



## *Diseño e Implementación de un Seguidor Solar para Aumentar el Rendimiento de Generación*

### *Design and Implementation of a Solar Tracker to Increase the Performance of Energy Generation in Photovoltaic Solar Panels*

### *Projeto e implementação de um rastreador solar para aumentar o desempenho da geração*

Andrés Padilla-Romero <sup>I</sup>  
[andres.padilla@gmail.com](mailto:andres.padilla@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-2547-6545>

Sayda Cecilia Chamba-Melo <sup>II</sup>  
[sayda.chamba@gmail.com](mailto:sayda.chamba@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0003-2104-2114>

Erika Marisol Sarango-Loor <sup>III</sup>  
[erika.sarango@gmail.com](mailto:erika.sarango@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0003-1690-2829>

Marjorie Estefanía Jiménez-Loor <sup>IV</sup>  
[marjorie.jimenez@gmail.com](mailto:marjorie.jimenez@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0003-4864-8861>

**Correspondencia:** [andres.padilla@gmail.com](mailto:andres.padilla@gmail.com)

Ciencias Técnicas y Aplicadas  
Artículo de Investigación

\***Recibido:** 20 de febrero de 2022 \***Aceptado:** 18 de marzo de 2022 \* **Publicado:** 01 abril de 2022

- I. Instituto Superior Pedagógico Intercultural bilingüe Martha Bucaram de Roldós, Nueva Loja-Ecuador.
- II. Instituto Superior Pedagógico Intercultural bilingüe Martha Bucaram de Roldós, Nueva Loja-Ecuador.
- III. Instituto Superior Pedagógico Intercultural bilingüe Martha Bucaram de Roldós, Nueva Loja-Ecuador.
- IV. Instituto Superior Pedagógico Intercultural bilingüe Martha Bucaram de Roldós, Nueva Loja-Ecuador.

## Resumen

En este trabajo se realiza el diseño y construcción de un prototipo de seguidor de luz solar, el cual consta de un panel solar de 50W acoplado a un soporte con dos ejes móviles comandados por dos motores DC cuyo movimiento es definido mediante la entrada de los sensores foto resistivos en base a cuatro cuadrantes para detectar la mayor intensidad de luz solar, que posteriormente mediante el algoritmo de control implementado sobre un controlador Programable Delta DVP 20EX2; capaz de incrementar la eficiencia en el sistema de generación fotovoltaica y almacenar energía en una batería de 50Ah para que posteriormente el usuario pueda conectar cargas de corriente alterna a la salida del inversor de 1KW. El presente proyecto demostró una mejora en la eficiencia del tiempo de carga de la batería del 20% en comparación con el panel solar estático convencional, adicionalmente, puede abastecer dos horas de uso continuo con una carga constante de 200W. Por otro lado, el sistema seguidor tiene una respuesta de 20 segundos ante cualquier cambio de la dirección o intensidad del sol. Finalmente, el trabajo presenta el diseño eléctrico, mecánico y de control del sistema seguidor para que pueda contribuir a desarrollos posteriores o mejoras que permitan maximizar su eficiencia.

**Palabras Claves:** Panel solar; seguidor solar; PLC; LDR; eficiencia energética; energías renovables.

## Abstract

In this work the design and construction of a prototype of a sunlight tracker, which consists of a 50W solar panel coupled to two moving axes commanded by two DC motors whose movement is defined by the input of photo resistive sensors based on four quadrants to detect the highest intensity of sunlight, which subsequently through the on - off control algorithm performed on a Siemens Logo V8. 1 is able to add the necessary efficiency so that the solar panel can store energy in a 50Ah battery thanks to the controller so that later the user can connect alternating current loads to the output of the 1KW inverter. The system yields a 20% improvement in battery charging time compared to the conventional static solar panel, in addition, it can provide two hours of continuous use with a constant load of 200W. On the other hand, the tracking system has a 20-second response to any change in the direction or intensity of the sun. Finally, the work presents the electrical, mechanical and control design of the tracker system so that it can contribute to further developments or improvements to maximize its efficiency.

**Key words:** Solar panel; Solar Tracker; PLC; LDR; energy efficiency; renewable energy.

## Resumo

Neste trabalho é realizado o projeto e construção de um protótipo de rastreador de luz solar, que consiste em um painel solar de 50W acoplado a um suporte com dois eixos móveis comandados por dois motores DC cujo movimento é definido pela entrada dos sensores resistivos. foto baseada em quatro quadrantes para detectar a maior intensidade de luz solar, que posteriormente através do algoritmo de controle implementado em um controlador programável Delta DVP 20EX2; capaz de aumentar a eficiência no sistema de geração fotovoltaica e armazenar energia em uma bateria de 50Ah para que posteriormente o usuário possa conectar cargas de corrente alternada à saída do inversor de 1KW. O presente projeto demonstrou uma melhoria na eficiência do tempo de carregamento da bateria de 20% em relação ao painel solar estático convencional, além disso, pode fornecer duas horas de uso contínuo com uma carga constante de 200W. Por outro lado, o sistema de rastreamento tem uma resposta de 20 segundos a qualquer mudança na direção ou intensidade do sol. Por fim, o trabalho apresenta o projeto elétrico, mecânico e de controle do sistema seguidor para que possa contribuir para posteriores desenvolvimentos ou melhorias que permitam maximizar sua eficiência.

**Palavras-chave:** Painel solar; Rastreador Solar; PLC; LDR; eficiência energética; energia renovável.

## Introducción

Los problemas de consumo de energía hoy en día son de carácter global y preocupa a las autoridades, el rápido incremento en el consumo energético se puede observar de manera más específica en países en desarrollo (Usova & Velkin, 2018). El abastecimiento de combustibles fósiles ha disminuido a una tasa sin precedentes, mientras que se ha tenido un incremento del consumo de energía y de manufactura que han desencadenado una dependencia excesiva en combustibles fósiles (Resch et al., 2008), adicionalmente a esto se suma el daño a la naturaleza y el cambio climático que desencadena el uso de energías convencionales.

Se estima que para 2030 se requiera entre 600-800 EJ (Exajoules) y en 2050 la demanda de energía del mundo entero podría estar en el rango de 800-1000 EJ si se asume un crecimiento a la par de

la economía global (Moriarty & Honnery, 2012), estos autores inclusive sugieren que para poder abastecer dicha demanda, se deberían tener una combinación de combustibles fósiles, energías renovables y energía nuclear, pero que sin embargo, el énfasis actual en combustibles fósiles debería cambiar y no deberían dominar la provisión de energía futura.

El sector eléctrico de potencia no contribuye al cambio climático, sino que también es muy vulnerable a cambios en el clima, por ejemplo, en el caso de China, la industria de generación eléctrica es una de las generadoras principales de dióxido de carbono del país (Hardin, 2015). Es por esta razón que la tecnología emergente se enfoca en la generación de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, una de estas es el uso de paneles solares. El cambio a fuentes de energía es la clave para un crecimiento sustentable para todos los países, inclusive fuentes de energía como solares, del viento e hidroeléctricas pueden ser fuentes principales de energía en el futuro (Hashim, 2021), esta transición requiere de inversión y de cuidado en la adaptación del país. La capacidad instalada de paneles fotovoltaicos y de aerogeneradores ha incrementado muy rápida en varios países, gracias a políticas que apoyan el uso de nuevas fuentes de energía y a la disminución en el costo de tecnologías que permiten su implementación (IEA, 2017). Entre 2005 y 2012 la capacidad global instalada de paneles solares fotovoltaicos incrementó de 4.5 GW a 65 GW (Aanesen et al., 2012), de igual manera, es una de las energías renovables con mayor crecimiento. La energía solar y su tecnología están expandiéndose por muchas fronteras, alcanzando lugares que muchas veces llegan a ser muy remotos para el alcance del suministro de energía eléctrica convencional. El desarrollo de sistemas de energía renovable permite el aprovechamiento de fuentes de energía no convencionales para su posterior implementación a un costo accesible para su rápida penetración en el mercado actual.

Con el fin de poder cumplir con el objetivo de un sistema fotovoltaico que permite aprovechar la energía solar de forma eficiente, que con el uso de equipos específicos que permitan convertirla en energía eléctrica, e inclusive almacenarla para un uso posterior y continuo, se requiere un sistema automático que permita hacer un seguimiento de la luz solar con el fin de colocar el panel solar lo más perpendicular posible al sol.

Es por esta razón que el desarrollo del presente proyecto tiene como objetivo mejorar la eficiencia de la producción de energía fotovoltaica mediante el posicionamiento adecuado de los paneles solares con respecto al sol, por lo que se desarrollará un sistema de control que mediante la medición de la intensidad de luz generará movimiento y desplazamiento en dos ejes con el fin de

que el sistema pueda captar la mayor cantidad de luz solar y así obtener una fuente de energía renovable eficiente, adicionalmente, se obtendrán y analizarán los parámetros eléctricos para la validación del prototipo.

Las energías convencionales para la generación de electricidad han demostrado que han sido muy efectivas en el progreso económico, pero al mismo tiempo que tienen un daño al medio ambiente y a la salud humana. El potencial de fuentes de energías renovables es enorme puesto a la demanda actual de energía eléctrica, la transición a sistemas de energía basados en fuentes renovables está muy al alcance debido al bajo costo de sistemas solares en la actualidad (Herzog et al., 2001).

### **Tecnologías fotovoltaicas solares y tecnologías termo-solares**

El sol es una fuente infinita de energía debido a la intensidad de reacciones nucleares que ocurren en su centro y corona. Por la gran masa con la que cuenta, se puede asegurar que su tiempo de vida es “inmortal” comparado con el tiempo de vida del hombre sobre el planeta tierra. Una gran parte de esta energía llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética llamada comúnmente energía solar, la cual está formada básicamente por luz y calor.

La disponibilidad de esta energía depende de la ubicación geográfica del lugar de su implementación, y la potencia de la radiación solar instantánea recibida. La radiación que recibe un colector en una superficie determinada se llama irradiancia y se mide en  $W / m^2$ .

Existen dos tipos de categorías de tecnologías que convierten la luz del sol en formas de energías útiles.

#### **Sistemas Fotovoltaicos**

Los módulos solares fotovoltaicos son dispositivos semi conductores de estado sólido que no tienen partes móviles que convierten la luz del sol en electricidad de corriente directa, el principio básico de operación de los paneles o módulos data de hace 150 años, sin embargo, el desarrollo realmente empieza siguiendo el invento de Bell Labs para la celda solar de silicón en 1954. La primera mayor aplicación de tecnología fotovoltaica fue realizada en satélites a finales de 1950 (Herzog et al., 2001).

#### **Sistemas Termo-solares**

Estos sistemas usan varias técnicas para concentrar la luz del sol para calentar un fluido intermedio, conocido como el fluido de transferencia que luego es usado para generar vapor. El vapor posteriormente es usado en una turbina de vapor para generar electricidad. Actualmente existen tres tipos de sistemas de potencia en desarrollo: canales parabólicos, torres de poder, sistemas de

plato-motor. Debido a que estas tecnologías usan un intermediario térmico, pueden ser hibridadas con combustibles fósiles y en algunos casos adaptadas para el almacenamiento de calor. La ventaja principal de este tipo de sistemas híbridos es que permiten disponer de energía eléctrica aún cuando no se cuente con energía solar (Herzog et al., 2001).

### **Efecto fotovoltaico**

El fenómeno de conversión de energía solar en energía eléctrica es llamado efecto fotovoltaico. Cuando se ioniza la radiación es absorbida, una fuerza electromotriz es generada, los paneles solares son usados para transformar energía de la luz solar en electricidad (Sharma & Tayal, 2018).

### **Trayectoria solar**

Aparte de las condiciones atmosféricas hay otro parámetro que afecta radicalmente a la incidencia de la radiación sobre un captador solar, este es el movimiento aparente del sol en todo el día y todo el año. Se dice "aparente" porque en realidad la Tierra es la que está girando y no el Sol. La tierra tiene dos tipos de movimiento: uno es moverse alrededor de su propio eje, produciendo día y noche; el otro es moverse alrededor de su propio eje. Orbitando el sol a lo largo de una trayectoria elíptica, resultando en las cuatro estaciones del año.

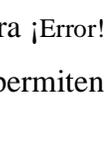
### **Radiación Solar**

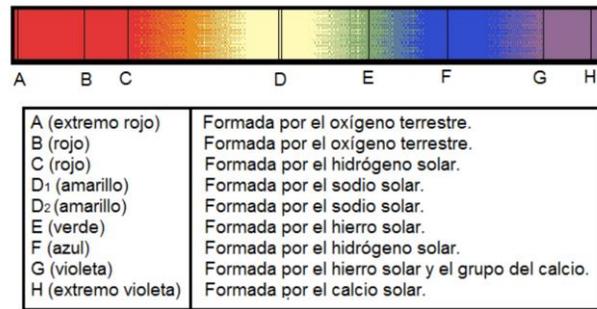
El sol emite energía basándose en la Ley de Planck a una temperatura aproximada de 6000 K, mientras que la radiación se reparte desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, sin embargo, las ondas ultravioletas más cortas son absorbidas por parte de los gases como el ozono, por lo que no toda la radiación impacta con la superficie de la tierra (Arenas & Zapata, 2011).

La distancia Tierra-sol es relativamente fija, el valor de la irradiancia fuera de la atmósfera terrestre es de 1,353 W/m<sup>2</sup>, se llama constante solar (Jaramillo, 1998). La radiación que llega a la superficie terrestre se puede clasificar en directa y difusa

- **Radiación directa.** Es aquella que se recibe en la superficie terrestre sin que haya sufrido ninguno de los procesos antes mencionados al pasar por la atmósfera
- **Radiación Difusa.** Es la que se recibe después de que la luz solar cambió su dirección debido a los procesos de refracción y reflexión que ocurren en la atmósfera.

### **Espectro Solar**

El equipo utilizado para analizar y obtener la radiación solar es un espectrógrafo. La Figura  No hay texto con el estilo especificado en el documento.-1 muestra las líneas de absorción que permiten identificar ciertos elementos existentes en el sol.



**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-1 Espectro Solar

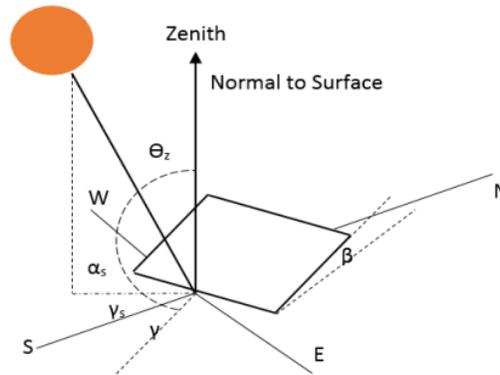
**Fuente:** (Arenas & Zapata, 2011)

### Ángulo de Incidencia

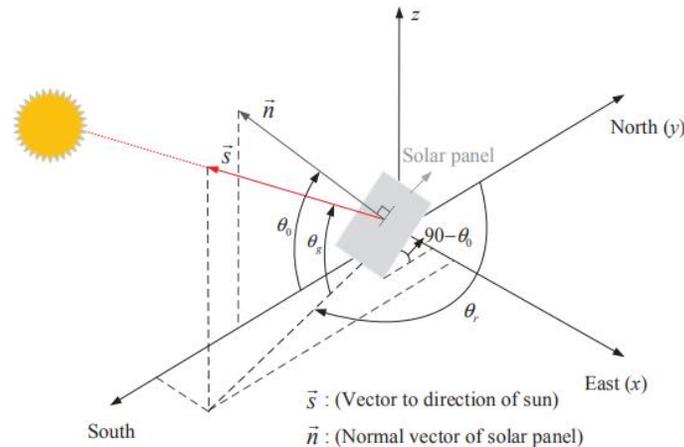
La incidencia solar es la radiación que incide sobre una determinada área en la superficie de la tierra, ciertos factores influyen en la cantidad de radiación, puede ser el movimiento de rotación y traslación, la inclinación del planeta, la latitud, la cobertura de nubes, entre otros (King et al., 1997). El ángulo de incidencia  $\theta$  de una superficie es dependiente del ángulo de hora  $\omega$ , el ángulo de azimuth  $\gamma$ , latitud  $\varphi$ , inclinación  $\beta$  y el ángulo de declinación  $\delta$  como se muestra en la Figura 1-2 y se lo expresa mediante la Ecuación 1.1. Con el fin de capturar la mayor radiación solar en la locación, el ángulo de incidencia de la superficie debe ser  $0^\circ$  a toda hora durante el día, para alcanzar ese estado, el ángulo de incidencia es evaluado bajo ciertas condiciones las cuales dan una variación desde la salida del sol hasta la puesta de este (Muthuswamy et al., 2016).

$$\begin{aligned} \cos\theta = \text{sen}\delta \text{ sen}\varphi \cos\beta - \text{sen}\delta \cos\varphi \text{ sen}\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\varphi \cos\beta \cos\omega \\ + \cos\delta \text{ sen}\varphi \text{ sen}\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \text{ sen}\beta \text{ sen}\gamma \text{ sen}\omega \end{aligned} \quad (1-1)$$

Cabe recalcar que el ángulo Zenith es el ángulo entre el sol y la vertical, es similar al ángulo de elevación, pero es medido desde el vertical y no desde la horizontal.



**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-2 Representación gráfica de los ángulos que intervienen en la incidencia solar  
**Fuente:** (Muthuswamy et al., 2016)



**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-3 Representación gráfica de los ángulos de incidencia solar  
**Fuente:** (Choi et al., 2017)

Los Autores (King et al., 1997) establecen un método para el cálculo del ángulo de incidencia dado por la siguiente ecuación:

$$AOI = \cos^{-1}[\cos(Tm) \cos(Zs) + \sin(Tm) \sin(Zs) \cos(AZs - AZm)] \quad (1-2)$$

Dónde:

$AOI$  = Ángulo de incidencia solar

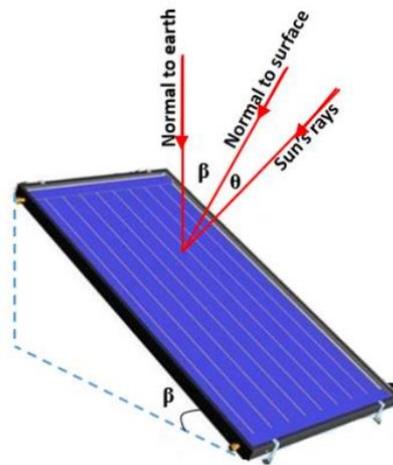
$Tm$  = Ángulo de inclinación del módulo

$Zs$  = Ángulo Zenith del sol

$Azm = \text{Ángulo Azimuth del módulo}$

$AZs = \text{Ángulo Azimuth del sol}$

De acuerdo con los autores (Elnaggar et al., 2020), el ángulo de inclinación y el de incidencia son cruciales para maximizar la energía útil obtenida en el panel solar y que el ángulo de inclinación óptimo varía para diferentes meses o inclusive diferentes estaciones del año. De igual manera, el ángulo de incidencia es casi estable en todas las estaciones, sin embargo, su valor debe ser pequeño, por lo general en el rango de  $10^\circ$  a  $12^\circ$  para obtener la energía máxima, sus resultados muestran que el ángulo de inclinación óptimo es de  $39.57^\circ$ ,  $26.72^\circ$ ,  $20.15^\circ$  y  $32.2^\circ$ .



**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento. -4 Panel Solar y sus ángulos de interés para una máxima potencia

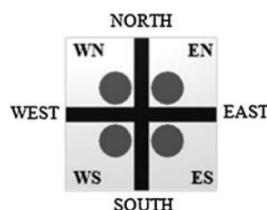
**Fuente:** (Elnaggar et al., 2020)

## Seguidor solar

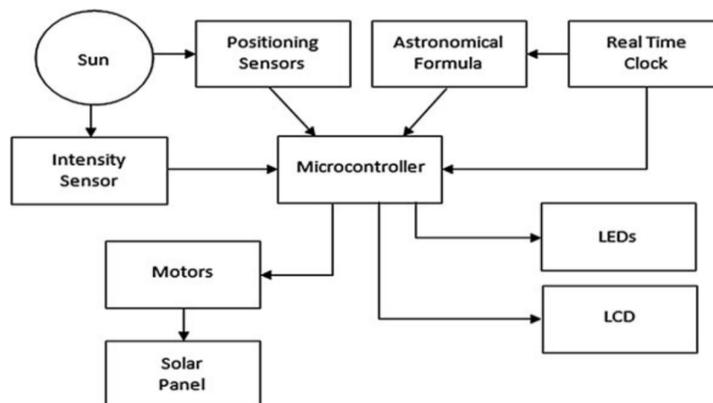
Los seguidores solares nacen de la necesidad de aprovechar al máximo la radiación solar, el panel solar fotovoltaico debe estar perpendicular a la radiación. Generalmente, existen dos tipos fundamentales de sistemas para seguimiento solar, el primero es el de eje simple y el segundo el de dos ejes, siendo el último mucho más eficiente, debido a que es capaz de mantener óptimamente la superficie del panel solar con el fin de recibir la mayor energía posible del sol (Abu Hanieh, 2010).

Los tipos de controladores implementados en los seguidores solares pueden ser a lazo abierto a lazo cerrado, ambos métodos de seguimiento tienen sus limitantes.

La Figura 1-6 muestra el diagrama de bloques de un sistema de seguidor y la Figura 1-5 la forma en la que se montaron los sensores o los LDR (Resistor dependiente de luz por sus siglas en inglés) en el cual la intensidad de la luz y la resistencia están inversamente relacionadas, cuando la intensidad de la luz es la máxima, la resistencia es muy baja y viceversa (Sharma & Tayal, 2018), de esta forma se puede determinar la posición de la fuente de energía solar para ejecutar las acciones de control pertinente.



**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-5 Arreglo de LDRs en los cuatro cuadrantes  
**Fuente:** (Abu Hanieh, 2010)



**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-6 Diagrama de bloques del sistema seguidor de luz solar  
**Fuente:** (Abu Hanieh, 2010)

### Diseño mecánico-eléctrico de seguidores solares

La mayor parte de los seguidores se distinguen por el número de grados de libertad que disponen para un seguimiento más óptimo.

- **Grados de Libertad**

El grado de libertad es la cantidad de entradas independientes requeridas para tomar una posición exacta los eslabones de un mecanismo con respecto a su base o al suelo (Myszka, 2012). Otros autores definen a los grados de libertad como el número necesario de actuadores para poder mover el mecanismo, el autor (Myszka, 2012) define la siguiente ecuación de Gruebler para el cálculo de los grados de libertad existentes en un mecanismo.

$$M = 3(n - 1) - 2j_p - 2j_h \quad (1-3)$$

Donde:

$M = \text{Grados de libertad}$

$n = \text{Número total de eslabones en el mecanismo}$

$j_p = \text{Número total de uniones principales (pernos, correderas)}$

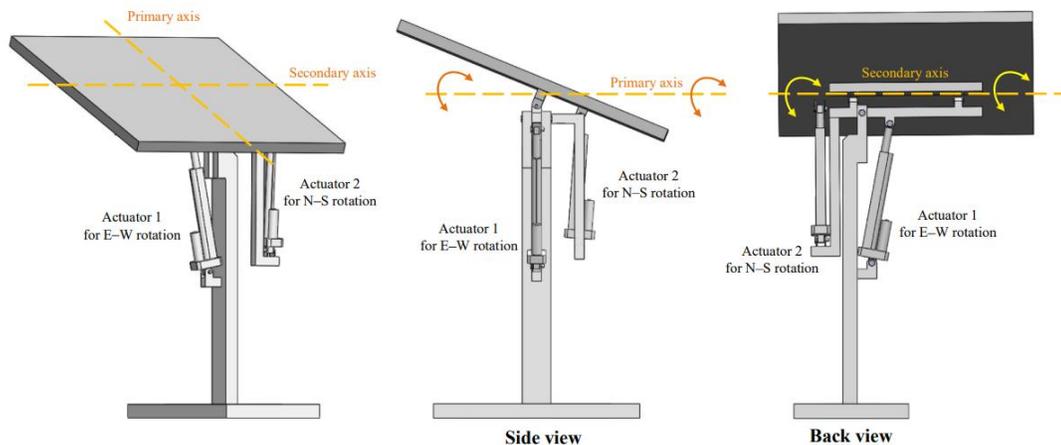
$j_h = \text{Número total de uniones de orden superior (levas o engranes)}$

Los autores (Sharma & Tayal, 2018) proponen un diseño mecánico para un seguidor solar de un solo eje con un grado de libertad como se muestra en la Figura 1-4. Se propone un diseño donde los LDR y los fotodiodos están montados en la parte superior de la plataforma con el fin de captar la mayor cantidad de luz solar, cuando el sensor detecta la mayor cantidad de luz la resistencia del fotodiodo se hace muy pequeña lo que hace que el motor pare a la posición con mayor intensidad de luz. Cuando el fotodiodo no detecta luz, la plataforma gira nuevamente buscando la posición con mayor luz.

Por otro lado, los autores (Jamroen et al., 2021) presentan un diseño con dos grados de libertad, con actuadores de desplazamiento lineal que permiten al seguidor orientarse en dos ejes a la mayor intensidad de luz posible como se muestra en la Figura 8, misma que muestra diferentes perspectivas del mismo seguidor propuesto por los autores.



**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-7 Ensamblaje mecánico de un seguidor solar  
**Fuente:** (Sharma & Tayal, 2018)



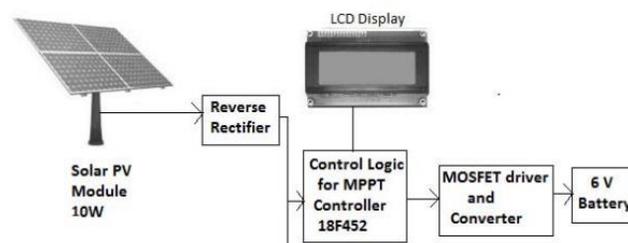
**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-8 Estructura propuesta de un sistema de seguimiento solar desde diferentes perspectivas  
**Fuente:** (Jamroen et al., 2021)

### Composición de un sistema de energía solar

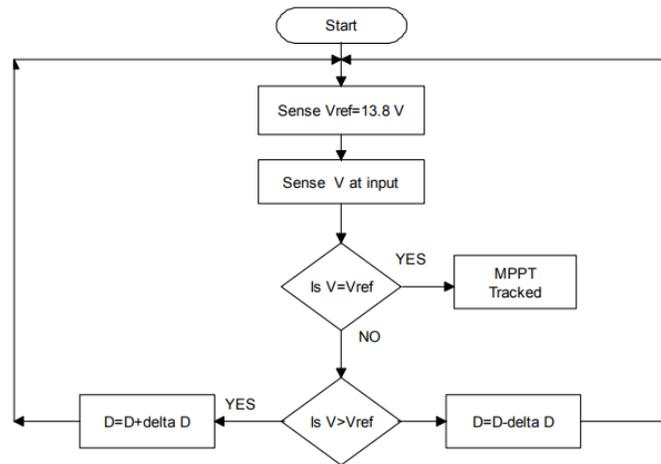
Con el fin de asegurar el funcionamiento adecuado de un sistema de energía solar usando paneles solares, se deben agrupar ciertos elementos para asegurar un correcto funcionamiento.

Un sistema de energía solar consiste de tres etapas, la de generación de potencia, la del convertidor o controlador y la etapa de salida.

Para la etapa del controlador, se destinan controladores MPPT (Maximum power point tracking por sus siglas en inglés), este controlador usa un algoritmo y circuitería interna con el fin de incrementar la eficiencia del panel solar proveyendo voltaje constante a la batería para su posterior uso (Vasant & Pawar, 2018), la Figura 1-7 muestra el diagrama de flujo para el método de voltaje constante.



**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-9 Diagrama de bloques de un sistema de energía solar  
**Fuente:** (Vasant & Pawar, 2018)



**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-10 Diagrama de Flujo para el método de voltaje constante  
**Fuente:** (Vasant & Pawar, 2018)

## Resultados

### Planos de control

Los planos fueron realizados en AutoCAD Electrical y se los muestran en la Figura 2-23. Se contemplan protecciones eléctricas por un disyuntor principal de un polo y fusibles para líneas de voltaje DC con el fin de salvaguardar la integridad del suministro de energía y proteger a los equipos.

El sistema dispone de un switch principal que corta el paso de energía hacia los demás elementos de control y por ende apaga o enciende en su totalidad el tablero de control.

El diseño considera de igual manera luces piloto para cada estado del actuador lineal, de color rojo para estado de reposo y color verde para movimiento del mismo.

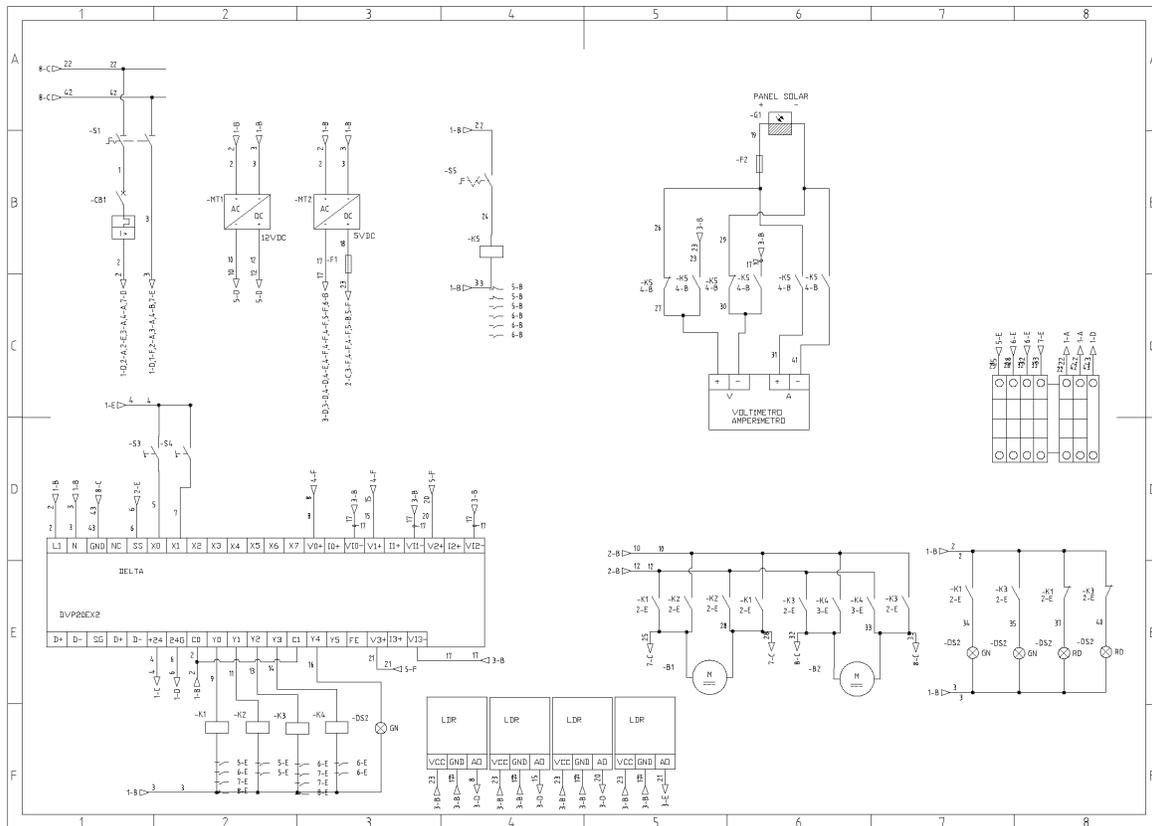


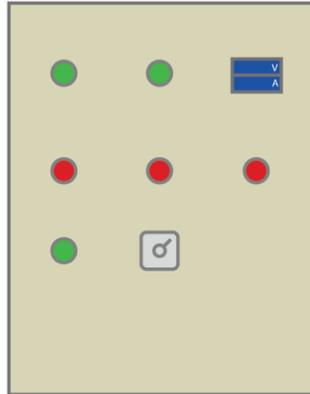
Figura ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-11 Planos eléctricos de control

### Tablero de Control

El diseño del tablero de control parte con el dimensionamiento y selección de elementos y componentes internos que permitirán reflejar los planos de control de la mejor manera y simplificarán el cableado del mismo. El tamaño del gabinete seleccionado es de 60x40x20cm con el fin de que albergue todos los elementos necesarios. Se presenta en la Tabla 2-5 la lista de materiales a usarse en el ensamblaje del tablero de control y en la Figura 2-24 la distribución de la puerta del tablero.

**Tabla 1** Lista de materiales del tablero de control

<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Notas</b>
1	Gabinete Metálico 60x40x20cm	Gabinete para albergar los elementos
1	Disyuntor 1P 8A	Disyuntor principal de corte
2	Portafusibles 10x38mm 1P	Porta fusibles para protección de fuentes
1	Fusible 8A	Fusible para fuente 12VDC
1	Fusible 2A	Fusible para fuente 5VDC
1	Fuente 5VDC montaje riel din	Fuente para LDR
1	Fuente 12VDC montaje sobrepuesto	Fuente para actuadores lineales
1	PLC Delta DVPEX2	Controlador lógico programable
<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Notas</b>
4	Relés 11 pines redondos 110VAC	Relés para control de giro de motor DC
1	Relé 14 pines redondos 110VAC	Relé para conmutación de amperímetro-voltímetro
2	Borne para riel 4mm	Borneras para conexión de acometida
25	Borne para riel 2.5mm	Borneras de conexiones
1	Puente equipotencial 2.5mm	Puente equipotencial para líneas comunes
100	Punteras huecas 2.5mm	Ferrules para cables de conexión
50	Cable 18awg	Cable para control
1	Marquillas 0-9	Marquillas para etiquetado de cables
4	Prensaestopas PG21	Prensaestopas para salida de cables
1	Switch ON-OFF	Switch de encendido general
1	Selector 2 posiciones	Selector de encendido de relé de conmutación mediciones eléctricas
3	Luces piloto 22mm color verde	Luces indicadoras de estado de actuadores y del sistema
2	Luces piloto 22mm color rojo	Luces indicadoras de estado de actuadores
8	Bases adhesivas 20mm	Bases adhesivas para sujeción de cables
1	Cinta espiral	Cinta para sujetar cables



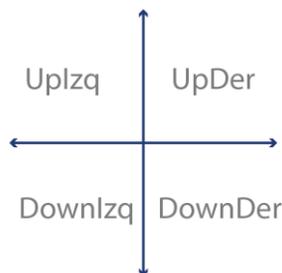
**Figura** ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-12 Puerta del tablero de control

### Diseño del sistema de control

El sistema de control se basa en los cuatro sensores de luz tipo LDR que se dispone y se los va nombrar de la manera mostrada en la Tabla 2-7 y en la Figura 2-26.

**Tabla** ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-2 Nombres de los sensores LD

<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>
<b>UpIzq</b>	Sensor superior – izquierda
<b>UpDer</b>	Sensor superior – derecha
<b>DownIzq</b>	Sensor inferior – izquierda
<b>DownDer</b>	Sensor inferior - derecha



**Figura** ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-13 Coordenadas y nombres de los sensores LDR

Una vez nombrados los sensores, se procede nombrar los actuadores para referirse a cada uno de ellos y comprender el sentido de giro de ambos.

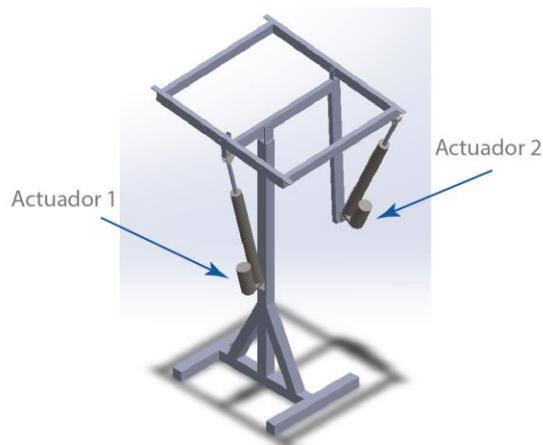
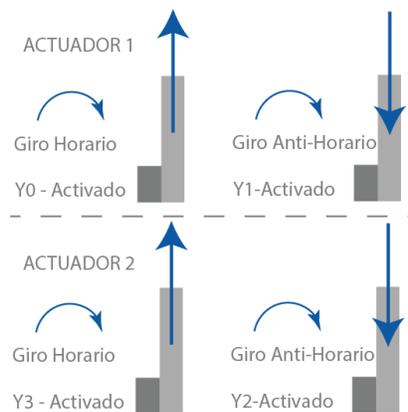


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-14 Nombre de los actuadores lineales

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-3 Detalle del movimiento de los actuadores

	<b>Giro</b>	<b>Efecto en el actuador</b>	<b>Acción</b>	<b>Ubicación del Fin de Carrera</b>	<b>Salida del PLC</b>
<b>Actuador 1</b>	Sentido horario	Elonga vástago	el Eleva el panel solar hasta el fin de carrera	Externo – X1 del PLC	Y0
	Sentido anti-horario	Retrae vástago	el Baja el panel solar hasta fin de carrera	Interno del actuador	Y1
<b>Actuador 2</b>	Sentido horario	Elonga vástago	el Eleva el panel solar hasta el fin de carrera	Externo – X0 del PLC	Y3
	Sentido anti-horario	Retrae vástago	el Baja el panel solar hasta fin de carrera	Interno del actuador	Y2

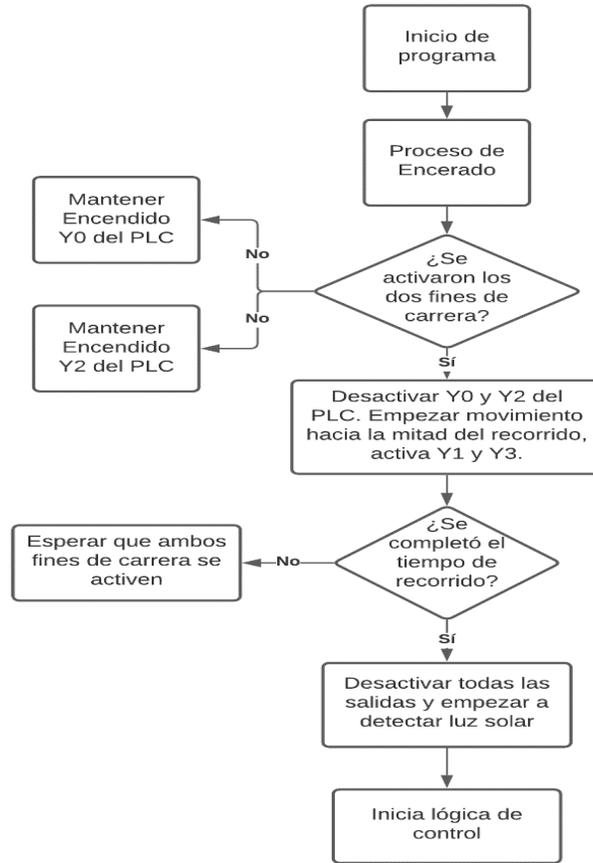


**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-15 Comportamiento de los actuadores lineales

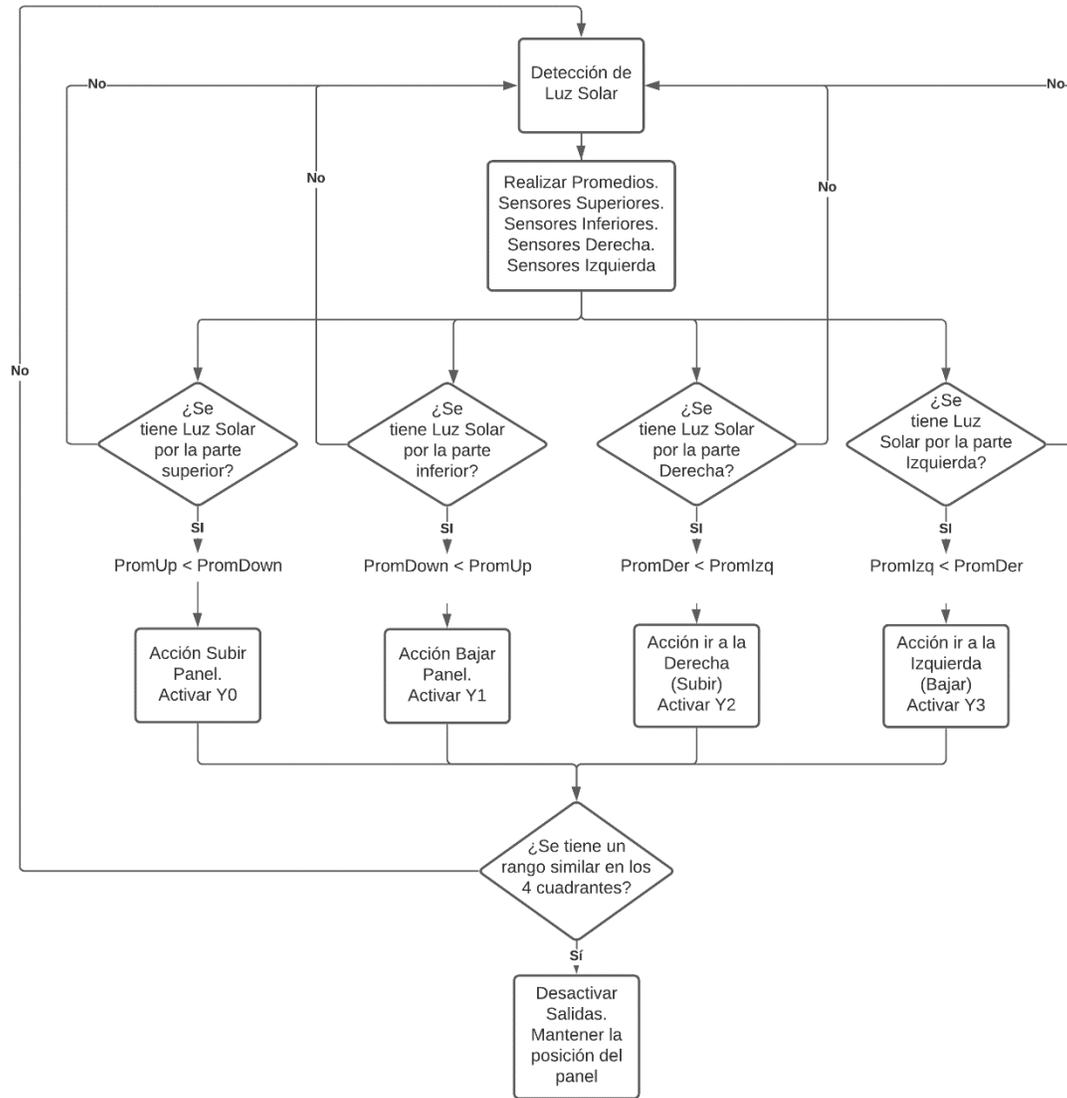
### Diagramas de flujo

Cada vez que se enciende el sistema, se realiza una secuencia de “0” máquina, donde el seguidor se mueve hasta una posición inicial para poder tener una clara medición de luz solar en cualquiera de sus cuatro sensores, primero se envía el seguidor solar hacia su posición máxima permitida por los fines de carrera externos y luego de un tiempo se estabiliza en la posición de un panel solar común sin seguimiento. El diagrama de flujo de este “0” máquina se lo encuentra en la Figura 2-29.

Una vez que el sistema finaliza su proceso de encendido, se empieza la lógica de control para la detección de la presencia de luz solar en cualquiera de los 4 cuadrantes y realizar el seguimiento de la misma hasta que los cuatro cuadrantes mantengan un mismo ángulo de incidencia de la luz solar y por ende estos tengan un bajo voltaje a su salida analógica, dicho voltaje deberá ser igual o semejante para detectar que los cuatro cuadrantes aprovechan la luz solar. Este diagrama de flujo se lo presenta en la Figura 2-30.



**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-16 Diagrama de flujo de inicio de programa y encerado del sistema

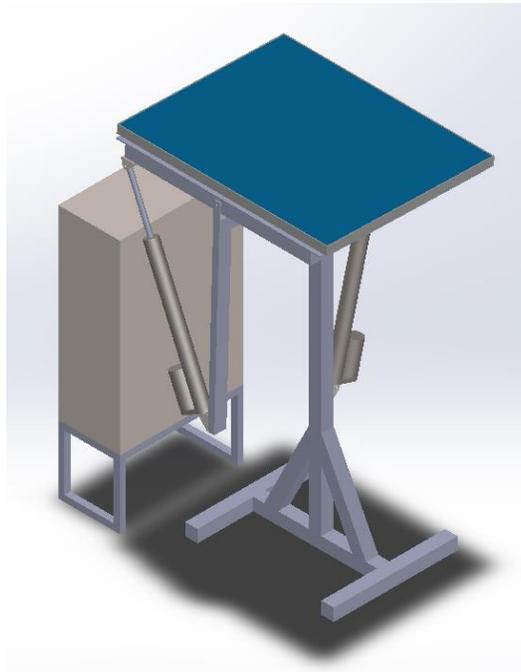


**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-17 Diagrama de flujo de la lógica de control del seguidor solar

### Integración del sistema

Los resultados de los dominios específicos son integrados en un sistema global con el fin de analizar las interrelaciones (Gausemeier & Moehring, 2002).

Se procede a realizar la integración y construcción del sistema en base a los diseños específicos. Se parte desde la simulación en SolidWorks del sistema integral como se muestra en la Figura 2-40 donde se encuentra el panel solar con el tablero de control y su estructura.

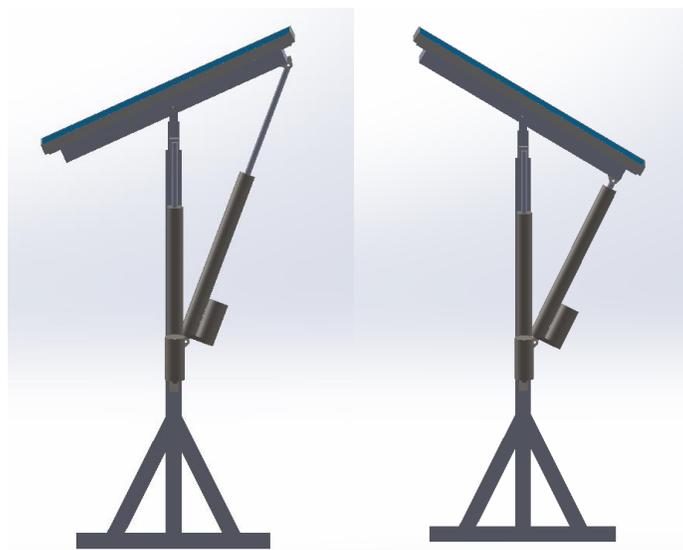


**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-18 Diseño integral en software CAD

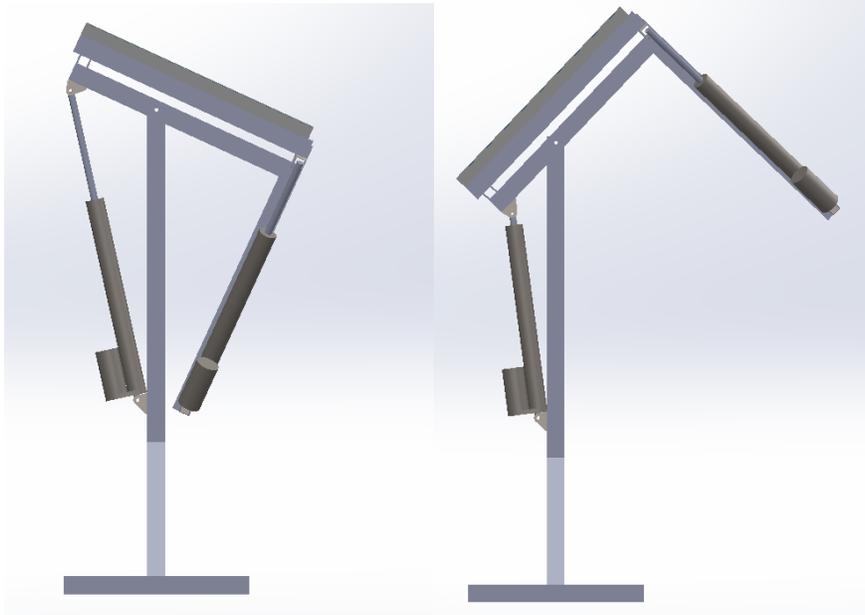
### **Modelamiento y análisis**

El modelado y análisis es trascendental para analizar las características del sistema con la ayuda de modelos y software de diseño por computadora (Gausemeier & Moehringer, 2002).

El modelamiento y el análisis de la movilidad del sistema fueron realizados en Solidworks donde se obtuvieron los rangos de movilidad del sistema como se observa en las Figuras 2-41 y 2-42.

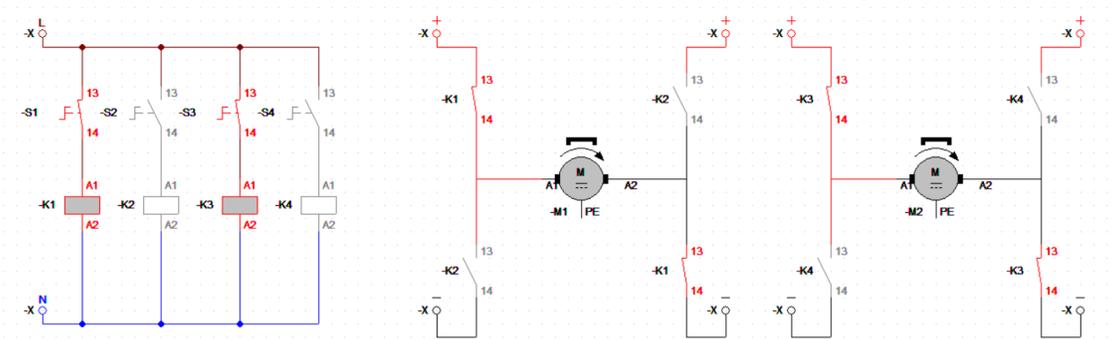


**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-19 Simulación del rango de movimiento del Actuador 2

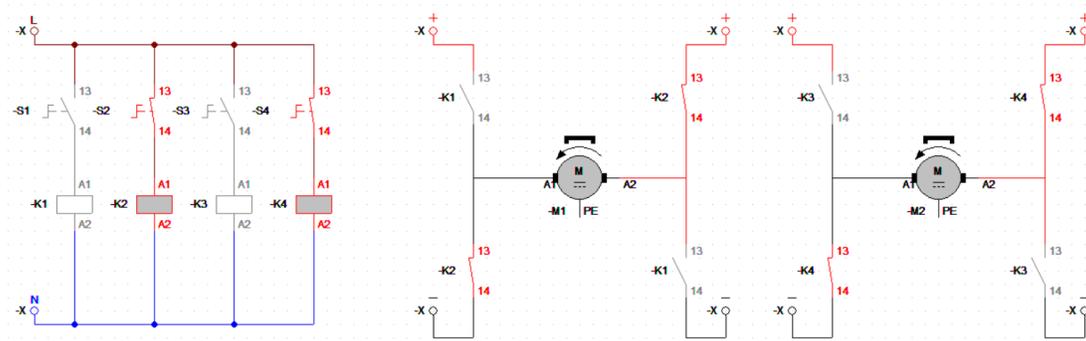


**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-20 Simulación del rango de movimiento del Actuador 1

La simulación del control del motor de los actuadores lineales con el uso de un puente H comandado por contactos auxiliares de relé, se la realizó en Cade-Simu, un simulador de sistemas y diagramas electromecánicos, donde se dispone de contactores, relés, motores, sistemas de mando y control, entre otros. Se presenta en la figura 2-43 la simulación del sentido horario de ambos motores con la activación de los selectores S1 y S3 que reemplazan la salida tipo relé del PLC. En la Figura 2-44, por otro lado, se presenta el sentido antihorario de ambos motores con la activación de los selectores S2 y S4.

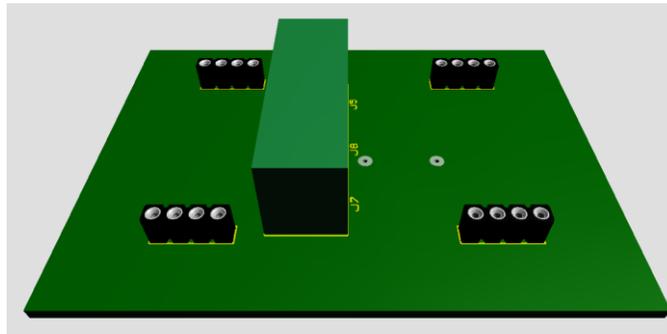


**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-21 Simulación del movimiento del motor en sentido horario en CadeSimu

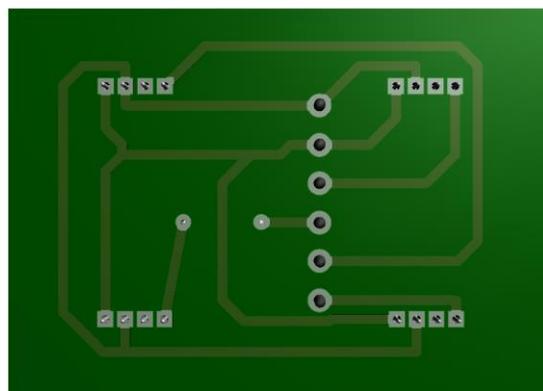


**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-22 Simulación del movimiento del motor en sentido antihorario en CadeSimu

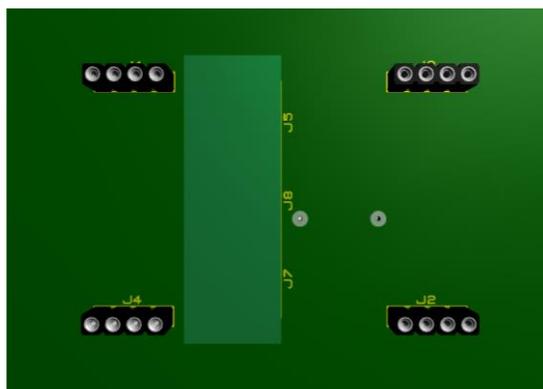
La conexión de los sensores LDR requieren la integración de los mismos sobre una placa electrónica que fue diseñada en Proteus y cuya visión 3D del software se presenta en la Figura 2-45.



**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-23 Vista frontal de la placa electrónica



**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-24 Vista inferior de la placa electrónica



**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-25 Vista superior de la placa electrónica

## Resultados del sistema

Se realiza un análisis al detalle del sistema para validar su funcionamiento y verificar el estado del mismo, tanto en la parte mecánica como en la parte electrónica. La primera prueba parte desde una medición de los parámetros eléctricos del sistema y posteriormente de los parámetros eléctricos del panel solar en cada una de sus posiciones conforme se mueve el sol en el transcurso de un día soleado tanto en el sistema del seguidor como en el panel solar que está en la estructura fija.

**Tabla** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-4 Parámetros eléctricos del tablero de control

Parámetro	Valor	Descripción
<b>Voltaje L-N</b>	112V	Voltaje de entrada en borneras
<b>Corriente Suministro</b>	4A	Corriente de consumo con todos los elementos encendidos
<b>Voltaje 5V</b>	5.08V	Voltaje a la salida de la fuente de 5VDC
<b>Voltaje 12V</b>	12.21V	Voltaje a la salida de la fuente de 12VDC



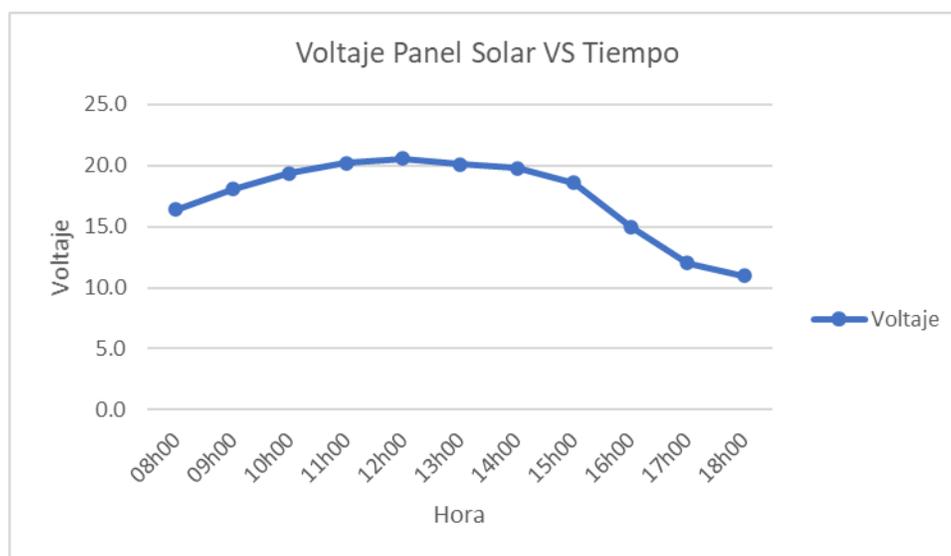
**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-26 Posición del seguidor solar a las 8h00



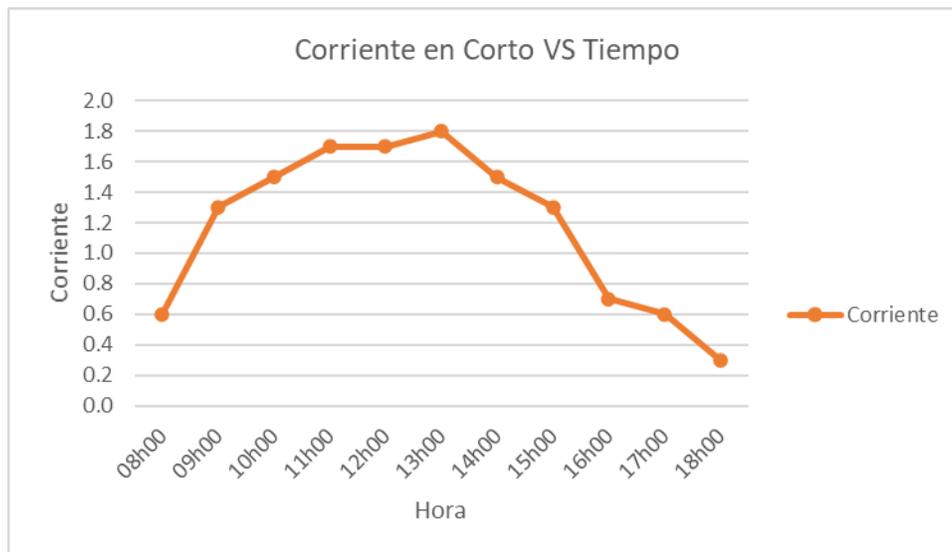
**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-27 Posición del seguidor solar a las 15h00

**Tabla 5** Parámetros eléctricos del panel solar fijo

Parámetro	Hora	Valor	Unidad	
<b>Voltaje</b>	08h00	16.4	V	
	09h00	18.1	V	
	10h00	19.4	V	
	11h00	20.2	V	
	12h00	20.6	V	
	13h00	20.1	V	
	14h00	19.8	V	
	15h00	18.6	V	
	16h00	15.0	V	
	17h00	12.0	V	
	18h00	11.0	V	
	<b>Corriente</b>	08h00	0.6	A
		09h00	1.3	A
10h00		1.5	A	
11h00		1.7	A	
12h00		1.7	A	
13h00		1.8	A	
14h00		1.5	A	
15h00		1.3	A	
16h00		0.7	A	
17h00		0.6	A	
18h00	0.3	A		



**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-28 Gráfico de Voltaje VS Tiempo de panel solar fijo



**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-29 Gráfico de Corriente VS Tiempo de panel solar fijo

**Tabla** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-6 Parámetros eléctricos del panel solar móvil

Parámetro	Hora	Valor	Unidad
<b>Voltaje</b>	08h00	17.2	V
	09h00	20.2	V
	10h00	21.4	V
	11h00	21.7	V
	12h00	22.3	V
	13h00	22.2	V
	14h00	21.5	V
	15h00	20.6	V
	16h00	19.8	V
	17h00	16.5	V
<b>Corriente</b>	18h00	14.3	V
	08h00	0.9	A
	09h00	1.5	A
	10h00	1.9	A
	11h00	2.1	A
	12h00	2.5	A
	13h00	2.3	A
14h00	2.1	A	

15h00	1.7	A
16h00	1.4	A
17h00	1.2	A
18h00	0.6	A

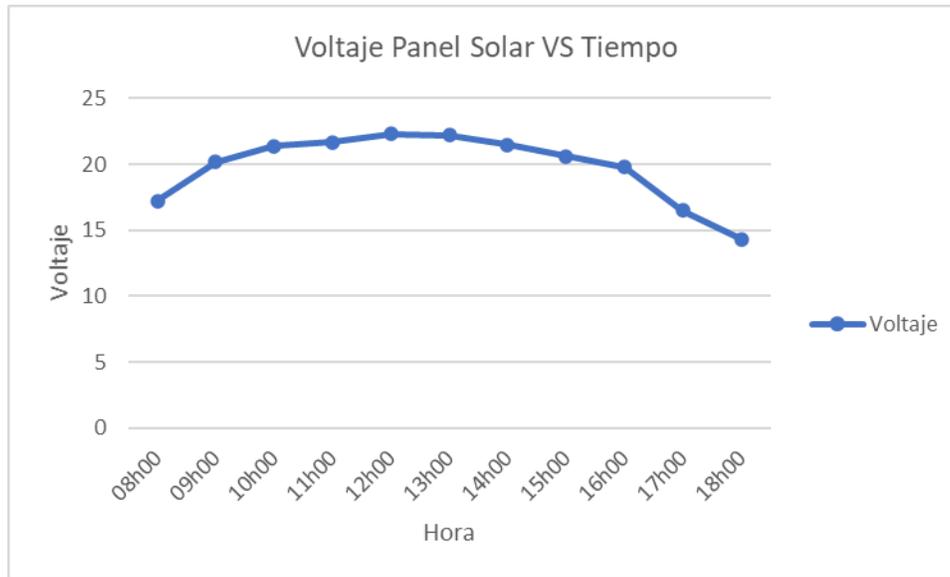


Figura 30 Gráfico de Voltaje VS Tiempo de panel solar móvil



Figura 31 Gráfico de Corriente VS Tiempo de panel solar móvil

**Tabla 7** Parámetros eléctricos del panel solar móvil vs fijo

Parámetro	Panel Solar Móvil		Panel Solar Fijo		Eficiencia de panel solar móvil vs fijo
	Hora	Valor	Valor	Unidad	
<b>Voltaje</b>	08h00	17.2	16.4	V	4,88%
	09h00	20.2	18.1	V	11,60%
	10h00	21.4	19.4	V	10,31%
	11h00	21.7	20.2	V	7,43%
	12h00	22.3	20.6	V	4,88%
	13h00	22.2	20.1	V	
	14h00	21.5	19.8	V	
	15h00	20.6	18.6	V	
	16h00	19.8	15.0	V	
	17h00	16.5	12.0	V	
<b>Corriente</b>	18h00	14.3	11.0	V	
	08h00	0.9	0.6	A	
	09h00	1.5	1.3	A	
	10h00	1.9	1.5	A	
	11h00	2.1	1.7	A	
	12h00	2.5	1.7	A	
	13h00	2.3	1.8	A	
	14h00	2.1	1.5	A	
	15h00	1.7	1.3	A	
	16h00	1.4	0.7	A	
17h00	1.2	0.6	A		
18h00	0.6	0.3	A		

## Discusión

El sistema de seguidor solar desempeña de manera más eficiente la obtención de energía, gracias a que permite tener una mayor intensidad e incidencia de luz solar sobre la superficie del panel, lo que entrega mayor voltaje y mayor corriente, permitiendo trabajar en el punto de máxima potencia y por ende una carga más rápida de las baterías que posteriormente administrarán de energía al sistema inversor.

El costo de un sistema solar móvil en comparación con un sistema fijo representa un gasto adicional a lo convencional, sin embargo, es aplicable cuando se disponen varios paneles solares de baja

potencia o paneles individuales de alta potencia, debido a que se implementaría solo un grupo de sensores, los costos de actuadores y tablero de control sería mucho más bajo.

## Conclusiones

El uso de un controlador lógico programable con entradas analógicas para el control de un seguidor solar permite adicionar un mayor grado de robustez al sistema y una programación a conveniencia de la instalación y de la cantidad de actuadores a usarse.

Los actuadores implementados permitirían el manejo de paneles solares de hasta 400W en estructuras similares, pero con soportes de mayor tamaño al presentado en este proyecto, inclusive con el mismo de tablero de control, sin adicionar más protecciones eléctricas, por lo que lo desarrollado en este proyecto es escalable para cualquier tipo de instalación fotovoltaica.

## Agradecimientos

Se extiende un agradecimiento a los estudiantes del Instituto Superior Pedagógico Martha Bucaram de Roldós Bilingüe Intercultural que han dado su tiempo y dedicación para involucrarse en el aprendizaje con el presente proyecto a las autoridades del Instituto por apoyar e incentivar los procesos de aprendizaje inmersos en la investigación.

## Referencias

1. Aanesen, K., Heck, S., & Pinner, D. (2012). *Solar power : Darkest before dawn Solar power : Darkest before dawn*. May, 1–16.
2. Abu Hanieh, A. (2010). *Solar photovoltaic panels tracking system*. 30–37.
3. Alam, M. J. E., Yan, R., & Saha, T. K. (2015). *Desirable Control Features of Battery Energy Storage Systems for Commercial Scale Solar PV Plants*. 3, 5–8.
4. Arenas, D. A., & Zapata, H. S. (2011). Libro interactivo sobre energía solar y sus aplicaciones. In *Facultad de Tecnología* (Vol. 64).
5. Arshad, R., Tariq, S., Niaz, M. U., & Jamil, M. (2014). Improvement in solar panel efficiency using solar concentration by simple mirrors and by cooling. *2014 International Conference on Robotics and Emerging Allied Technologies in Engineering, ICREATE 2014 - Proceedings*, 292–295. <https://doi.org/10.1109/iCREATE.2014.6828382>
6. Automation Direct. (2014). *PLC Handbook*.

7. Bliesener, R., Ebel, F., Löffler, C., Plagemann, B., Regber, H., Terzi, E.V., & Winter, A. (2002). *Programmable Logic Controllers Basic Level B-II*. 40–43.
8. Choi, J. S., Kim, J. H., & Rim, C. T. (2017). Incidence solar power analysis of PV panels with curved reflectors. *2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, COMPEL 2017*. <https://doi.org/10.1109/COMPEL.2017.8013320>
9. Días, T., & Carmona, G. (24 C.E.). Componentes de una instalación solar fotovoltaica. *2010*.
10. Elnaggar, M., El-Khozondar, H. J., Edwan, E., Mutlaq, R. K. A., Harb, A., & Ali Awad, A. (2020). Optimizing solar-thermal collector's angles to enhance useful energy gain. *Proceedings - 2020 International Conference on Promising Electronic Technologies, ICPET 2020*, 112–116. <https://doi.org/10.1109/ICPET51420.2020.00030>
11. Gausemeier, J., & Moehringer, S. (2002). VDI 2206- A New Guideline for the Design of Mechatronic Systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 35(2), 785–790. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)34035-1](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)34035-1)
12. Hardin, R. (2015). Collective action. *Collective Action*, october, 1–248. <https://doi.org/10.4324/9781315044330>
13. Hashim, I. J. (2021). A New Renewable Energy Index. *2021 6th International Conference on Renewable Energy: Generation and Applications, ICREGA 2021*, 229–232. <https://doi.org/10.1109/ICREGA50506.2021.9388297>
14. Herzog, A. v, Lipman, T. E., & Kammen, D. M. (2001). Renewable energy sources: A variable choice. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 8–20.
15. Hughes, A., & Drury, B. (2013). Electric Motors and Drives. In *Electric Motors and Drives*. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07555-5>
16. IEA. (2017). Getting wind and sun onto the grid - a manual for policy makers. *International Energy Agency*, 64. [http://www.iea.org/publications/insights/insightpublications/Getting\\_Wind\\_and\\_Sun.pdf?utm\\_content=buffer1ab55&utm\\_medium=social&utm\\_source=twitter.com&utm\\_campaign=buffer](http://www.iea.org/publications/insights/insightpublications/Getting_Wind_and_Sun.pdf?utm_content=buffer1ab55&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer)
17. Jamroen, C., Fongkerd, C., Krongpha, W., Komkum, P., Pirayawaraporn, A., & Chindakham, N. (2021). A novel UV sensor-based dual-axis solar tracking system:

- Implementation and performance analysis. *Applied Energy*, 299(June), 117295. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117295>
18. Jaramillo, O. A. (1998). *TRANSPORTE DE ENERGIA SOLAR CONCENTRADA A TRAVES DE FIBRAS OPTICAS: ACOPLAMIENTO FIBRA-CONCENTRADOR Y ESTUDIO TERMICO*. 1–61.
19. King, D. L., Kratochvil, J. A., & Boyson, W. E. (1997). Measuring solar spectral and angle-of-incidence effects on photovoltaic modules and solar irradiance sensors. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1113–1116. <https://doi.org/10.1109/pvsc.1997.654283>
20. Lombard, M. (2013). Introducing SolidWorks. *SolidWorks® 2011 Parts Bible*, 1–35. <https://doi.org/10.1002/9781118257753.ch1>
21. Mohebbi, A., Achiche, S., & Baron, L. (2019). Integrated and concurrent detailed design of a mechatronic quadrotor system using a fuzzy-based particle swarm optimization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 82(May 2018), 192–206. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.03.025>
22. Moriarty, P., & Honnery, D. (2012). What is the global potential for renewable energy? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 244–252. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.151>
23. Muthuswamy, N., Kochhar, K., & Kumar, A. (2016). Optimization of incidence angle for augmented performance of solar collector: A case study for Vellore. *2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, ICEETS 2016*, 722–726. <https://doi.org/10.1109/ICEETS.2016.7583844>
24. Myszka, D. H. (2012). *Máquinas y Mecanismos*. PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
25. Ogata, K. (2013). *Ingeniería de Control Moderna*. PEARSON EDUCACIÓN, S.A. [www.pearsoneducacion.com](http://www.pearsoneducacion.com)
26. Ogata, K. (2017). Modern control engineering. In *Modern Control Engineering*. <https://doi.org/10.1201/9781315214573>
27. Perez, M., Perez, A., & Perez, E. (2008). Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo. “*Introducción a Los Sistemas De Control Y Modelo Matemático Para Sistemas Lineales Invariantes En El Tiempo.*,” 1–69.

28. Poveda, L. T., & Martínez, J. D. (2016). *Diseño e implementación de un Control Óptimo LQR con la tarjeta Raspberry Pi* (p. 104).
29. Resch, G., Held, A., Faber, T., Panzer, C., Toro, F., & Haas, R. (2008). Potentials and prospects for renewable energies at global scale. *Energy Policy*, 36(11), 4048–4056. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.06.029>
30. Sharma, V., & Tayal, V. K. (2018). Hardware implementation of sun tracking Solar panel using 8051 micro-controller. *2017 6th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization: Trends and Future Directions, ICRITO 2017, 2018-Janua*, 483–486. <https://doi.org/10.1109/ICRITO.2017.8342475>
31. Singh, S., & Mitra, R. (2014). Comparative analysis of robustness of optimally offline tuned PID controller and Fuzzy supervised PID controller. *2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences, RAECS 2014*, 6–8. <https://doi.org/10.1109/RAECS.2014.6799546>
32. Tickoo, S., Pandita, S., & Cadcim Technologies. (2010). *AutoCAD Electrical 2010 for Engineers*.
33. Usova, M., & Velkin, V. (2018). *Possibility to Use Renewable Energy Sources for Increasing the Reliability of the Responsible Energy Consumers on the Enterprise*. 2–5.
34. Vasant, L. G., & Pawar, V. R. (2018). Optimization of solar-wind energy system power for battery charging using MPPT. *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing, ICECDS 2017*, 1308–1310. <https://doi.org/10.1109/ICECDS.2017.8389656>
35. Wcislik, M., & Laskawski, M. S. (2017). Correction of the on-off control system using PLC. *Proceedings of the 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2017*, 4. <https://doi.org/10.1109/EPE.2017.7967306>

©2022 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).