo matemático del panel fotovoltaico es

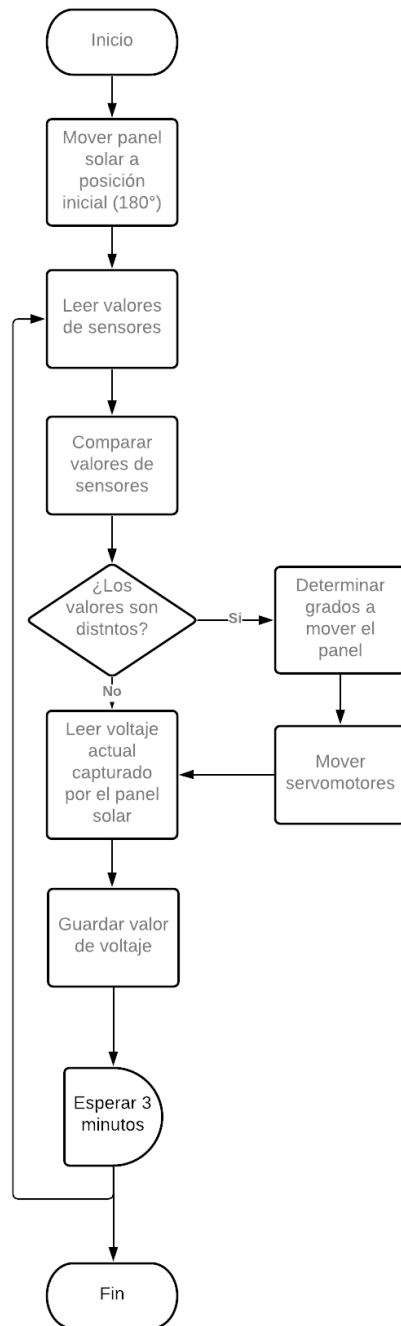
$$I_{pv} = I_0 \left(e^{\frac{V + I_{pv} R_s}{v_t n}} - 1 \right) - \frac{V + I_{pv} R_s}{R_p} \quad (18)$$

De acuerdo con lo anterior la relación entre el sistema de orientación y el panel solar son el ángulo de orientación, la radiación solar, el ángulo de la posición solar, la radiación del panel solar y la corriente producida.

3.4. DIAGRAMA DE FLUJO

Con el fin de diseñar el ciclo de decisiones que tendrá que ejecutar el código de programación del microcontrolador, se realiza el diagrama de flujo mostrado en la *Figura 38*.

Figura 38 Diagrama de flujo sistema de control



Fuente: Elaboración propia

En la primera etapa del diagrama de flujo se realizará una calibración de una posición inicial de 180° del panel solar, con el fin de reducir la posibilidad de que la luz solar se encuentre en un punto ciego de los sensores LDR,

posteriormente, se inicia un ciclo encabezado por la lectura del valor en cada uno de los sensores LDR, seguido por un análisis y comparación de estos.

Tras la captura y análisis de la información obtenida por los sensores, en la actividad de decisión se identificará si es necesario realizar el movimiento de los motores con el fin de lograr el mejor ajuste de cada uno de los sensores, es decir, que cada sensor se encuentre dentro de un rango de valores similar.

Finalmente, con el fin de reducir la energía consumida por el sistema de control, se esperará un tiempo de 3 minutos para de nuevo iniciar el ciclo.

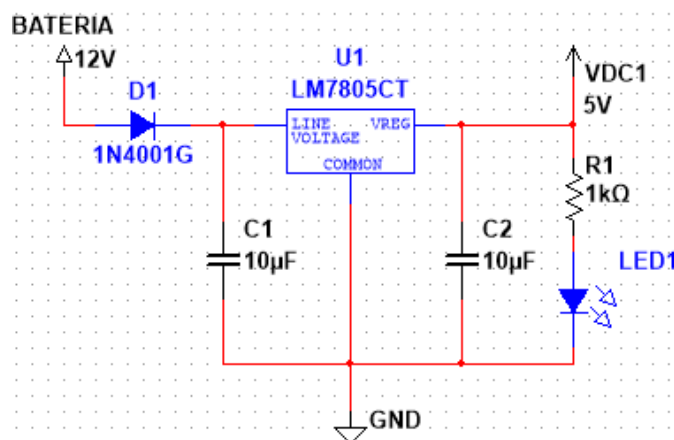
3.5. DISEÑO ELECTRÓNICO

De acuerdo con el sistema de control definido en el apartado 3.3 y los datos del sensor, el diseño se divide en tres partes, (i) alimentación del sistema general, (ii) sistema de control y (iii) medición de datos.

3.5.1. Alimentación del sistema general

El sistema será alimentado como se mencionó con anterioridad a través de la carga de la batería; debido a que la batería es de 12V, se empleará un regulador (*Figura 23*), este cuenta con el voltaje de salida necesario para energizar el microcontrolador a 5V, al igual que incluye un diodo rectificador 1N4001, para proteger conexiones o polarizaciones inversas al momento de alimentar todo el sistema (*Figura 39*).

Figura 39 Regulación de voltaje

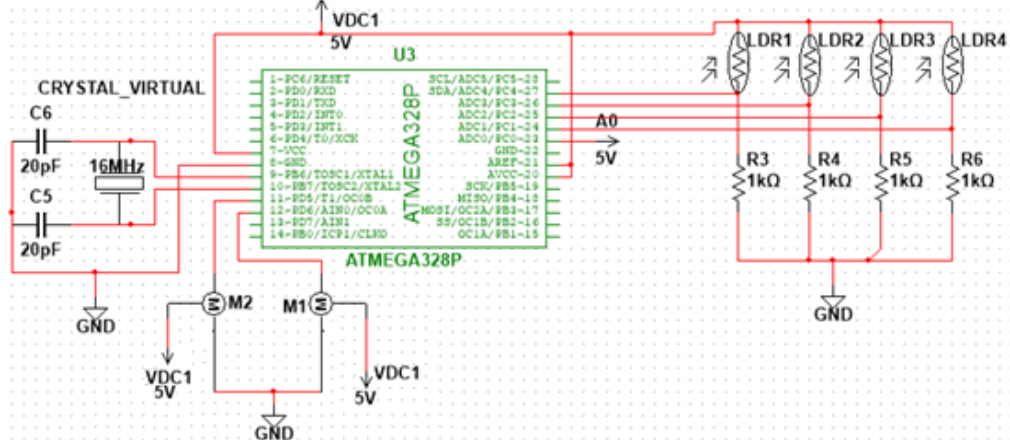


Fuente: Elaboración propia

3.5.2. Sistema de control

El sistema de control como se muestra en la Figura 40, está conformado por 4 LDR y dos servomotores; los servomotores se moverán siguiendo un PWM definido, según la operación de los LDR. Los servomotores utilizados son de tres pines (señal, Vcc, GND) y tendrán una línea de alimentación externa, diferente a la alimentación del microcontrolador con el fin de evitar una sobrecarga o daños en el microcontrolador.

Figura 40 Sistema de Control

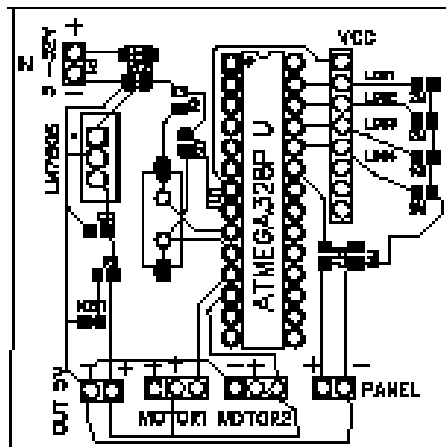


Fuente: Elaboración propia

3.5.3. Diseño PCB

El diseño de la PCB a usar se desarrolló en el aplicativo online gratuito EasyEDA, la cual se muestra en la Figura 41.

Figura 41 PCB diseñada

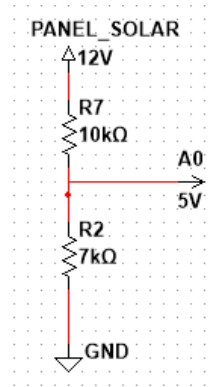


Fuente: Elaboración propia

3.5.4. Adquisición y almacenamiento de datos

Para medir la eficiencia de cada panel, se utilizará un divisor de voltaje (Figura 42) con el fin de disminuir los valores de voltaje que se encuentra entre 0 y 12V a un rango de 0 -5V, para que las entradas del microcontrolador lean los datos y no sufra daños por exceso de voltaje, los datos obtenidos serán almacenados en una memoria SD, con el fin de analizarlos después.

Figura 42 Divisor de voltaje - adquisición de datos del panel solar.



Fuente: Elaboración propia

4. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo, se describe las características de las estructuras desarrolladas tanto para el panel solar fijo como para el sistema de control de posición angular. Así mismo, se describe el proceso de selección del material de mejor ajuste para la construcción de dichas estructuras.

4.1. SELECCIÓN DE MATERIAL

Dada la gran variedad de materiales para realizar las estructuras, se procede a hacer una investigación con el fin de clasificar todos aquellos posibles materiales con los que se podría realizar la construcción de las estructuras anteriormente mencionadas, identificando las características más relevantes, las cuales son mostradas en el **Anexo 7**.

De acuerdo con lo mostrado en el Anexo 7, se decide usar madera como material principal de construcción de la estructura fija, dado su fácil acceso y su rigidez; mientras, que, para la estructura del sistema de control de posición angular, se decidió usar como material principal de construcción tubería plástica de PVC dado su poco peso, facilidad de manipulación, modificación y facilidad de acceso.

4.2. CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURA DEL PANEL FIJO

El montaje de la estructura fija para el panel solar (*Figuras 43, 44 y 45*) se tomó de acuerdo con el diseño mostrado en la *Figura 24*, construida con madera como material principal teniendo en cuenta las dimensiones de los elementos a ser instalados o soportados por esta estructura, arrojando como resultado las dimensiones de la estructura mostradas en la Tabla 5.

Tabla 5 Dimensiones estructura fija

Dimensión	Valor
Alto	29.5 cm
Largo	28.5 cm
Ancho	35 cm

Fuente: Elaboración propia

Figura 43 Estructura panel fijo con elementos instalados N°1



Fuente: Elaboración Propia

Figura 44 Estructura panel fijo con elementos instalados N°2



Fuente: Elaboración Propia

Figura 45 Estructura panel fijo con elementos instalados N°3



Fuente: Elaboración Propia

4.3. CONTRUCCIÓN DE ESTRUCTURA DE SEGUIMIENTO

Para el montaje de la estructura de seguimiento inicialmente se ejecutó de acuerdo con el diseño mostrado en la *Figura 29*, en el cual se presentaron distintos inconvenientes principalmente ocasionados por el peso y la dimensión de los elementos que tendría que soportar el motor inferior, ocasionando pérdidas de equilibrio de la estructura, evidenciable sobre todo al momento del giro del motor inferior, donde la estructura finalmente sucumbía.

Lo anterior teniendo en cuenta, que su material de construcción es tubos de plástico PVC, donde su peso era teóricamente muy inferior al de los otros posibles materiales de construcción seleccionados.

Debido a lo anterior, fue necesario realizar la construcción de la estructura propuesta en la *Figura 32* teniendo en cuenta que esta reduciría considerablemente la libertad de movimiento de la estructura, modificándola de 360° a 180°.

Tras su construcción, teniendo en cuenta los inconvenientes de equilibrio presentados en la construcción de la estructura propuesta en la *Figura 29*, se procedió a modificar igualmente la estructura propuesta en la *Figura 32* agregando unas ruedas en cada una de las esquinas de la estructura y agregando otro servomotor en el centro inferior de la estructura, logrando de esta forma un movimiento de 360° distribuyendo el peso en las cuatro ruedas agregadas y otorgándole únicamente al servomotor central la dirección del giro.

Finalizando la construcción de la estructura mostrada en las *Figuras 46 y 47*, se obtienen las dimensiones mostradas en la *Tabla 6*.

Tabla 6 Dimensiones estructura de seguimiento

Dimensión	Valor
Alto	29.5 cm
Largo	28.5 cm
Ancho	35 cm

Fuente: Elaboración propia

Figura 46 Estructura de seguimiento con elementos instalados N°1



Fuente: Elaboración propia

Figura 47 Estructura de seguimiento con elementos instalados N°2



Fuente: Elaboración propia

4.4. VALOR DEL PROTOTIPO

El costo final de implementación de los dos modelos, aumento debido a las limitaciones por las cuarentenas sectorizadas y el estado de emergencia actual generado por la pandemia, con lo cual en la tabla 7 se describe el precio de cada material utilizado, los materiales varios hacen referencia conectores, adaptadores, cables y la estructura de tubos de PVC:

Tabla 7 Costo de implementación del proyecto.

Material	Cantidad	Valor total (COP)
Panel solar modelo SL5TU-18P	2	68.400
Batería de 12V 12Ah	2	94.619
Servomotor MG90S	3	19.800
Controlador Regulador solar por PWM	2	112.600
Fotocelda (LDR)	6	6.800
Módulos electrónica	N/A	97.000
Cableado	N/A	8.000
Otros materiales	N/A	20.000
Valor total		774.419

Fuente: Elaboración propia

5. PRUEBAS Y VALIDACIÓN

En esta sección se describen las pruebas realizadas, los datos adquiridos y las validaciones de la eficiencia del sistema, al igual que las diferentes pruebas en varios escenarios para determinar la eficiencia del sistema de control de posición angular. A continuación, se describe cada etapa.

5.1. PRUEBAS DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO

Las pruebas del sistema de control iniciaron el pasado 09 de mayo del 2021, identificando un esfuerzo mayor del motor inferior ocasionado por el peso adicional del regulador controlador de voltaje con un peso aproximado de 0.26 Kg y el soporte de sistema del controlador con un peso aproximado de 0.18 Kg; motivo por el cual se realizó una modificación sobre la estructura de seguimiento retirando algunas partes de la base de la estructura; evidenciando que estas no afectan al equilibrio de la estructura como se muestra en la Figura 48. Tras esta modificación se evidencia un menor esfuerzo de la estructura en el plano horizontal "X". Las dimensiones finales del sistema de control se observan en la tabla 8.

Figura 48 Estructura final de Sistema de control posición angular



Fuente: Elaboración propia

Tabla 8 Dimensiones estructura final de seguimiento

Dimensión	Valor
Alto	29.5 cm
Largo	28.5 cm
Ancho	15 cm

Fuente: Elaboración propia

Tras el primer día de prueba, se evidencia que el sistema de control tan solo varia su posición en más o menos 30° (aproximadamente 10° en su posición oriente y 20° en su posición occidente) principalmente ocasionado por lo despejado del terreno, ya que en las direcciones occidente y oriente se encuentran edificaciones, las cuales cubren la posición del sol desde un horario temprano (Figura 49 y 50).

Figura 49 Edificación (obstáculo) que limita la línea de vista en la dirección Occidente



Fuente: Elaboración propia

Figura 50 Edificación (obstáculo) que limita la línea de vista en la dirección oriente

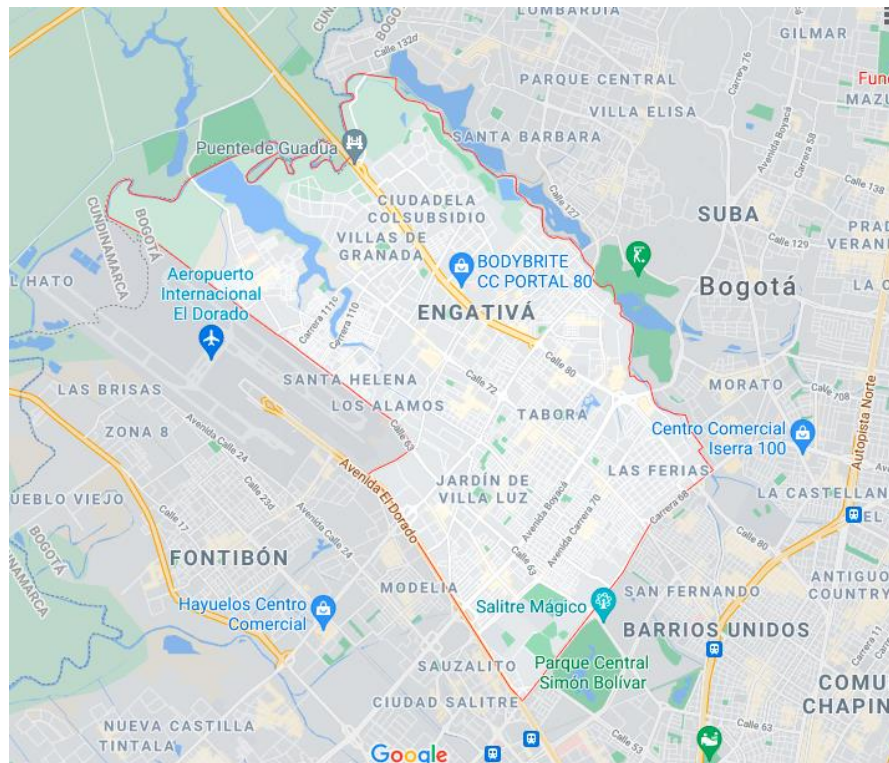


Fuente: Elaboración propia

5.2. PRUEBAS A LA INTEMPERIE

Las pruebas a la intemperie fueron ejecutadas en una vivienda ubicada en la localidad de Engativá, Bogotá D.C (Colombia), con las coordenadas geográficas aproximadas $4^{\circ}42'43.1''\text{N} - 74^{\circ}08'07.7''\text{W}$ (Figura 51).

Figura 51 Ubicación geográfica del lugar de la ejecución de las pruebas



Fuente: Google Maps

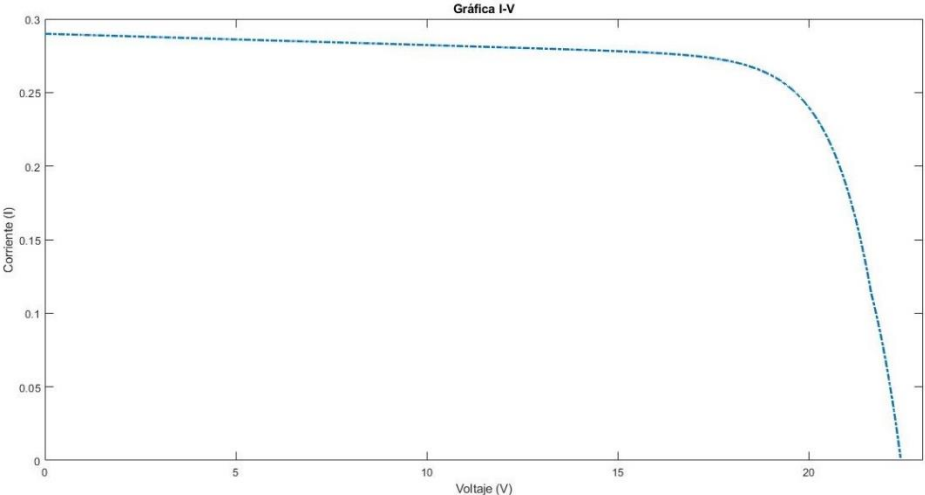
Dado el periodo de tiempo de ejecución de las pruebas, actualmente no se puede concluir el desempeño del sistema de control en otros climas distintos al parcialmente despejado con ligeras lloviznas.

5.2. MODELAMIENTO MATEMATICO

De acuerdo con el modelo matemático desarrollado e implementado en Simulink (Anexo 6), se obtienen algunos parámetros como la curva I-V (Figura 52) y la curva P-V (Figura 53) que permiten constatar el comportamiento del

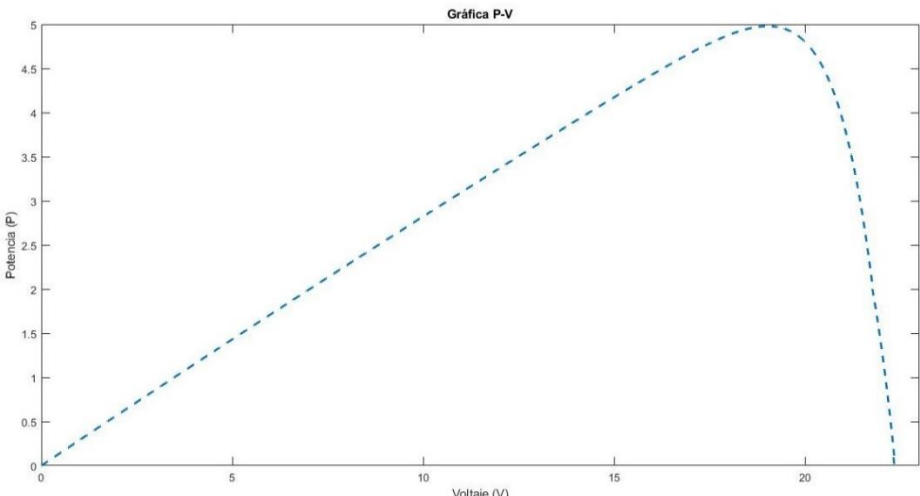
panel fotovoltaico utilizado, siendo acorde a algunas de las medidas dadas por el fabricante.

Figura 52 Curva I-V



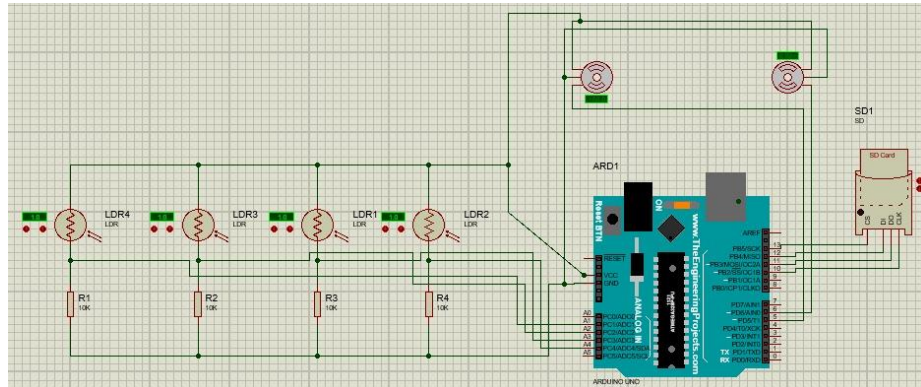
Fuente: Elaboración propia

Figura 53 Curva P-V



Fuente: Elaboración propia

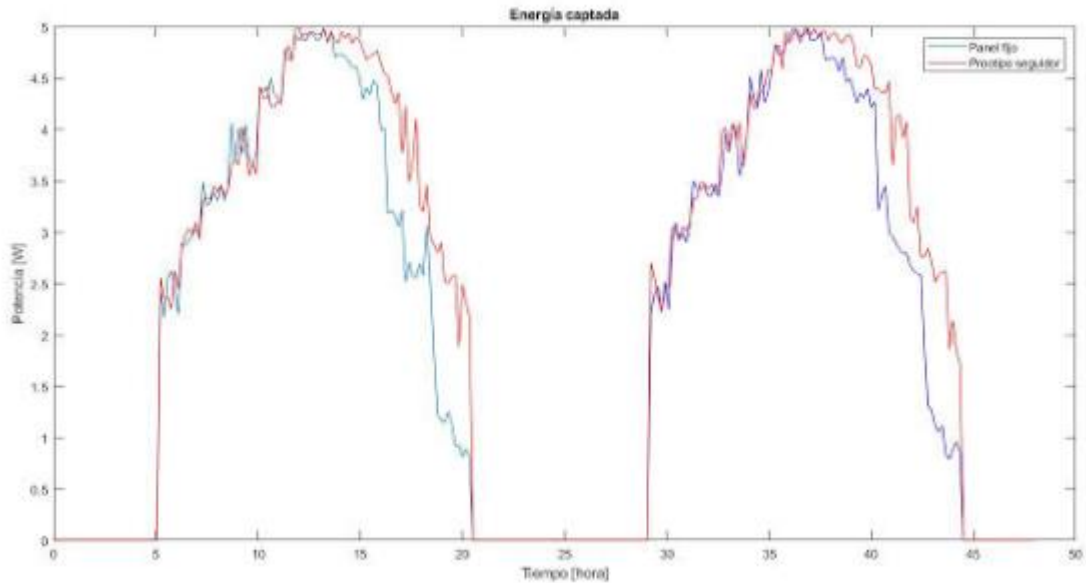
Figura 55 Diagrama de conexión tarjeta Arduino, modulo SD, servomotores y LDR's



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 56 se observa la producción de energía del prototipo del seguidor y la energía producida por el sistema fijo, en esta figura se observa una caída constante debido a que se realizaron medidas entre las 5 de la mañana y las 7 de la noche.

Figura 56 Energía captada



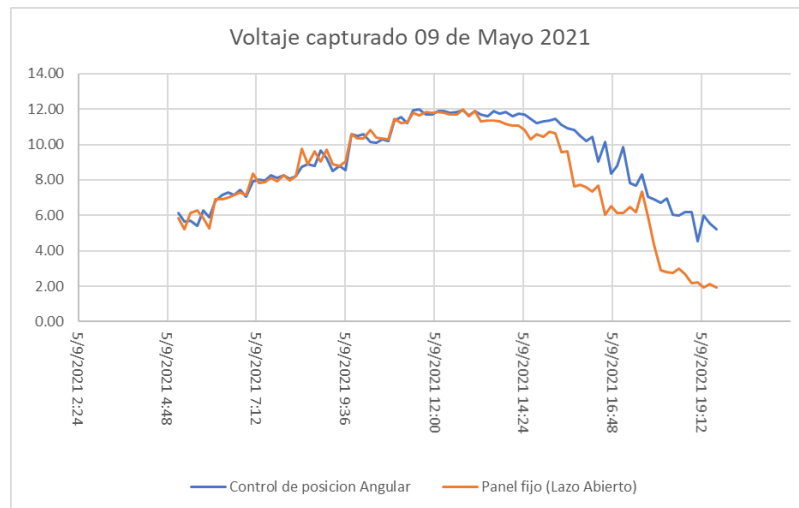
Fuente: Elaboración propia

Los datos capturados el día 09 de mayo pueden observarse a detalle en el **anexo 8** y analizados de una manera gráfica en la figura 57, en la cual se puede determinar que el valor promedio de voltaje capturado por el sistema de

control de posición angular fue de 9.2 V, mientras que por el del panel fijo o sistema en lazo abierto de 8.3 V, es decir, con el sistema en lazo de control cerrado, se capturo un 9,7% más de energía fotovoltaica.

Cabe resaltar que la tarde del día 09 de mayo se vio caracterizada por presentar algunas nubes (Figura 58) que obstaculizaron la luz del sol en algunas ligeras franjas de tiempo.

Figura 57 Voltaje capturado 09 de mayo 2021



Fuente: Elaboración propia

Figura 58 Panorámica climática 09 de mayo



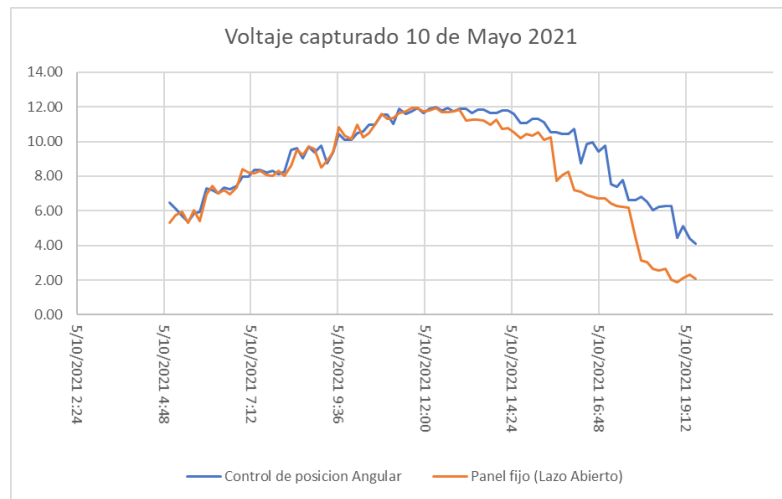
Fuente: Elaboración propia

El segundo día de pruebas, el día 10 de mayo, iniciaron sobre las 04:55 am y finalizaron sobre las 08:00 pm, capturando los valores de voltaje mostrados en el **anexo 9** analizados de una manera grafica en la Figura 59. En este día se realizo la captura promedio de 9.07 V por parte del sistema de control angular

y 8.13 V por parte del sistema en lazo abierto, logrando ese día un 10.3% de energía captura adicional gracias al sistema de control de posición angular.

Las actividades climáticas de este día, se caracterizaron por presentar unas ligeras lloviznas al finalizar la tarde, lo cual causó una variación en los datos como se puede observar en la Figura 60.

Figura 59 Voltaje capturado 10 de mayo 2021



Fuente: Elaboración propia

Figura 60 Panorámica climática 10 de mayo



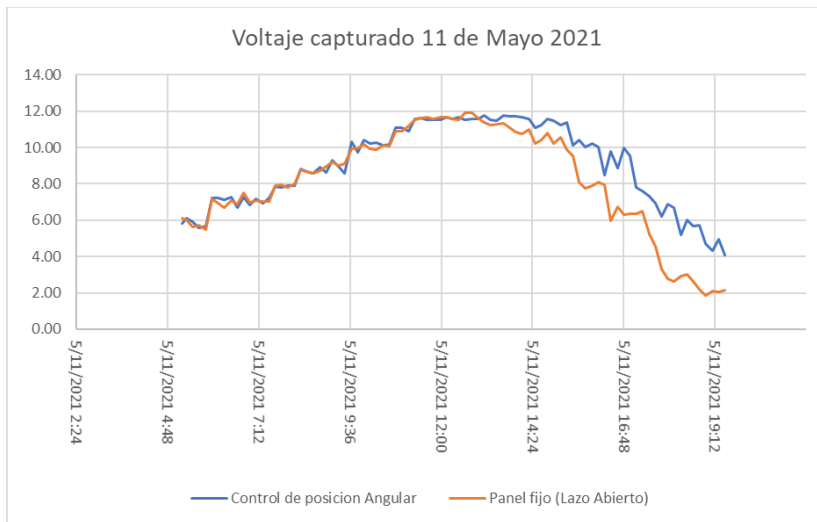
Fuente: Elaboración propia

El tercer día de pruebas, el día 11 de mayo, iniciaron sobre las 05:11 am y finalizaron sobre las 08:00 pm, capturando los valores de voltaje mostrados en el **anexo 10** analizados de una manera grafica en la *Figura 61*. En este día se

realizo la captura promedio de 8.81 V por parte del sistema de control angular y 7.95 V por parte del sistema en lazo abierto, logrando ese dia un 9.76% de energia captura adicional gracias al sistema de control de posicion angular.

Las actividades climaticas de este dia, se caracterizaron por presentar nubosidades durante todo el día, ocasionando que durante la gran mayoría del tiempo en presencia de luz solar, se disminuyera su intensidad por las nubes en obstaculo de la linea de vista (Figura 62).

Figura 61 Voltaje capturado 11 de mayo 2021



Fuente: Elaboración propia

Figura 62 Nubosidades presentadas 11 de mayo

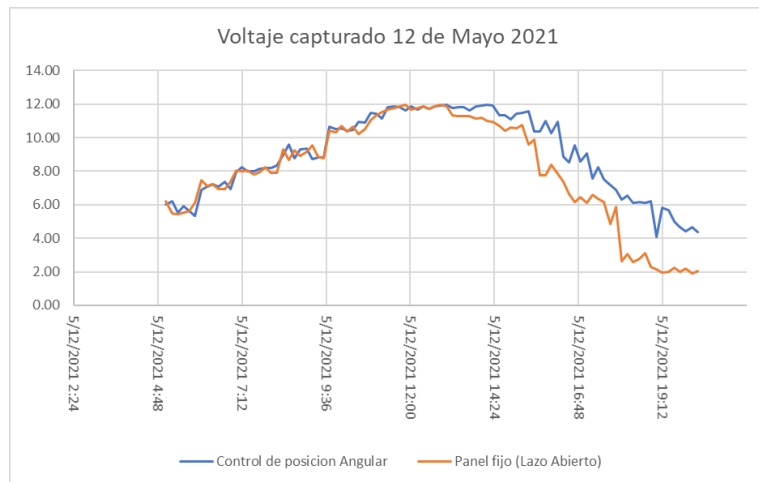


Fuente: Elaboración propia

El cuarto día de pruebas, el día 12 de mayo, iniciaron sobre las 05:02 am y finalizaron sobre las 08:15 pm, capturando los valores de voltaje mostrados en el **anexo 11** analizados de una manera grafica en la *Figura 63*. En este día se realizo la captura promedio de 8.89 V por parte del sistema de control angular y 8.04 V por parte del sistema en lazo abierto, logrando ese día un 9.56% de energia captura adicional gracias al sistema de control de posicion angular.

Las actividades climaticas de este día, se caracterizaron por presentar grandes nubosidades durante todo el día, ocasionando que durante la gran mayoria del tiempo de presencia de luz solar, se disminuyera su intensidad por las nubes obstaculizando la linea de vista (*Figura 64*).

Figura 63 Voltaje capturado 12 de mayo 2021



Fuente: Elaboración propia

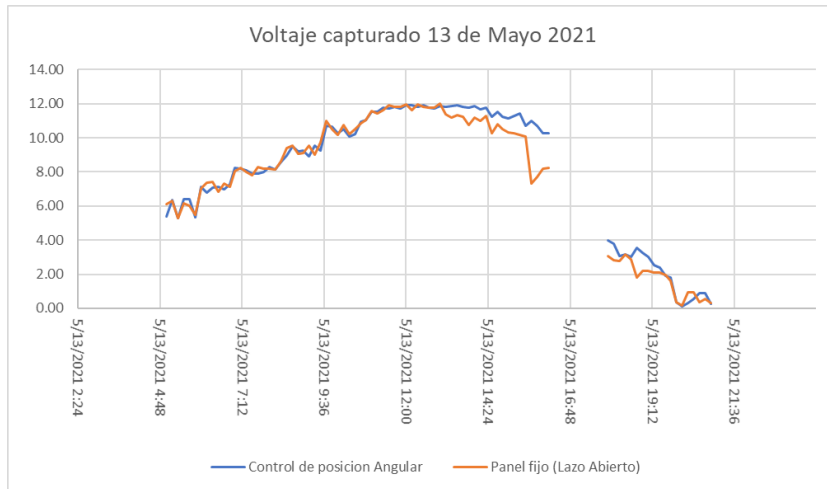
Figura 64 Nubosidades presentadas 12 de mayo



Fuente: Elaboración propia

El quinto día de pruebas, el día jueves 13 de mayo, iniciaron sobre las 05:00 am y finalizaron sobre las 09:00 pm, esto ya se decidió extender el periodo de pruebas este día motivo que en el periodo de tiempo comprendido aproximadamente entre las 04:15 pm y las 05:45 pm se realizó la desconexión de los sistemas, ya que, inició una lluvia bastante fuerte que dado lo liviano de los sistemas, podría haberse generado daños. Los valores de voltaje capturados este día de pruebas son mostrados en el **anexo 12** y analizados de una manera gráfica en la *Figura 65*. En este día se realizó la captura promedio de 8.13 V por parte del sistema de control angular y 7.83 V por parte del sistema en lazo abierto, logrando ese día un 3.69% de energía captura adicional gracias al sistema de control de posición angular.

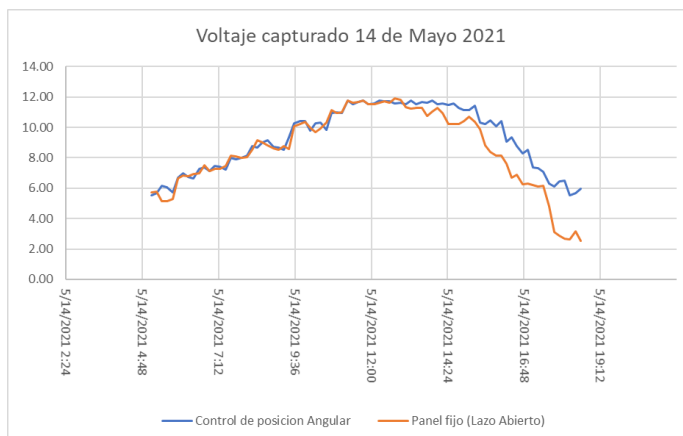
Figura 65 Voltaje capturado 12 de mayo 2021



Fuente: *Elaboración propia*

El sexto día de pruebas, el día viernes 14 de mayo, iniciaron sobre las 05:05 am y finalizaron sobre las 06:35 pm, capturando los valores de voltaje mostrados en el **anexo 13** analizados de una manera grafica en la *Figura 66*. En este día se realizó la captura promedio de 9.22 V por parte del sistema de control angular y 7.26 V por parte del sistema en lazo abierto, logrando ese día un 7.26% de energía captura adicional gracias al sistema de control de posición angular. Este día se caracterizo por ser bastante soleado con minima nubosidad, lo que probablemente favorecio la captación de la energía del sistema en lazo abierto.

Figura 66 Voltaje capturado 14 de mayo 2021

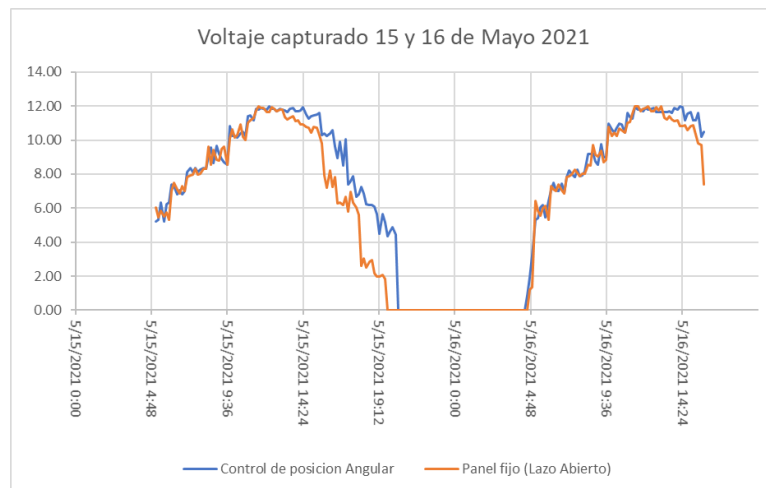


Fuente: *Elaboración propia*

El séptimo día de pruebas, se decide extender desde el día 15 de mayo sobre las 05:05 am hasta el 16 de mayo sobre las 03:45 pm, esta prueba se decidió extender debido a que se aproximaba el final del periodo de pruebas y se deseó evidenciar el comportamiento del sistema en un horario nocturno, y se decidió detener sobre las 03:45 pm del 16 de mayo dado que se presentó una fuerte precipitación eléctrica por lo que se decidió realizar la desconexión de los sistemas.

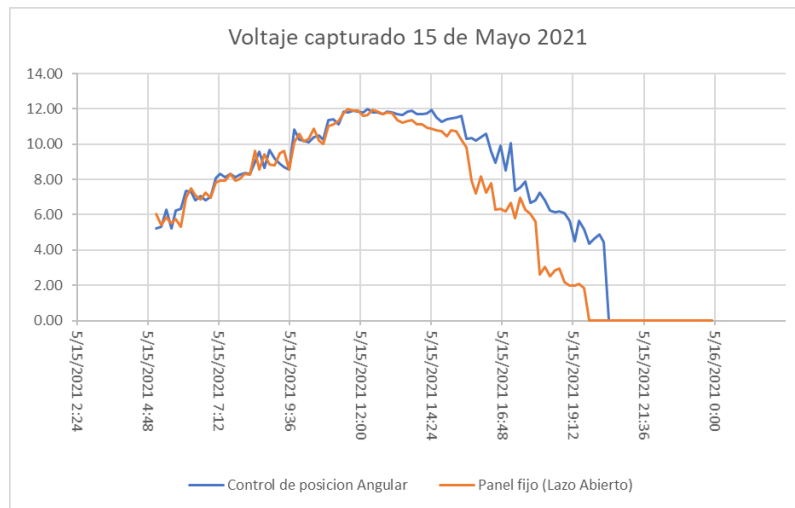
Los valores totales de voltaje capturados son mostrados en el **anexo 14** analizados de una manera gráfica en la Figura 67 y separados en días en las figuras 68 y 69 según corresponde. En el periodo extendido de pruebas, se capturó un promedio de 7.04 V por parte del sistema de control angular y 6.48 V por parte del sistema de control en lazo abierto, para un 7.95% de energía adicional capturada por el sistema de control angular.

Figura 67 Voltaje capturado 15 y 16 de mayo 2021



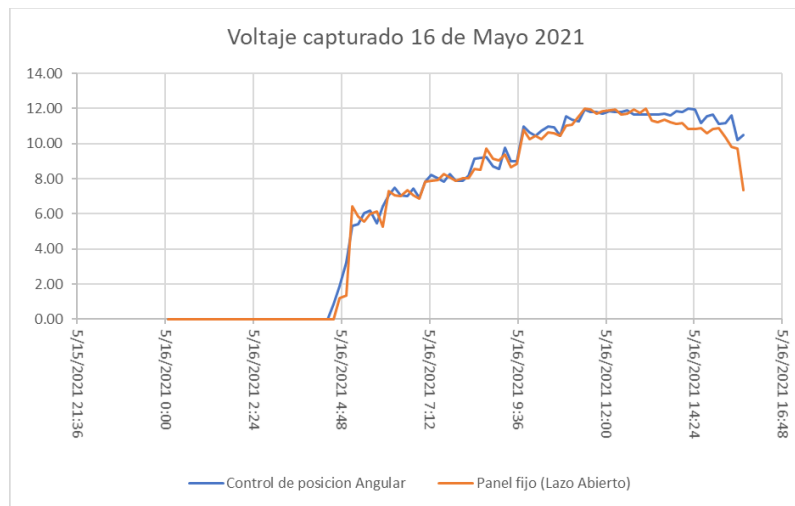
Fuente: Elaboración propia

Figura 68 Voltaje capturado 15 de mayo 2021



Fuente: Elaboración propia

Figura 69 Voltaje capturado 16 de mayo 2021



Fuente: Elaboración propia

Al realizar el análisis por separado del día 15 de mayo se obtiene un promedio de 6.9 V para el sistema de control en lazo cerrado y 6.09 V para lazo abierto, para una diferencia de 11.7%, pero, al realizar únicamente el promedio de voltaje capturado únicamente con los valores registrados distintos a 0 V, se obtiene un promedio de 9 V para el sistema de control en lazo cerrado y 8.31 V para lazo abierto, para una diferencia de 7.66%.

Mientras, el día 16 de mayo se obtiene un promedio de 7.22 V para el sistema de control en lazo cerrado y 7 V para lazo abierto, para una diferencia de 3.04%, pero, al realizar únicamente el promedio de voltaje capturado únicamente con los valores registrados distintos a 0 V, se obtiene un promedio de 9.45 V para el sistema de control en lazo cerrado y 9.3 V para lazo abierto, para una diferencia de 1.58 %.

Los datos promedio capturados durante los 8 días de pruebas puede ser observado en la Tabla 9, donde se puede determinar una diferencia de energía captada de 10% adicional usando un sistema de control de posición angular.

Tabla 9 Valores promedio capturados en periodo de pruebas

Día de prueba	Promedio voltaje capturado en sistema "Control de posición"	Promedio voltaje capturado en sistema panel fijo (Lazo abierto)
Domingo, mayo 9, 2021	9.19 V	8.30 V
Lunes, mayo 10, 2021	9.07 V	8.13 V
Martes, mayo 11, 2021	8.81 V	7.95 V
Miércoles, mayo 12, 2021	8.99 V	8.04 V
Jueves, mayo 13, 2021	8.13 V	7.83 V
Viernes, mayo 14, 2021	9.22 V	8.55 V
Sábado, mayo 15, 2021	9.0 V	8.31 V
Domingo, mayo 16, 2021	9.45 V	9.30 V

Fuente: Elaboración propia

La ubicación de los paneles solares diariamente se realizó direccionamiento hacia el occidente y con una ubicación cercana con el fin de brindarles la mismas condiciones iniciales (Figuras 70 y 71).

Figura 70 Ubicación sistemas de control en lazo cerrado y abierto



Fuente: Elaboración propia

Figura 71 Orientación sistemas de control en lazo cerrado y abierto



Fuente: Elaboración propia

6. CONCLUSIONES

Durante las pruebas desarrolladas se identifica que el sensor seleccionado (LDR) para realizar la lectura de la radiación solar capturada no presenta una sensibilidad considerable para desencadenar un proceso de reajuste de la posición o ángulo del panel solar tras la mínima variación de radiación recibida, esto se determina ya que durante el desarrollo de las pruebas se evidencia que el ajuste angular se ejecuta cuando el ángulo de desfase entre la posición de sol y la cara frontal del panel presenta una gran diferencia.

Durante el periodo de desarrollo de las pruebas se identifica que la altura del panel solar o el despeje de la línea de vista es un factor de relevancia frente a la cantidad de radiación solar y posterior transformación a energía fotovoltaica, lo anterior dado que al tener estructuras altas alrededor del sitio de instalación/ubicación del panel puede inferir en la línea de vista entre el panel y el sol ocasionando una menor captura de energía.

Adicionalmente, respecto a la estructura desarrollada se determina que esta no podrá soportar fuertes precipitaciones climáticas, dado el peso relativamente liviano del sistema de control, el cual, al ser impactado por un frente de aire de gran velocidad, perderá el equilibrio y agarre. Precisamente, para evitar este tipo de daños, se decidió realizar el retiro del prototipo y/o estructura desarrollada en horarios nocturnos, con el fin de no ocasionar pérdidas o daños que afectaran la finalización o presentación del proyecto desarrollado.

El sistema de control desarrollado no permite determinar el porcentaje o grados en los cuales los motores trabajaron, ya que, al poseer esta información, posiblemente para desarrollos futuros es relevante invertir recursos en este rango de trabajo y aumentar la efectividad del sistema de control de posición angular.

Se planteó para desarrollos futuros adicionar un sistema de comunicación inalámbrica, con el fin de subir los datos leídos a una nube o plataforma online, como ThingSpeak, con el fin de tener los datos en un tiempo semireal y facilitar el análisis de estos.

Dadas las distintas dificultades vividas en el territorio colombiano, ocasionados tanto por la pandemia como por la situación de orden público, se vio afectado el desarrollo del proyecto, atrasando cronológicamente el inicio de las pruebas, esto debido a que, durante el montaje de la estructura, se presentaron algunos daños de elementos dificultando su acceso, sumado a la dificultad de movilidad o transporte presentado entre los desarrolladores del proyecto.

Por los motivos anteriormente expuestos, se desarrollan las pruebas únicamente en un periodo de tiempo de ocho días, periodo de tiempo en el cual no se presentaron diferencias considerables a nivel climático logrando una captación promedio de energía fotovoltaica de 8.99 V por el Sistema de Control de Posición Angular; y de 8.33 V en el panel fijo o sistema de control en lazo abierto; para una diferencia promedio de energía captada de 10%, logrando interpretarse como la capacidad del Sistema de Control de Posición Angular de mantener el voltaje pico por un tiempo extendido.

Finalmente, dado el corto periodo de tiempo de ejecución de las pruebas, no se logró identificar el consumo energético que posee el sistema de control, con el fin de determinar si el 10% de diferencia energética cubre el consumo del Sistema de Control de posición angular, lo que significa un beneficio para el usuario del prototipo desarrollado; o si este 10% adicional, no es aprovechable por el usuario final dado que este será utilizado por el sistema de control.

7. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda usar sensores más sensibles, ya que los usados en el presente proyecto no presentaban grandes variaciones con los distintos grados presentados en el trayecto del sol, así mismo, realizar un cambio del servomotor por otro que posea un torque mayor.

Así mismo, para desarrollos futuros se recomienda implementar una plataforma que permita la medición de los valores en tiempo real como ThingSpeak o una aplicación que permita realizar el monitoreo de la captación por demanda.

Adicionalmente, se recomienda realizar pruebas en un terreno alto o despejado, que permita un seguimiento sin ningún obstáculo que interfiera en la línea de vista entre el sol y el panel solar.

Finalmente, se recomienda implementar un sistema de limpieza programada o automática sobre el panel solar, ya que las impurificaciones del ambiente, polvo y demás materiales que caen sobre el panel, afectan considerablemente el porcentaje de energía captada.

BIBLIOGRAFIA

1. ¿Cuánta energía se puede extraer de la radiación solar? [blog], ENERGÉTICA FUTURA - BLOG del autoconsumo energético actual y del futuro. 8 de junio de 2018, [Consultado: 8 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://energeticafutura.com/blog/cuanta-energia-se-puede-extraer-de-la-radiacion-solar/>.
2. ARRIETA, Luisa. Energía Solar: Función de la célula fotovoltaica [blog]. Blogspot. 01 de noviembre de 2012. [Consultado: 8 de mayo de 2020]. Disponible en: <http://luisarrieta14.blogspot.com/p/funcion-de-la-celula-fotovolcaica.html>.
3. BACHILLER, Rafael, El Sol: Nuestra Estrella, Nuestra Energía, s. f., 12.
4. BAHADARAH, BALOCH, Y GANDHIDASAN 2016B)
5. BAHADARAH, Haitham, BALOCH, Ahmer y GANDHIDASAN, Palanichamy. Uniform cooling of photovoltaic panels: A review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 57, p.1520-1544. [Consultado: 8 de mayo de 2020]. Disponible en: 10.1016/j.rser.2015.12.064.
6. Batería Ciclo Profundo 12V 12Ah [en línea]. Osaka Electronics LTDA, [Consultado: 9 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://www.osakaelectronicsltda.com/pilas-baterias/baterias-ciclo-profundo/bateria-ciclo-profundo-12v-12ah.html>
7. BBC. Las innovadoras soluciones para generar más y mejores fuentes de energías renovables en el planeta, [en línea] En: BBC News Mundo, sec. Otras noticias, (12 de abril de 2018) [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-43712276>.

8. CALZADA TALAVERA, Michel Vanesa. PICmicro® MCU Estudio - ¿qué es un microcontrolador? [en línea]. Electrónica Estudio. [Consultado: 2 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.electronicaestudio.com/que-es-un-microcontrolador/>.
9. CAMARGO NOGUEIRA, Carlos et al. Performance of monocrystalline and polycrystalline solar panels in a water pumping system in Brazil. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 51, noviembre 2015, p. 1610-1616. [Consultado: 16 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.082>
10. CANAZA CHIQUÉ, Darwin. Desarrollo de un sistema de control para la medición experimental de la eficiencia en tiempo real de un sistema fotovoltaico (38.4 watts) en el departamento de Puno [en línea]. Trabajo de investigación ingeniero mecánico electricista. Universidad Nacional del Altiplano. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica Electrónica y sistemas. 2018. 95 p. [Consultado: 8 de mayo de 2020]. Disponible en: http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/8052/Canaza_Chique_Darwin.pdf?sequence=1&isAllowed=y
11. CELSIA. Inicia operaciones Celsia Solar Bolívar, la nueva granja de generación de energía solar de Celsia para beneficio de los colombianos. [sitio web] [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.celsia.com/es/sala-prensa/inicia-operaciones-celsia-solar-bol237var-la-nueva-granja-de-generaci243n-de-energ237a-solar-de-celsia-para-beneficio-de-los-colombianos>.
12. COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1715 de 2014 (13, mayo, 2014). Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Diario Oficial No. 49.150 de 13 de mayo de 2014. Pág. 1
13. COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 51 de 1989 (24, octubre, 1989). Por la cual se crea la Comisión Nacional de Energía y se dictan otras disposiciones. Diario oficial. Año CXXVI. N. 39038. 25, OCTUBRE, 1989. Pág. 1.

14. COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 697 de 2001 (3, octubre, 2001). Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones. Diario oficial. Año CXXXVII. N. 44573. 5, OCTUBRE, 2001. Pág. 1

15. COLOMBIA, CONSEJO COLOMBIANO DE CONSTRUCCION SOSTENIBLE. Resolución 0549 de 2015 (27, junio, 2017). Por la cual se reglamenta el Capítulo 1 del Título 7 de la parte 2, del Libro 2 del Decreto 1077 de 2015, en cuanto a los parámetros y lineamientos de construcción sostenible y se adopta la Guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones. Consultado: 6 de abril de 2021. Disponible en: <https://www.cccs.org.co/wp/download/resolucion-0549-de-2015/>.

16. COLOMBIA, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 3683 de 2003. (19, diciembre, 2003). Por el cual se reglamenta la Ley 697 de 2001 y se crea una Comisión Intersectorial. Diario oficial. Año CXXXIX. N. 45409, 22 DICIEMBRE 2003. Pág. 27

17. Conceptos básicos sobre baterías solares, Consultado: 30 de marzo de 2021. Disponible en: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/equipos-fotovoltaicos-baterias-solares-parte-iii/>)

18. Controlador PID - Control Automático [en línea]. Picuino. [Consultado: 2 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.picuino.com/es/arduprog/control-pid.html>.

19. Diagrama de Bloque de un Microprocesador. ITphone Soluciones (blog), 6 de febrero de 2013, [Consultado: 08 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://itphones.wordpress.com/2013/02/06/diagrama-de-bloque-de-un-microprocesador/>.

20. DUBEY, Swapnil. SARVAIYA, Jatin. y SESHADRI, Bharath. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on

PV Production in the World – A Review. En: Energy Procedia, vol. 33, p. 311-321. [Consultado: 16 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610213000829>

21. ELENES FÉLIX, Natanael, Análisis de factibilidad de un sistema de bombeo de agua con energía solar como propuesta de adaptación para riego en rayón, sonora [en línea]. (octubre de 2012). [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: http://irsitio.com/refbase/documentos/123_ElenesFelix2012.pdf.
22. Equipos solares: Regulador (controlador) de carga», [Consultado: 31 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/equipos-solares-regulador-controlador-de-carga/>.
23. ESLAVA, Andrés. OLAYA, Jonny. Implementación de un panel solar móvil automatizado para la generación de energía limpia [en línea]. Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones. Facultad de Ingeniería. Bogotá. 2015. [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/2511>.
24. FINANZAS. Colombia le apuesta fuerte a las energías renovables. [en línea]. En: Portafolio. Bogotá D.C, agosto 26 de 2014. [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.portafolio.co/economia/finanzas/colombia-le-apuesta-fuerte-energias-renovables-52158>.
25. FINANZAS. Crece el consumo de energía. [en línea] En: El Tiempo-Portafolio, [Consultado: 8 de mayo de 2020], Disponible en: <https://www.portafolio.co/economia/crece-el-consumo-de-energia-524629>.
26. FORERO, Jaime Alberto, panel solar con control de posición angular. [en línea]. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, agosto de 2009.

27. GARCÍA ARBELÁEZ, Carolina, et al., el acuerdo de parís así actuará Colombia frente al cambio climático, s. f., 60.
28. GHASSOUL, Mostefa. Single Axis Automatic Tracking System Based on PILOT Scheme to Control the Solar Panel to Optimize Solar Energy Extraction [en línea]. *Energy Reports* 4 (noviembre de 2018): 520-27, [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2018.07.001>.
29. GÓMEZ ROLDAN, Jorge Alberto. Diseño y desarrollo de un sistema solar para la purificación del agua en zonas rurales de Colombia, s. f., 130.
30. GONÇALVES P., SAMPAIO, V. ORESTES, M., Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. vol. 74, no. December 2016, pp. 590–601, 2017.
31. GONZALES, Manuel, COHALIA, Alberto, PAREDES, Edith. Diseño de un sistema de seguimiento solar de un eje para el aprovechamiento de la energía solar en sistemas fotovoltaicos. [Consultado: 3 de abril de 2020] Disponible en: <http://revistas.unjbg.edu.pe/index.php/cyd/article/view/196/189>.
32. HERNÁNDEZ RUEDA, Nicolás. RAMÍREZ CONTRERAS, Andrea Ximena. Estudio sobre la sustitución por Energías Renovables (solar fotovoltaica) en las instituciones educativas de básica primaria y secundaria en Colombia: Análisis y posibilidades» En: Universidad Santo Tomás, 2015, Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/1071>.
33. HOFFMANN, Fábio Moacir, et al., Monthly Profile Analysis Based on a Two-Axis Solar Tracker Proposal for Photovoltaic Panels [en línea]. *Renewable Energy* 115 (enero de 2018). P 750-59. [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.079>.

34. IDEAM [sitio web]. Atlas Interactivo - Radiación IDEAM, [Consultado: 8 de mayo de 2020]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>.
35. IDEAM [sitio web]. Radiación IDEAM, [Consultado: 8 de mayo de 2020]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>.
36. IDEAM [sitio web]. Radiación Solar, [Consultado: 2 de mayo de 2020]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar>.
37. INZUNZA, Juan, Cap. 1 Conociendo la atmósfera. s. f., 34.
38. KANT et al. Thermal response of poly-crystalline silicon photovoltaic panels: Numerical simulation and experimental study. En: Solar Energy, vol. 134, p. 147-155. [Consultado: 16 de marzo de 2021]. Disponible en: [10.1016/j.solener.2016.05.002](https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.002)
39. MACANCELA ZHUMI, Luis Gerardo, Diagnóstico de la implementación de los sistemas fotovoltaicos correspondientes a la primera etapa del proyecto Yantsa Etsari, s. f., 232.
40. MAITY, Rittick, MATHEW, Jami, HOSSAIN, Jami. Increase in Power Production of Rooftop Solar Photovoltaic System Using Tracking. 2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC), 2018 n.5o IEEE (2018), [Consultado: 3 de abril de 2020], Disponible en: <https://doi.org/10.1109/PEEIC.2018.8665488>.
41. MAKHIJA, S. et al., Design implementation of an automated dual-axis solar tracker with data-logging. International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC), 2017, p.1-4, [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ICISC.2017.8068708>.

42. MENNA, ¿Cómo funciona un PANEL SOLAR? Tipos, partes y capacidad, [Consultado: 8 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://como-funciona.co/un-panel-solar/>.
43. Módulo fotovoltaico policristalino 50W 12V 36 células [en línea]. Solar Consum - Tienda online de energía solar. [Consultado: 30 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://www.solarconsum.com/solar/paneles-solares-modulos-fotovoltaicos/40-modulo-fotovoltaico-policristalino-50w-12v-36-celulas.html>.
44. NEIRA, Andrés. ARDILA, Angie. Metodología para el diseño de sistemas de generación distribuida para zonas rurales en Colombia. s. f., 58. f.)
45. PATERNINA, Mario Arrieta et al., Diseño de prototipo de sistema solar fotovoltaico optimizando el ángulo de inclinación de los paneles solares» 10, n.o 1 (2012): 12.
46. PERIODICO ENERGÍA. La demanda eléctrica mundial crecerá un 70% hasta 2040 y la mitad de la nueva capacidad será renovable. [en línea]. En: El Periódico de la energía. [Consultado: 8 de mayo de 2020], Disponible en: <https://elperiodicodelaenergia.com/la-demanda-electrica-mundial-crecera-un-70-hasta-2040-y-la-mitad-de-la-nueva-capacidad-sera-renovable/>.
47. PLANAS, Oriol. Efecto fotovoltaico: Energía solar fotovoltaica [en línea]. Energía Solar. (13 de mayo de 2015). [Consultado: 25 de abril de 2020]. Disponible en: <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/efecto-fotovoltaico>.
48. Proyectos de energía solar que debes conocer en Colombia. Eficiencia energética y energía solar en Colombia [blog]. Blogs CELSIA. 21 de junio de 2018, [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: <https://blog.celsia.com/new/proyectos-de-energia-solar-en-colombia/>.

49. RECALDE, Néstor y PRIETO, Fernando. Diseño e implementación de un sistema fuzzy-pid para el control del ángulo de inclinación del panel solar monocristalino de 30 watt. (octubre de 2014). [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7088>.
50. REDACCIÓN BIBO. ¿Colombia tiene potencial en fuentes de energía renovables? [en línea]. En: El Espectador. Bogotá D.C, agosto 22 de 2019. [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/colombia-tiene-potencial-en-fuentes-de-energia-renovables/>
51. Regulador Controlador Solar PWM 12/24V 10ª. Osaka Electronics LTDA, accedido 9 de marzo de 2021. Disponible en: <https://osakaelectronicsltda.com/energia-solar/controladores-de-carga/regulador-controlador-solar-pwm-1224v-10a.html>).
52. SCHIRO, Fabio. et al. Improving photovoltaics efficiency by water cooling: Modelling and experimental approach. En: Energy, vol. 137, p. 798 - 810. [Consultado: 8 de mayo de 2020]. Disponible en: [10.1016/j.energy.2017.04.164](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.164).
53. Servomotor Metálico Tower Pro MG90S - Giro Continuo. Sandorobotics - Tienda online, [Consultado: 9 de abril de 2021]. Disponible en: <https://sandorobotics.com/producto/mg90s-gc/>.
54. Servomotores [en línea]. Área Tecnología, [Consultado: 31 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://www.areatecnologia.com/electricidad/servomotor.html>.
55. SIECKER, J. KUSAKANA, K y NUMBI, B.P. A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 79, noviembre 2017, p. 192-203. [Consultado: 16 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117306913>.

56. SUNEETHA, Racharla. Solar Tracking System – a Review. International Journal of Sustainable Engineering, 1939-7046, 11 (4 de enero de 2017). [Consultado: 4 de abril de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/19397038.2016.1267816>.
57. TEJADA, Carlos y MOTOCHÉ, Leonardo, Posicionamiento de paneles solares usando lógica difusa para prácticas de laboratorio de control automático, s. f., 113.
58. TOUATI, F., AL-HITMI, M., BOUCHECH, H. (2012). Towards understanding the effects of climatic and environmental factors on solar PV performance in arid desert regions (Qatar) for various PV technologies. Renewable Energies and Vehicular Technology (REVET), 2012 First International Conference on, 78 – 83, Disponible en: <https://doi.org/10.1109/REVET.2012.6195252>
59. UNIVERSIDAD VERACRUZANA. Estaciones Del Año Y Temporadas Climáticas – Dirección de Comunicación De La Ciencia. [en línea]. México, Veracruz [Consultado: 2 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.uv.mx/cienciauv/blog/estacionesdelanoytemporadasclimaticas/>.
60. UNIVERSITAT DE BARCELONA. Nuevas fuentes de energía para un futuro sostenible. ¿Petróleo caro o protección del medio?,[Consultado: 8 de mayo de 2020], Disponible en: <http://www.ub.edu/geocrit/xcol/143.html>.
61. VISO, Esteban. Más caliente que el interior del Sol [en línea], Xatakaciencia. (9 de marzo de 2016). [Consultado: 8 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.xatakaciencia.com/fisica/mas-caliente-que-el-interior-del-sol>.
62. YOSHITAKE Jake. Solar tracker [sitio web]. Enciclopedia Britannica. [Consultado: 3 de abril de 2020], Disponible en: <https://www.britannica.com/technology/solar-tracker>.

63. ZERVOS, Arthouros. LINS, Christine, Renewables 2016 Global Status Report, 2016, Disponible en: <https://www.deslibris.ca/ID/10091391>.

64. ZERVOS, LINS. Op. cit., p.52

ANEXOS

Anexo 1 Características de paneles solares de 5W en el mercado

CARACTERÍSTICAS PANELES SOLARES DE 5W										
Modelo	Voltaje en Circuito Abierto	Max. de Voltaje de Alimentación Vmp(V)	Max. corriente de potencia Imp (A)	Dimensiones (cm)	Peso (Kgs)	No. de celdas y conexiones	Rango de operación	Eficiencia	Temperatura de Operación	Precio (COP)
BL5P-12	21,5	18	0,28	28.5*18.5*2.5	0,6	36 (2 X 18)			25 °C	75,400
	22,14	18,18	0,29							37,000
80000	22,14	18,18	0,29	24*18*1.8	0,8		-40°C to 85°C	17,10%	47 °C	
ASE0101	22	18,36	0,29	25*22*1.8	0,8	36	-40°C to 85°C	15,70%		55,000
80000	22,14	18,18	0,29	24*18*1.8	0,8		-40°C to 85°C	17,10%	47 °C	49,999
SP5-36B	21,6	18	0,27		1					
SL5TU-18P	22	18,36	0,27	26*22*18	0,8	36	-40°C to 85°C	17,20%	45 °C	36,000

Anexo 2 Características de servomotores en el mercado

SERVOMOTORES				
Característica	FUTABA S3003	MG90S	MG995	SG90
Tipo de motor	3 polos tipo ferrita			
Voltaje [V]	4.5 - 6	4.8 - 6	4.8 – 7.2	4.8 - 6
Corriente [mA]	7.2 - 8			
Torque [Kg*cm]	3.2-4.1	1.8 - 2.2	8.5 - 10	1.8 - 2.5
Velocidad sin carga [s/60°]	0.23 – 0.19	0.10 – 0.08	0.2 – 0.16	0.1
Piñonería	Plástica	Metálica		Plástica
Ancho de pulso	1520us~1900us	5us		10us
Precio	15000	12000	23000	
Temperatura de operación	-20°C - 60°C		0°C – 55°C	0°C – 55°C
Modulación	Analógica	Digital		Digital
Peso	37.2 gr	13.4g	55 g	14.7
Rango giro	180°	180°	120°	180°
Dimensiones (cm)	4.04 x 1.98 x 3.6	22.5 x 12 x 35.5	40.7 x 19.7 x 42.9	22.2 x 11.8 x 31

Anexo 3 Características de reguladores controladores de voltaje en el mercado

Regulador Controlador de Voltaje				
Característica	W88-10A	PV2410U	SPT-45	ENS2448-80D
Voltaje de operación	12V / 24V.	12/24V	12V / 24V.	24/48V
Protección de descarga	10.8 V / 21.6 V.			
Máximo voltaje en paneles	25 V / 36 V.	25 V / 36 V.	12/24V	
Corriente en paneles	10 A	10 A	45 A	80A
Autoconsumo	10mA	10mA	20mA	
Precio promedio (cop)	\$54.000	\$67.000	\$425.000	\$643.200
Dimensiones (cm)	14.4 * 8.2 * 4.2	16.8 * 9.2 * 4.2	21.9 * 15.4 * 5.5	
Peso (Kg)	0.3 Kg	0.26Kg	2.0	
Temperatura de trabajo		20°C - 55°C	-20°C a 70°C	-20°C a 70°C

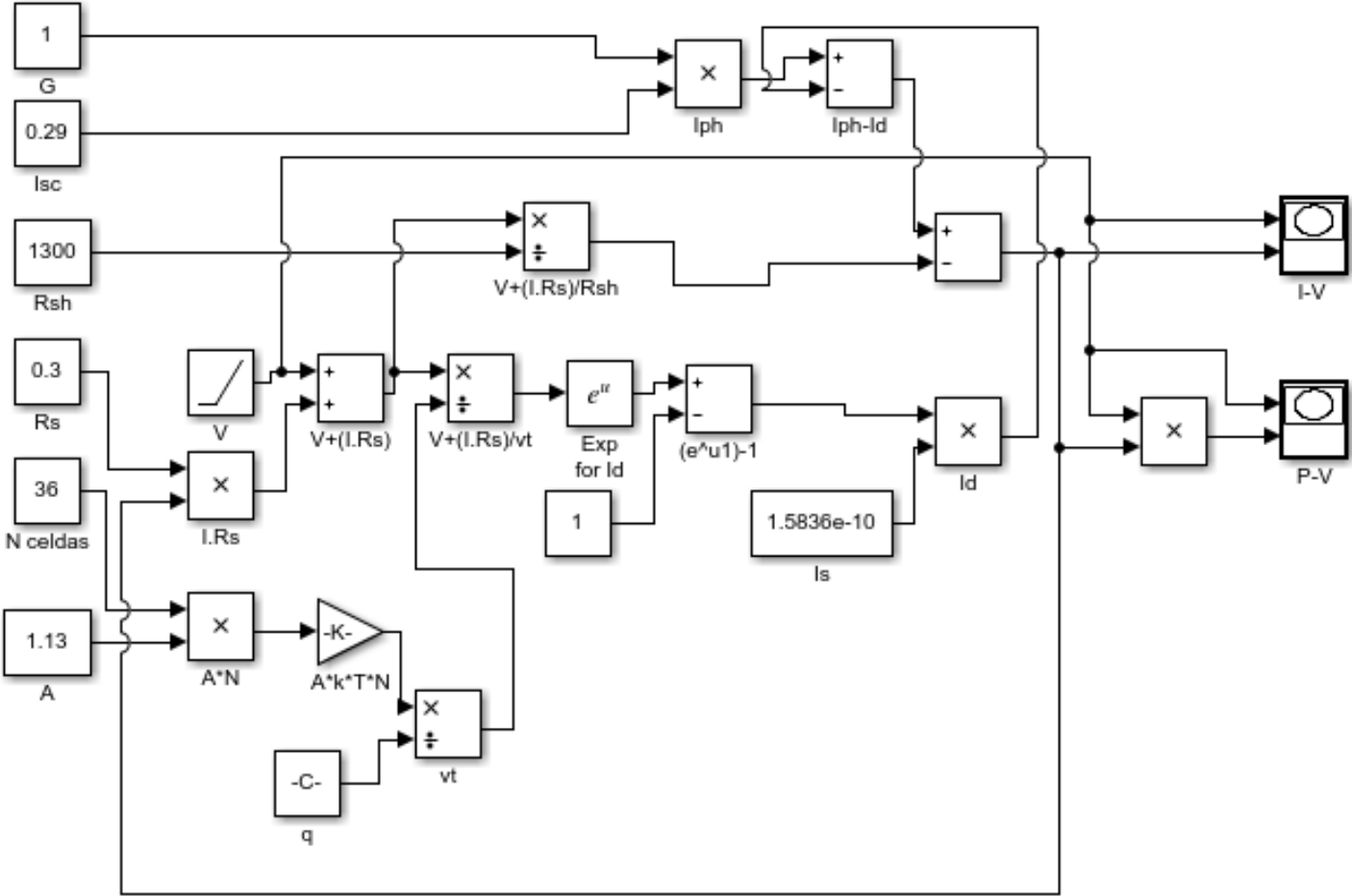
Anexo 4 Características de sensores lumínicos en el mercado

Sensores				
Característica	LDR (<i>Light Dependant Resistor</i>)	Fotodiodos	Celdas Fotovoltaicas	CCD(Charge Coupled Device)
<i>Sensor</i>	LDR GL5528			
<i>Resistencia en luz (10 lux):</i>	8K-20K Ohm			
<i>Resistencia en oscuridad:</i>	1M Ohm			
<i>Voltaje máx:</i>	150V			
<i>Potencia máx:</i>	100mW			
<i>Material fotosensible:</i>	CdS (Sulfato de Sodio)	Silicio/Germanio/InGaAs/Sulfuro de Plomo		
<i>Frecuencia de luz pico:</i>	540 nm	Depende del material		

Anexo 5 Calificación dada a cada sensor

Calificación sensores				
	LDR (<i>Light Dependant Resistor</i>)	Fotodiodos	Celdas Fotovoltaicas	CCD(Charge Coupled Device)
Precio (Cop/CU)	4	3	2	1
Facilidad de Instalación	4	3	1	2
Dimensiones	3	4	1	2
Precisión	2	1	3	4
Angulo de Incidencia	2	1	3	4
CALIFICACIÓN	15	12	10	13

Anexo 6 Modelamiento matemático de sistema de control desarrollado en Simulink



Anexo 7 Calificación dada a posibles materiales de construcción de estructuras

	VARILLAS DE ALUMINIO		LAMINAS DE ALUMINIO		MADERA		TUBO PVC	
	Característica	Valoración	Característica	Valoración	Característica	Valoración	Característica	Valoración
Maleabilidad material	N/A	1	N/A	2	N/A	3	N/A	4
Posibilidad de corrección	N/A	1	N/A	2	N/A	2	N/A	3
Precio (cop/unidad)	\$ 4.186	2	\$ 6.500	1	\$ 2.280	3	\$ 3.500	3
Durabilidad	N/A	4	N/A	3	N/A	1	N/A	2
Resistencia a la intemperie	N/A	3	N/A	2	N/A	1	N/A	3
Peso	N/A	1	N/A	3	N/A	2	N/A	4
Resistencia	N/A	4	N/A	3	N/A	2	N/A	3
Calificación		16		16		14		22

Anexo 8 Valores de voltaje capturado el 09 de mayo

Hora	Control de posición	Lazo Abierto
5/10/2021 5:06	6.14	5.82
5/10/2021 5:16	5.63	5.20
5/10/2021 5:26	5.68	6.11
5/10/2021 5:36	5.41	6.29
5/10/2021 5:46	6.29	5.86
5/10/2021 5:56	5.88	5.28
5/10/2021 6:06	6.82	6.92
5/10/2021 6:16	7.12	6.89
5/10/2021 6:26	7.29	6.99
5/10/2021 6:36	7.14	7.12
5/10/2021 6:46	7.42	7.28
5/10/2021 6:56	7.04	7.15
5/10/2021 7:06	7.93	8.36
5/10/2021 7:16	8.00	7.82
5/10/2021 7:26	7.95	7.88
5/10/2021 7:36	8.27	8.13
5/10/2021 7:46	8.14	7.93
5/10/2021 7:56	8.28	8.27
5/10/2021 8:06	8.05	7.95
5/10/2021 8:16	8.21	8.22
5/10/2021 8:26	8.75	9.75
5/10/2021 8:36	8.88	8.87
5/10/2021 8:46	8.77	9.62
5/10/2021 8:56	9.65	9.03
5/10/2021 9:06	9.23	9.70
5/10/2021 9:16	8.52	8.87
5/10/2021 9:26	8.81	8.79
5/10/2021 9:36	8.55	9.05
5/10/2021 9:46	10.59	10.57
5/10/2021 9:56	10.47	10.33
5/10/2021 10:06	10.60	10.32
5/10/2021 10:16	10.14	10.80
5/10/2021 10:26	10.12	10.41
5/10/2021 10:36	10.27	10.34
5/10/2021 10:46	10.18	10.28
5/10/2021 10:56	11.38	11.47
5/10/2021 11:06	11.54	11.21
5/10/2021 11:16	11.19	11.24
5/10/2021 11:26	11.92	11.79
5/10/2021 11:36	12.00	11.67
5/10/2021 11:46	11.68	11.82
5/10/2021 11:56	11.67	11.81
5/10/2021 12:06	11.87	11.83
5/10/2021 12:16	11.88	11.80
5/10/2021 12:26	11.81	11.67
5/10/2021 12:36	11.82	11.72
5/10/2021 12:46	11.91	11.98
5/10/2021 12:56	11.64	11.61
5/10/2021 13:06	11.86	11.90
5/10/2021 13:16	11.68	11.29
5/10/2021 13:26	11.62	11.35

5/10/2021 13:36	11.88	11.34
5/10/2021 13:46	11.73	11.29
5/10/2021 13:56	11.84	11.17
5/10/2021 14:06	11.62	11.06
5/10/2021 14:16	11.76	11.07
5/10/2021 14:26	11.70	10.80
5/10/2021 14:36	11.46	10.30
5/10/2021 14:46	11.22	10.57
5/10/2021 14:56	11.31	10.42
5/10/2021 15:06	11.36	10.74
5/10/2021 15:16	11.44	10.61
5/10/2021 15:26	11.13	9.57
5/10/2021 15:36	10.90	9.63
5/10/2021 15:46	10.84	7.64
5/10/2021 15:56	10.47	7.71
5/10/2021 16:06	10.21	7.60
5/10/2021 16:16	10.45	7.33
5/10/2021 16:26	9.04	7.70
5/10/2021 16:36	10.14	6.03
5/10/2021 16:46	8.37	6.50
5/10/2021 16:56	8.79	6.15
5/10/2021 17:06	9.84	6.14
5/10/2021 17:16	7.81	6.45
5/10/2021 17:26	7.66	6.19
5/10/2021 17:36	8.29	7.35
5/10/2021 17:46	7.07	5.94
5/10/2021 17:56	6.90	4.34
5/10/2021 18:06	6.72	2.91
5/10/2021 18:16	6.95	2.80
5/10/2021 18:26	6.04	2.75
5/10/2021 18:36	6.00	3.01
5/10/2021 18:46	6.17	2.71
5/10/2021 18:56	6.20	2.19
5/10/2021 19:06	4.52	2.23
5/10/2021 19:16	5.98	1.94
5/10/2021 19:26	5.57	2.12
5/10/2021 19:36	5.23	1.95

Anexo 9 Valores de voltaje capturado el 10 de mayo

Hora	Control de posición	Lazo Abierto
5/11/2021 4:58	6.49	5.32
5/11/2021 5:08	6.14	5.73
5/11/2021 5:18	5.69	5.92
5/11/2021 5:28	5.37	5.33
5/11/2021 5:38	5.83	6.02
5/11/2021 5:48	5.93	5.39
5/11/2021 5:58	7.31	6.97
5/11/2021 6:08	7.20	7.42
5/11/2021 6:18	7.00	7.03

5/11/2021 6:28	7.33	7.18
5/11/2021 6:38	7.23	6.96
5/11/2021 6:48	7.42	7.35
5/11/2021 6:58	7.98	8.39
5/11/2021 7:08	7.99	8.23
5/11/2021 7:18	8.35	8.18
5/11/2021 7:28	8.36	8.29
5/11/2021 7:38	8.20	8.05
5/11/2021 7:48	8.31	8.04
5/11/2021 7:58	8.11	8.31
5/11/2021 8:08	8.28	8.02
5/11/2021 8:18	9.53	8.60
5/11/2021 8:28	9.63	9.52
5/11/2021 8:38	9.06	9.21
5/11/2021 8:48	9.73	9.72
5/11/2021 8:58	9.38	9.58
5/11/2021 9:08	9.74	8.51
5/11/2021 9:18	8.74	8.89
5/11/2021 9:28	9.38	9.35
5/11/2021 9:38	10.43	10.82
5/11/2021 9:48	10.11	10.35
5/11/2021 9:58	10.11	10.12
5/11/2021 10:08	10.49	10.98
5/11/2021 10:18	10.60	10.22
5/11/2021 10:28	10.98	10.47
5/11/2021 10:38	10.97	10.98
5/11/2021 10:48	11.55	11.58
5/11/2021 10:58	11.56	11.33
5/11/2021 11:08	11.01	11.37
5/11/2021 11:18	11.88	11.62
5/11/2021 11:28	11.61	11.75
5/11/2021 11:38	11.76	11.94
5/11/2021 11:48	11.93	11.93
5/11/2021 11:58	11.62	11.75
5/11/2021 12:08	11.90	11.79
5/11/2021 12:18	11.98	11.93
5/11/2021 12:28	11.79	11.67
5/11/2021 12:38	11.95	11.69
5/11/2021 12:48	11.76	11.73
5/11/2021 12:58	11.90	11.83
5/11/2021 13:08	11.88	11.23
5/11/2021 13:18	11.67	11.24
5/11/2021 13:28	11.84	11.28
5/11/2021 13:38	11.85	11.23
5/11/2021 13:48	11.65	10.96
5/11/2021 13:58	11.63	11.26
5/11/2021 14:08	11.78	10.70
5/11/2021 14:18	11.81	10.78
5/11/2021 14:28	11.61	10.52
5/11/2021 14:38	11.07	10.21
5/11/2021 14:48	11.06	10.44
5/11/2021 14:58	11.32	10.33
5/11/2021 15:08	11.29	10.55
5/11/2021 15:18	11.10	10.12

5/11/2021 15:28	10.54	10.25
5/11/2021 15:38	10.54	7.71
5/11/2021 15:48	10.45	8.07
5/11/2021 15:58	10.45	8.26
5/11/2021 16:08	10.71	7.18
5/11/2021 16:18	8.75	7.10
5/11/2021 16:28	9.87	6.93
5/11/2021 16:38	9.94	6.79
5/11/2021 16:48	9.40	6.69
5/11/2021 16:58	9.76	6.71
5/11/2021 17:08	7.55	6.41
5/11/2021 17:18	7.41	6.29
5/11/2021 17:28	7.79	6.22
5/11/2021 17:38	6.61	6.20
5/11/2021 17:48	6.64	4.46
5/11/2021 17:58	6.80	3.13
5/11/2021 18:08	6.50	3.03
5/11/2021 18:18	6.03	2.67
5/11/2021 18:28	6.21	2.53
5/11/2021 18:38	6.26	2.67
5/11/2021 18:48	6.28	2.01
5/11/2021 18:58	4.46	1.89
5/11/2021 19:08	5.12	2.13
5/11/2021 19:18	4.41	2.29
5/11/2021 19:28	4.12	2.07
5/11/2021 19:38	4.82	1.87
5/11/2021 19:48	4.50	1.88
5/11/2021 19:58	4.10	1.99

Anexo 10 Valores de voltaje capturado el 11 de mayo

Hora	Control de posición	Lazo Abierto
5/11/2021 5:11	5.82	6.10
5/11/2021 5:18	6.11	6.00
5/11/2021 5:28	5.91	5.62
5/11/2021 5:38	5.56	5.74
5/11/2021 5:48	5.67	5.46
5/11/2021 5:58	7.21	7.16
5/11/2021 6:08	7.20	6.94
5/11/2021 6:18	7.11	6.70
5/11/2021 6:28	7.29	7.09
5/11/2021 6:38	6.71	6.86
5/11/2021 6:48	7.28	7.49
5/11/2021 6:58	6.82	6.99
5/11/2021 7:08	7.16	7.09
5/11/2021 7:18	6.91	7.01

5/11/2021 7:28	7.24	7.01
5/11/2021 7:38	7.85	7.88
5/11/2021 7:48	7.82	7.92
5/11/2021 7:58	7.92	7.82
5/11/2021 8:08	7.90	7.99
5/11/2021 8:18	8.81	8.76
5/11/2021 8:28	8.67	8.67
5/11/2021 8:38	8.58	8.58
5/11/2021 8:48	8.93	8.72
5/11/2021 8:58	8.63	8.94
5/11/2021 9:08	9.29	9.18
5/11/2021 9:18	8.97	9.00
5/11/2021 9:28	8.56	9.12
5/11/2021 9:38	10.32	9.95
5/11/2021 9:48	9.76	9.98
5/11/2021 9:58	10.40	10.16
5/11/2021 10:08	10.22	9.96
5/11/2021 10:18	10.26	9.89
5/11/2021 10:28	10.13	10.13
5/11/2021 10:38	10.20	10.08
5/11/2021 10:48	11.11	10.91
5/11/2021 10:58	11.08	10.90
5/11/2021 11:08	10.89	11.17
5/11/2021 11:18	11.57	11.55
5/11/2021 11:28	11.64	11.64
5/11/2021 11:38	11.52	11.69
5/11/2021 11:48	11.54	11.56
5/11/2021 11:58	11.53	11.68
5/11/2021 12:08	11.67	11.67
5/11/2021 12:18	11.56	11.57
5/11/2021 12:28	11.67	11.53
5/11/2021 12:38	11.55	11.90
5/11/2021 12:48	11.59	11.92
5/11/2021 12:58	11.57	11.62
5/11/2021 13:08	11.75	11.38
5/11/2021 13:18	11.52	11.22
5/11/2021 13:28	11.50	11.28
5/11/2021 13:38	11.77	11.33
5/11/2021 13:48	11.74	11.07
5/11/2021 13:58	11.71	10.83
5/11/2021 14:08	11.68	10.74

5/11/2021 14:18	11.56	11.00
5/11/2021 14:28	11.11	10.24
5/11/2021 14:38	11.24	10.43
5/11/2021 14:48	11.58	10.81
5/11/2021 14:58	11.48	10.22
5/11/2021 15:08	11.21	10.57
5/11/2021 15:18	11.40	9.88
5/11/2021 15:28	10.14	9.53
5/11/2021 15:38	10.39	8.11
5/11/2021 15:48	10.01	7.77
5/11/2021 15:58	10.20	7.89
5/11/2021 16:08	10.04	8.11
5/11/2021 16:18	8.50	7.95
5/11/2021 16:28	9.80	5.98
5/11/2021 16:38	8.89	6.72
5/11/2021 16:48	9.96	6.32
5/11/2021 16:58	9.54	6.34
5/11/2021 17:08	7.80	6.34
5/11/2021 17:18	7.61	6.49
5/11/2021 17:28	7.32	5.23
5/11/2021 17:38	6.95	4.59
5/11/2021 17:48	6.20	3.31
5/11/2021 17:58	6.88	2.76
5/11/2021 18:08	6.68	2.65
5/11/2021 18:18	5.20	2.94
5/11/2021 18:28	6.00	3.00
5/11/2021 18:38	5.67	2.63
5/11/2021 18:48	5.70	2.21
5/11/2021 18:58	4.73	1.83
5/11/2021 19:08	4.32	2.12
5/11/2021 19:18	4.95	2.05
5/11/2021 19:28	4.09	2.17
5/11/2021 19:38	3.19	2.28
5/11/2021 19:48	3.09	2.14
5/11/2021 19:58	3.98	1.99

Anexo 11 Valores de voltaje capturado el 12 de mayo

Hora	Control de posición	Lazo Abierto
5/12/2021 5:02	6.00	6.21

5/12/2021 5:12	6.21	5.48
5/12/2021 5:22	5.52	5.43
5/12/2021 5:32	5.93	5.55
5/12/2021 5:42	5.63	5.64
5/12/2021 5:52	5.35	6.10
5/12/2021 6:02	6.88	7.47
5/12/2021 6:12	7.10	7.11
5/12/2021 6:22	7.21	7.24
5/12/2021 6:32	7.07	6.94
5/12/2021 6:42	7.38	6.94
5/12/2021 6:52	6.93	7.37
5/12/2021 7:02	7.94	8.05
5/12/2021 7:12	8.23	7.98
5/12/2021 7:22	8.00	8.03
5/12/2021 7:32	8.00	7.80
5/12/2021 7:42	8.16	7.97
5/12/2021 7:52	8.19	8.25
5/12/2021 8:02	8.21	7.88
5/12/2021 8:12	8.34	7.89
5/12/2021 8:22	8.95	9.30
5/12/2021 8:32	9.58	8.67
5/12/2021 8:42	8.75	9.24
5/12/2021 8:52	9.31	8.90
5/12/2021 9:02	9.33	9.17
5/12/2021 9:12	8.71	9.54
5/12/2021 9:22	8.83	8.87
5/12/2021 9:32	8.84	8.79
5/12/2021 9:42	10.65	10.42
5/12/2021 9:52	10.51	10.33
5/12/2021 10:02	10.55	10.70
5/12/2021 10:12	10.42	10.38
5/12/2021 10:22	10.45	10.68
5/12/2021 10:32	10.95	10.23
5/12/2021 10:42	10.91	10.53
5/12/2021 10:52	11.50	11.03
5/12/2021 11:02	11.45	11.35
5/12/2021 11:12	11.16	11.50
5/12/2021 11:22	11.80	11.65
5/12/2021 11:32	11.85	11.79
5/12/2021 11:42	11.84	11.86
5/12/2021 11:52	11.62	11.94

5/12/2021 12:02	11.87	11.69
5/12/2021 12:12	11.68	11.76
5/12/2021 12:22	11.87	11.84
5/12/2021 12:32	11.71	11.72
5/12/2021 12:42	11.86	11.86
5/12/2021 12:52	11.93	11.94
5/12/2021 13:02	11.97	11.88
5/12/2021 13:12	11.76	11.32
5/12/2021 13:22	11.84	11.29
5/12/2021 13:32	11.83	11.28
5/12/2021 13:42	11.63	11.27
5/12/2021 13:52	11.84	11.14
5/12/2021 14:02	11.91	11.20
5/12/2021 14:12	11.95	11.02
5/12/2021 14:22	11.93	10.94
5/12/2021 14:32	11.31	10.72
5/12/2021 14:42	11.34	10.42
5/12/2021 14:52	11.08	10.59
5/12/2021 15:02	11.42	10.55
5/12/2021 15:12	11.49	10.74
5/12/2021 15:22	11.58	9.57
5/12/2021 15:32	10.39	9.87
5/12/2021 15:42	10.38	7.77
5/12/2021 15:52	10.98	7.76
5/12/2021 16:02	10.28	8.37
5/12/2021 16:12	10.95	7.86
5/12/2021 16:22	8.86	7.38
5/12/2021 16:32	8.51	6.64
5/12/2021 16:42	9.53	6.16
5/12/2021 16:52	8.60	6.47
5/12/2021 17:02	9.06	6.09
5/12/2021 17:12	7.56	6.57
5/12/2021 17:22	8.25	6.34
5/12/2021 17:32	7.51	6.14
5/12/2021 17:42	7.17	4.86
5/12/2021 17:52	6.86	5.85
5/12/2021 18:02	6.31	2.62
5/12/2021 18:12	6.53	3.06
5/12/2021 18:22	6.13	2.60
5/12/2021 18:32	6.16	2.79
5/12/2021 18:42	6.10	3.12

5/12/2021 18:52	6.21	2.27
5/12/2021 19:02	4.08	2.14
5/12/2021 19:12	5.83	1.93
5/12/2021 19:22	5.69	1.98
5/12/2021 19:32	5.02	2.23
5/12/2021 19:42	4.65	2.00
5/12/2021 19:52	4.41	2.21
5/12/2021 20:02	4.65	1.9
5/12/2021 20:12	4.38	2.0

Anexo 12 Valores de voltaje capturado el 13 de mayo

Hora	Control de posición	Lazo Abierto
5/13/2021 5:00	5.40	6.14
5/13/2021 5:10	6.37	6.31
5/13/2021 5:20	5.27	5.30
5/13/2021 5:30	6.38	6.18
5/13/2021 5:40	6.41	6.03
5/13/2021 5:50	5.33	5.46
5/13/2021 6:00	7.13	7.01
5/13/2021 6:10	6.81	7.39
5/13/2021 6:20	7.09	7.41
5/13/2021 6:30	7.14	6.84
5/13/2021 6:40	6.98	7.31
5/13/2021 6:50	7.26	7.11
5/13/2021 7:00	8.25	8.03
5/13/2021 7:10	8.20	8.26
5/13/2021 7:20	8.09	8.02
5/13/2021 7:30	7.89	7.83
5/13/2021 7:40	7.90	8.31
5/13/2021 7:50	8.00	8.17
5/13/2021 8:00	8.28	8.20
5/13/2021 8:10	8.16	8.16
5/13/2021 8:20	8.57	8.64
5/13/2021 8:30	8.96	9.38
5/13/2021 8:40	9.52	9.53
5/13/2021 8:50	9.21	9.05
5/13/2021 9:00	9.28	9.12
5/13/2021 9:10	8.90	9.54
5/13/2021 9:20	9.55	9.04

5/13/2021 9:30	9.25	9.75
5/13/2021 9:40	10.73	10.99
5/13/2021 9:50	10.68	10.50
5/13/2021 10:00	10.25	10.17
5/13/2021 10:10	10.52	10.74
5/13/2021 10:20	10.10	10.22
5/13/2021 10:30	10.22	10.50
5/13/2021 10:40	10.95	10.83
5/13/2021 10:50	11.04	11.03
5/13/2021 11:00	11.55	11.56
5/13/2021 11:10	11.51	11.45
5/13/2021 11:20	11.76	11.60
5/13/2021 11:30	11.74	11.92
5/13/2021 11:40	11.82	11.82
5/13/2021 11:50	11.72	11.81
5/13/2021 12:00	11.92	11.96
5/13/2021 12:10	11.90	11.63
5/13/2021 12:20	11.83	11.95
5/13/2021 12:30	11.89	11.82
5/13/2021 12:40	11.78	11.75
5/13/2021 12:50	11.70	11.79
5/13/2021 13:00	11.85	11.99
5/13/2021 13:10	11.84	11.36
5/13/2021 13:20	11.88	11.21
5/13/2021 13:30	11.91	11.33
5/13/2021 13:40	11.81	11.25
5/13/2021 13:50	11.77	10.73
5/13/2021 14:00	11.89	11.17
5/13/2021 14:10	11.68	11.01
5/13/2021 14:20	11.75	11.28
5/13/2021 14:30	11.22	10.25
5/13/2021 14:40	11.55	10.79
5/13/2021 14:50	11.23	10.53
5/13/2021 15:00	11.14	10.33
5/13/2021 15:10	11.28	10.27
5/13/2021 15:20	11.42	10.20
5/13/2021 15:30	10.70	10.10
5/13/2021 15:40	11.00	7.34
5/13/2021 15:50	10.71	7.71
5/13/2021 16:00	10.25	8.21
5/13/2021 16:10	10.27	8.23

5/13/2021 17:55	3.98	3.06
5/13/2021 18:05	3.78	2.82
5/13/2021 18:15	3.08	2.80
5/13/2021 18:25	3.15	3.18
5/13/2021 18:35	3.01	2.88
5/13/2021 18:45	3.55	1.81
5/13/2021 18:55	3.26	2.22
5/13/2021 19:05	3.02	2.21
5/13/2021 19:15	2.55	2.12
5/13/2021 19:25	2.37	2.09
5/13/2021 19:35	1.90	1.94
5/13/2021 19:45	1.80	1.62
5/13/2021 19:55	0.36	0.34
5/13/2021 20:05	0.11	0.18
5/13/2021 20:15	0.32	0.95
5/13/2021 20:25	0.54	0.95
5/13/2021 20:35	0.90	0.36
5/13/2021 20:45	0.91	0.55
5/13/2021 20:55	0.28	0.30

Anexo 13 Valores de voltaje capturado el 14 de mayo

Hora	Control de posición	Lazo Abierto
5/14/2021 5:05	5.54	5.75
5/14/2021 5:15	5.66	5.75
5/14/2021 5:25	6.14	5.17
5/14/2021 5:35	6.06	5.13
5/14/2021 5:45	5.74	5.29
5/14/2021 5:55	6.67	6.67
5/14/2021 6:05	6.97	6.84
5/14/2021 6:15	6.74	6.80
5/14/2021 6:25	6.66	6.93
5/14/2021 6:35	7.25	6.99
5/14/2021 6:45	7.35	7.50
5/14/2021 6:55	7.13	7.11
5/14/2021 7:05	7.47	7.27
5/14/2021 7:15	7.39	7.26
5/14/2021 7:25	7.21	7.45
5/14/2021 7:35	7.99	8.13

5/14/2021 7:45	7.88	8.08
5/14/2021 7:55	8.02	8.01
5/14/2021 8:05	8.15	8.04
5/14/2021 8:15	8.76	8.54
5/14/2021 8:25	8.69	9.16
5/14/2021 8:35	9.01	8.99
5/14/2021 8:45	9.15	8.84
5/14/2021 8:55	8.70	8.63
5/14/2021 9:05	8.69	8.52
5/14/2021 9:15	8.52	8.78
5/14/2021 9:25	9.38	8.59
5/14/2021 9:35	10.27	10.06
5/14/2021 9:45	10.44	10.23
5/14/2021 9:55	10.42	10.37
5/14/2021 10:05	9.80	10.00
5/14/2021 10:15	10.26	9.71
5/14/2021 10:25	10.31	9.91
5/14/2021 10:35	9.82	10.34
5/14/2021 10:45	10.95	11.15
5/14/2021 10:55	10.99	10.97
5/14/2021 11:05	10.93	10.98
5/14/2021 11:15	11.79	11.79
5/14/2021 11:25	11.55	11.61
5/14/2021 11:35	11.67	11.68
5/14/2021 11:45	11.75	11.77
5/14/2021 11:55	11.51	11.53
5/14/2021 12:05	11.59	11.52
5/14/2021 12:15	11.78	11.64
5/14/2021 12:25	11.73	11.73
5/14/2021 12:35	11.74	11.61
5/14/2021 12:45	11.55	11.91
5/14/2021 12:55	11.61	11.79
5/14/2021 13:05	11.54	11.31
5/14/2021 13:15	11.77	11.21
5/14/2021 13:25	11.54	11.30
5/14/2021 13:35	11.69	11.30
5/14/2021 13:45	11.61	10.75
5/14/2021 13:55	11.78	11.05
5/14/2021 14:05	11.52	11.29
5/14/2021 14:15	11.59	10.94
5/14/2021 14:25	11.46	10.22

5/14/2021 14:35	11.57	10.20
5/14/2021 14:45	11.27	10.24
5/14/2021 14:55	11.15	10.42
5/14/2021 15:05	11.12	10.69
5/14/2021 15:15	11.41	10.34
5/14/2021 15:25	10.32	9.90
5/14/2021 15:35	10.22	8.84
5/14/2021 15:45	10.44	8.39
5/14/2021 15:55	10.07	8.12
5/14/2021 16:05	10.44	8.16
5/14/2021 16:15	9.06	7.59
5/14/2021 16:25	9.38	6.69
5/14/2021 16:35	8.78	6.91
5/14/2021 16:45	8.30	6.25
5/14/2021 16:55	8.54	6.30
5/14/2021 17:05	7.36	6.21
5/14/2021 17:15	7.32	6.11
5/14/2021 17:25	7.09	6.14
5/14/2021 17:35	6.31	4.80
5/14/2021 17:45	6.12	3.10
5/14/2021 17:55	6.46	2.87
5/14/2021 18:05	6.49	2.70
5/14/2021 18:15	5.52	2.63
5/14/2021 18:25	5.66	3.16
5/14/2021 18:35	5.95	2.54

Anexo 14 Valores de voltaje capturado el 15 y 16 de mayo

Hora	Control de posición	Lazo Abierto
5/15/2021 5:05	5.20	6.03
5/15/2021 5:15	5.30	5.44
5/15/2021 5:25	6.31	5.83
5/15/2021 5:35	5.21	5.51
5/15/2021 5:45	6.24	5.73
5/15/2021 5:55	6.34	5.32
5/15/2021 6:05	7.37	6.99
5/15/2021 6:15	7.30	7.49
5/15/2021 6:25	6.80	7.09
5/15/2021 6:35	7.04	6.85
5/15/2021 6:45	6.83	7.27

5/15/2021 6:55	7.01	6.99
5/15/2021 7:05	8.09	7.84
5/15/2021 7:15	8.33	7.94
5/15/2021 7:25	8.11	7.95
5/15/2021 7:35	8.33	8.31
5/15/2021 7:45	8.13	7.95
5/15/2021 7:55	8.28	8.04
5/15/2021 8:05	8.35	8.30
5/15/2021 8:15	8.31	8.29
5/15/2021 8:25	9.01	9.62
5/15/2021 8:35	9.56	8.56
5/15/2021 8:45	8.64	9.42
5/15/2021 8:55	9.66	8.84
5/15/2021 9:05	9.18	8.80
5/15/2021 9:15	8.91	9.46
5/15/2021 9:25	8.70	9.61
5/15/2021 9:35	8.55	8.56
5/15/2021 9:45	10.83	10.12
5/15/2021 9:55	10.23	10.61
5/15/2021 10:05	10.22	10.14
5/15/2021 10:15	10.13	10.29
5/15/2021 10:25	10.39	10.90
5/15/2021 10:35	10.50	10.20
5/15/2021 10:45	10.26	10.02
5/15/2021 10:55	11.39	11.01
5/15/2021 11:05	11.44	11.14
5/15/2021 11:15	11.14	11.31
5/15/2021 11:25	11.84	11.73
5/15/2021 11:35	11.80	11.99
5/15/2021 11:45	11.91	11.88
5/15/2021 11:55	11.86	11.89
5/15/2021 12:05	11.80	11.63
5/15/2021 12:15	11.99	11.64
5/15/2021 12:25	11.82	11.93
5/15/2021 12:35	11.82	11.84
5/15/2021 12:45	11.70	11.69
5/15/2021 12:55	11.83	11.81
5/15/2021 13:05	11.80	11.77
5/15/2021 13:15	11.72	11.36
5/15/2021 13:25	11.65	11.20
5/15/2021 13:35	11.85	11.30

5/15/2021 13:45	11.91	11.38
5/15/2021 13:55	11.70	11.10
5/15/2021 14:05	11.69	11.14
5/15/2021 14:15	11.74	10.93
5/15/2021 14:25	11.95	10.90
5/15/2021 14:35	11.51	10.76
5/15/2021 14:45	11.26	10.74
5/15/2021 14:55	11.43	10.44
5/15/2021 15:05	11.47	10.78
5/15/2021 15:15	11.52	10.72
5/15/2021 15:25	11.61	10.27
5/15/2021 15:35	10.30	9.83
5/15/2021 15:45	10.37	7.91
5/15/2021 15:55	10.23	7.20
5/15/2021 16:05	10.39	8.20
5/15/2021 16:15	10.59	7.26
5/15/2021 16:25	9.59	7.80
5/15/2021 16:35	8.95	6.30
5/15/2021 16:45	9.92	6.33
5/15/2021 16:55	8.52	6.17
5/15/2021 17:05	10.07	6.69
5/15/2021 17:15	7.37	5.79
5/15/2021 17:25	7.56	6.95
5/15/2021 17:35	7.87	6.31
5/15/2021 17:45	6.68	6.05
5/15/2021 17:55	6.81	5.61
5/15/2021 18:05	7.26	2.62
5/15/2021 18:15	6.84	3.04
5/15/2021 18:25	6.22	2.51
5/15/2021 18:35	6.16	2.83
5/15/2021 18:45	6.19	2.93
5/15/2021 18:55	6.09	2.19
5/15/2021 19:05	5.65	1.96
5/15/2021 19:15	4.49	1.97
5/15/2021 19:25	5.65	2.07
5/15/2021 19:35	5.17	1.82
5/15/2021 19:45	4.36	0.00
5/15/2021 19:55	4.63	0
5/15/2021 20:05	4.87	0
5/15/2021 20:15	4.45	0
5/15/2021 20:25	0.00	0

5/15/2021 20:35	0.00	0
5/15/2021 20:45	0.00	0
5/15/2021 20:55	0.00	0
5/15/2021 21:05	0.00	0
5/15/2021 21:15	0.00	0
5/15/2021 21:25	0.00	0
5/15/2021 21:35	0.00	0
5/15/2021 21:45	0.00	0
5/15/2021 21:55	0.00	0
5/15/2021 22:05	0.00	0
5/15/2021 22:15	0.00	0
5/15/2021 22:25	0.00	0
5/15/2021 22:35	0.00	0
5/15/2021 22:45	0.00	0
5/15/2021 22:55	0.00	0
5/15/2021 23:05	0.00	0
5/15/2021 23:15	0.00	0
5/15/2021 23:25	0.00	0
5/15/2021 23:35	0.00	0
5/15/2021 23:45	0.00	0
5/15/2021 23:55	0.00	0
5/16/2021 0:05	0.00	0
5/16/2021 0:15	0.00	0
5/16/2021 0:25	0.00	0
5/16/2021 0:35	0.00	0
5/16/2021 0:45	0.00	0
5/16/2021 0:55	0.00	0
5/16/2021 1:05	0.00	0
5/16/2021 1:15	0.00	0
5/16/2021 1:25	0.00	0
5/16/2021 1:35	0.00	0
5/16/2021 1:45	0.00	0
5/16/2021 1:55	0.00	0
5/16/2021 2:05	0.00	0
5/16/2021 2:15	0.00	0
5/16/2021 2:25	0.00	0
5/16/2021 2:35	0.00	0
5/16/2021 2:45	0.00	0
5/16/2021 2:55	0.00	0
5/16/2021 3:05	0.00	0
5/16/2021 3:15	0.00	0

5/16/2021 3:25	0.00	0
5/16/2021 3:35	0.00	0
5/16/2021 3:45	0.00	0
5/16/2021 3:55	0.00	0
5/16/2021 4:05	0.00	0
5/16/2021 4:15	0.00	0
5/16/2021 4:25	0.00	0
5/16/2021 4:35	0.87	0
5/16/2021 4:45	1.91	1.20
5/16/2021 4:55	3.25	1.36
5/16/2021 5:05	5.33	6.44
5/16/2021 5:15	5.39	5.86
5/16/2021 5:25	6.03	5.56
5/16/2021 5:35	6.19	6.00
5/16/2021 5:45	5.45	6.15
5/16/2021 5:55	6.43	5.29
5/16/2021 6:05	7.04	7.28
5/16/2021 6:15	7.49	7.08
5/16/2021 6:25	7.07	6.99
5/16/2021 6:35	7.01	7.37
5/16/2021 6:45	7.43	7.05
5/16/2021 6:55	6.92	6.88
5/16/2021 7:05	7.83	7.84
5/16/2021 7:15	8.21	7.86
5/16/2021 7:25	8.03	7.95
5/16/2021 7:35	7.83	8.28
5/16/2021 7:45	8.26	8.06
5/16/2021 7:55	7.89	7.86
5/16/2021 8:05	7.90	8.04
5/16/2021 8:15	8.16	8.01
5/16/2021 8:25	9.16	8.57
5/16/2021 8:35	9.18	8.52
5/16/2021 8:45	9.23	9.71
5/16/2021 8:55	8.72	9.14
5/16/2021 9:05	8.57	9.04
5/16/2021 9:15	9.76	9.38
5/16/2021 9:25	8.99	8.68
5/16/2021 9:35	8.99	8.84
5/16/2021 9:45	10.96	10.78
5/16/2021 9:55	10.65	10.23
5/16/2021 10:05	10.45	10.44

5/16/2021 10:15	10.74	10.24
5/16/2021 10:25	10.97	10.65
5/16/2021 10:35	10.91	10.60
5/16/2021 10:45	10.45	10.44
5/16/2021 10:55	11.58	11.02
5/16/2021 11:05	11.36	11.09
5/16/2021 11:15	11.27	11.57
5/16/2021 11:25	11.96	11.98
5/16/2021 11:35	11.81	11.96
5/16/2021 11:45	11.80	11.70
5/16/2021 11:55	11.70	11.83
5/16/2021 12:05	11.87	11.90
5/16/2021 12:15	11.80	11.97
5/16/2021 12:25	11.82	11.67
5/16/2021 12:35	11.89	11.70
5/16/2021 12:45	11.67	11.93
5/16/2021 12:55	11.65	11.76
5/16/2021 13:05	11.65	11.99
5/16/2021 13:15	11.65	11.33
5/16/2021 13:25	11.65	11.20
5/16/2021 13:35	11.72	11.38
5/16/2021 13:45	11.62	11.21
5/16/2021 13:55	11.87	11.12
5/16/2021 14:05	11.79	11.15
5/16/2021 14:15	11.99	10.84
5/16/2021 14:25	11.93	10.84
5/16/2021 14:35	11.18	10.88
5/16/2021 14:45	11.57	10.60
5/16/2021 14:55	11.66	10.84
5/16/2021 15:05	11.14	10.89
5/16/2021 15:15	11.16	10.36
5/16/2021 15:25	11.58	9.81
5/16/2021 15:35	10.21	9.70
5/16/2021 15:45	10.50	7.37

Anexo 15 Video de funcionamiento sistema de control de posición angular para paneles solares