



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE REFLECTOR SOLAR CON ESPEJOS  
MÓVILES, PARA PANELES SOLARES**

**Robert Darío Acevedo Ibáñez**

**José Luis Ospina Angarita**

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Tunja, Colombia  
2020

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE REFLECTOR SOLAR CON ESPEJOS  
MÓVILES, PARA PANELES SOLARES**

**Robert Darío Acevedo Ibáñez**

**José Luis Ospina Angarita**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Ingeniero Mecánico**

Director (a):

Doctor Carlos Ramón Batista Rodríguez

Línea de Investigación:

Desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de fuentes de Energía  
Renovable

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2020

*La ciencia puede divertirnos y fascinarnos, pero es la ingeniería la que cambia el mundo.*

*Isaac Asímov (escritor y científico estadounidense)*

## **Agradecimientos**

En retribución a nuestros padres, por habernos brindado la confianza y el apoyo requerido para este proceso de formación profesional.

Un especial agradecimiento a la Universidad Antonio Nariño, por poner a nuestra disposición las herramientas, dispositivos y espacios de trabajo necesarios para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto.

A nuestro director de tesis, Doctor Carlos Ramón Batista Rodríguez, por sus conocimientos, tiempo empleado y paciencia.

---

## Resumen

La generación eléctrica a partir de módulos fotovoltaicos montados sobre seguidores solares no es técnico-económicamente barata. Debido a esto, se construyen grandes campos de paneles fotovoltaicos alineados, manteniendo un ángulo de inclinación calculado en correspondencia con la latitud geográfica del lugar. Para mejorar dicha situación, el problema a resolver en esta investigación es desarrollar un dispositivo que permita mejorar la eficiencia de los módulos fotovoltaicos con menor costo y mayor facilidad de implementación y uso. El objetivo del trabajo consistió en: desarrollar el sistema mecánico de un reflector solar con movimiento zenital para paneles solares. Para lograrlo, se diseñó un prototipo de reflector solar con espejos planos móviles. Se construyó el dispositivo, se instaló en la azotea de la sede Tunja de la Universidad Antonio Nariño, sobre el sistema se montó un panel solar y se realizaron las pruebas de funcionamiento. Inicialmente se realizaron ensayos del conjunto de elementos del módulo, que consta de un panel solar, un regulador y una batería. Posteriormente se ejecutaron los ensayos del propio módulo con uso del sistema reflector. Con la realización de esta investigación se llegó a la conclusión de que es posible y factible desarrollar un reflector solar que mejore la eficiencia del funcionamiento de los módulos fotovoltaicos. Sin embargo, para una evaluación más objetiva de la utilidad práctica del sistema reflector debe aumentarse la cantidad de ensayos y mejorar su precisión, algo imposible en las condiciones actuales. Se recomienda realizar algunas modificaciones al diseño original y repetir las pruebas para corroborar estos resultados.

**Palabras clave:** eficiencia energética, energías limpias, panel solar.

## **Abstract**

Electricity generation from photovoltaic modules on solar trackers is not technically-economically cheap. Due to this, large fields of photovoltaic panels are built aligned, maintaining an angle of inclination calculated in correspondence with the geographical latitude of the place. In order to improve this situation in this research, the problem to be solved is to develop a device that allows improving the efficiency of photovoltaic modules with lower costs and ease of use. The objective of this work consisted of: developing the mechanical system of a solar reflector with azimuth movement for solar panels. To achieve the same, a prototype of a solar reflector with movable flat mirrors for solar panels was designed. The device was built, installed on the roof of the Tunja headquarters of the Antonio Nariño University, a solar panel was ensambled on the system and its operation tests were carried out. Initially, tests were carried out on the operation of the set of elements of the module, which consists of a solar panel, a regulator, and a battery, later the tests of the module itself were carried out but with the use of the reflector system. That the carrying out of this research reached the following conclusions: it is possible and feasible to develop a solar reflector that improves the efficiency of the operation of photovoltaic modules, however, due to the haste of time, the number of tests and their precision are They can be improved to make a more objective assessment of the practical utility of the reflector system. It is recommended to make some modifications to the original design and to repeat the tests to confirm its usefulness.

**Keywords:** energy efficiency, clean energy, solar panel.

---

**Contenido**

	<b>Pág.</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>V</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>IIX</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>11</b>
<b>1. Capítulo 1</b> .....	<b>5</b>
1.1 Radiación solar .....	5
1.1.1 Ecuaciones fundamentales de la radiación solar .....	8
1.2 Seguidores solares .....	99
1.3 Concentradores solares.....	122
1.3.1 Heliostatos y reflectores solares.....	17
1.4 Módulos fotovoltaicos .....	18
1.5 Estado del arte .....	222
<b>2. Capítulo 2. Diseño de un reflector solar para módulos fotovoltaicos</b> .....	<b>244</b>
2.1 Requerimientos.....	244
2.2 Diseño conceptual .....	254
2.3 Diseño en detalles del reflector solar .....	29
2.4 Materiales y costos del reflector solar .....	35
<b>3. Construcción y ensayos del reflector solar</b> .....	<b>37</b>
3.1 Metodología para la construcción del reflector solar .....	37
3.1.1 Estructura para el panel solar.....	38
3.1.2 Estructura tipo soporte para los reflectores .....	38
3.1.3 Ensamble funcional .....	39
3.2 Ensayos realizados.....	399
3.2.1 Ensayos realizados al módulo fotovoltaico sin reflector .....	422
3.2.2 Ensayos realizados al módulo fotovoltaico con el reflector .....	444
3.3 Resultados de los ensayos .....	455
3.4 Conclusiones sobre los ensayos.....	47
<b>4. Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>48</b>
4.1 Conclusiones .....	488
4.2 Recomendaciones .....	49
<b>A. Anexo:</b> .....	<b>500</b>
<b>B. Anexo:</b> .....	<b>622</b>
<b>C. Anexo:</b> .....	<b>680</b>
<b>Fichero con los datos del albedometro</b> .....	<b>680</b>
<b>Bibliografía:</b> .....	<b>72</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1.1:</b> Eje de rotación de eje único y eje doble. ....	12
<b>Figura 1.2:</b> Concentrador solar parabólico construido en Egipto 1912. ....	14
<b>Figura 1.3:</b> Concentrador solar parabólico construido en 1988 en Egipto. ....	14
<b>Figura 1.4:</b> Lentes Fresnel que forman un concentrador lineal. ....	15
<b>Figura 1.5:</b> Disco parabólico concentrador con sus diferentes partes. ....	16
<b>Figura 1.6:</b> Torre central con helióstatos. ....	16
<b>Figura 1.7:</b> Componentes de un panel solar. ....	20
<b>Figura 1.8:</b> Curvas de funcionamiento de módulos fotovoltaicos. ....	21
<b>Figura 2.9:</b> Estructura soporte (100) del reflector solar. ....	26
<b>Figura 2.10:</b> Sistema de movimiento (200) del reflector solar. ....	26
<b>Figura 2.11:</b> Sistema Reflector (300). ....	27
<b>Figura 2.12:</b> Reflector solar con espejos móviles y módulos fotovoltaicos. ....	28
<b>Figura 2.13:</b> Sistema reflector en posición inicial de trabajo. ....	29
<b>Figura 2.14:</b> Angulo de posicionamiento para el sistema reflector solar en horario de la mañana.....	30
<b>Figura 2.15:</b> Angulo de posicionamiento para el sistema reflector solar en horario de la tarde. ....	32
<b>Figura 3.16:</b> Albedómetro. ....	40
<b>Figura 3.17:</b> Conexión Albedómetro-datalogger. ....	40
<b>Figura 3.18:</b> Conexión de todos los elementos. ....	41
<b>Figura 3.19:</b> Descargador de baterías. ....	42
<b>Figura 3.20:</b> Posicionamiento del panel solar. ....	42
<b>Figura 3.21:</b> Descarga de batería. ....	43
<b>Figura 3.22:</b> Reflector solar con Espejos Móviles. ....	44
<b>Figura 3.23:</b> Graduación de inclinación específica del reflector. ....	45

**Lista de tablas**

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 2.1:</b> Cálculo del ángulo de rotación $\alpha$ . .....	32
<b>Tabla 2.2:</b> Diferencia entre el ángulo de incidencia de un panel fijo y otro con el reflector solar. ....	34
<b>Tabla 2.3:</b> Información de los materiales empleados. ....	36
<b>Tabla 2.4:</b> Ensayos realizados. ....	46

## Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
I			
A	Corriente	Ampere	Cap. 1.4
C	Velocidad de la luz	$\frac{\text{Km}}{\text{s}}$	Cap. 1.1
C	Relación de concentración	1	Cap. 1.3
E	Irradiancia solar	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	
M	Unidad de medida	Metros	Cap. 2.4
m <sup>2</sup>	Unidad de área	m <sup>2</sup>	Cap. 1.1
M	Masa del aire	m <sup>2</sup>	Cap. 1.1.1
V	Voltage	Volts	Cap. 1.4
°C	Temperatura	Celsius	Cap. 1.4
R	Angulo de rotacion	Grados	Cap 2.3
S	Energia	Joules	Cap. 2.3
m	Unidad de medida	metros	Cap. 2.4
<i>Watt</i>	Potencia	$\frac{\text{J}}{\text{s}}$	Cap. 1.1
Símbolo	Término	Unidad SUK	Definición
“	Unidad de medida	Inch	Cap. 2.4

**Símbolos con letras griegas**

<b>Símbolo</b>	<b>Término</b>	<b>Unidad SI</b>
$\theta_z$	Angulo zenital	Grados.
$\gamma_s$	Angulo azimutal	Grados.
$\cos \theta$	Angulo de incidencia	Grados.
$\Omega$	Angulo horario	Grados.
$\delta$	declinación	Grados.

**Subíndice Término**

ID	Irradiancia directa.
IDN	Irradiancia normal directa.
$G_{on}$	Irradiancia normal sobre superficie en la atmosfera.



## Introducción

Para generar energías limpias, ya resulta común encontrar dispositivos como seguidores y paneles solares, buscando siempre mejorar su eficiencia. Un panel solar es un dispositivo que aprovecha la radiación producida por el Sol para generar energía. Requieren que la luz solar incida de forma correcta para que funcionen adecuadamente. Hay que tener en cuenta que días lluviosos y distintas condiciones climáticas provocan que no puedan funcionar a la capacidad deseada, lo que disminuye su eficiencia. Para tratar de solventar tal problema, se busca que el panel tenga una inclinación con un ángulo específico, de manera que pueda captar mejor la radiación del sol (Swaan, 2019), sin que resulte aprovechable a toda hora del día. Otra solución son los seguidores solares para seguir la trayectoria de este, pero presentan algunas desventajas (Machado et al., 2014), como imprecisión, pérdidas de energía y altos costos.

Los helióstatos son dispositivos que cuentan con un conjunto de espejos, utilizados para reflejar los rayos solares y hacer que incidan en su superficie para llevarlos a un concentrador. Es conocido un tipo particular de sistemas solares, llamado torre central, que se forman con helióstatos (LEDESMA et al., 2016), encargados de reflejar los rayos solares hacia la parte superior de la torre para concentrar la energía captada. Presentan el inconveniente de que resulta compleja la instalación de los espejos, al intentar distribuirlos de tal manera que reflejen de forma óptima al concentrador.

A partir del estado del arte conocido actualmente sobre estos tres elementos: módulos fotovoltaicos, seguidores y reflectores solares, es que se propone el desarrollo de este trabajo de grado.

## JUSTIFICACIÓN

El uso de paneles solares es una alternativa de generar energía eléctrica. Este trabajo se basa en la proyección o estudios previos por diversas fuentes de medición solar en el mundo (*Global solar atlas*, 2020), brindando una asesoría previa a la realización de este dispositivo.

¿Por qué desarrollar un reflector solar?

Este proyecto está pensado debido a que los índices de contaminación en el planeta van en aumento, generando impactos negativos en el ecosistema y provocando diversas enfermedades (Vargas, 2005). Todo esto incide negativamente en la esperanza y calidad de vida de las personas, incluso antes de haber nacido. Por esto, desde hace muchos años se busca implementar nuevas formas de producir energías limpias y efectivas para ayudar a combatir el deterioro del medio ambiente y lograr una mejora para toda la sociedad.

Por otra parte, no toda la población tiene acceso a energía eléctrica, principalmente en zonas rurales en donde no se cuenta con la infraestructura necesaria para la generación o distribución de electricidad por los métodos convencionales. Esto influye desfavorablemente en la calidad de vida de sus habitantes, en muchos casos afecta también la productividad de las labores que ejecutan.

¿Para qué desarrollar un reflector solar?

Se planea aprovechar de una mejor manera las ondas electromagnéticas producidas por la radiación solar. Por medio de espejos acoplados a una estructura mecánica móvil, adaptada a un panel solar, se captarán los rayos de luz, mediante la reflexión producida por los espejos se hará que lleguen de forma perpendicular a la superficie del panel, con el fin de mejorar su eficiencia.

¿Para quién es aprovechable el reflector solar?

Este dispositivo puede ser utilizado en diferentes partes del mundo, dondequiera que se pueda captar la energía solar sin importar la hora, el día ni la época del año. Permite que llegue y sea accesible a poblaciones en donde no se encuentre disponible la infraestructura necesaria para la distribución de energía eléctrica convencional. Además, contará con un precio relativamente bajo.

## **OBJETIVOS DEL TRABAJO INTEGRAL DE GRADO**

El **objetivo general** de este trabajo es: desarrollar el sistema mecánico de un reflector solar con movimiento acimutal para paneles solares.

Los **objetivos específicos** a alcanzar son:

1. Diseñar el sistema mecánico del reflector solar, el cual consta de una estructura para un panel solar, del soporte de los espejos y el movimiento de los mismos mediante una biela accionada manualmente, sin sistema electrónico de seguimiento y control.
2. Construir el sistema mecánico del reflector solar que contenga todos los elementos necesarios para este proyecto y que pueda generar el movimiento de los espejos para el seguimiento de la trayectoria del Sol.
3. Realizar las pruebas del funcionamiento mecánico del reflector solar.

## **ALCANCE**

El presente proyecto proporcionará un reflector solar mecánico, con el que se espera obtener una eficiencia mayor respecto a los dispositivos comerciales convencionales de energía solar. Puede ser útil según la ubicación geográfica (T & G, s. f.), y puede ser aprovechada de una mejor manera en ciertas partes del país (como La Guajira, los llanos orientales y Boyacá) y en diferentes partes del mundo (*NREL data viewer, 2020*).

## **RESULTADOS ESPERADOS**

Al finalizar el proyecto, se espera contar con un reflector solar de un desempeño tal que tenga una mayor eficiencia respecto a otros dispositivos convencionales de generación de energía solar que ya se encuentran en el mercado.

El dispositivo desarrollado podrá ser útil para generar energía eléctrica en diferentes partes del mundo en donde las condiciones climatológicas lo permitan. A tal efecto, se contará con los planos del diseño del reflector solar y la Memoria con los cálculos que se tuvieron en cuenta para la realización del proyecto

### **UBICACIÓN DENTRO DE LAS LÍNEAS DE TRABAJO DEL PROGRAMA**

Este proyecto se desarrollará sobre la línea de trabajo de energías renovables y diseño mecánico. En la formación de ingenieros en la Universidad Antonio Nariño se incluyen diversas materias que involucran conceptos que se relacionan directamente con el proyecto.

### **USUARIOS DIRECTOS Y FORMAS DE UTILIZACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL PROYECTO**

El reflector solar puede ser de gran interés para empresas en cuyas pautas de trabajo distribuyan productos relacionados con energías y dispositivos solares. También para todo tipo de personas que vean aprovechable este dispositivo.

# 1. Capítulo 1

## 1.1 Radiación solar

En la búsqueda de nuevas fuentes de energías eficientes y amigables con el medio ambiente, la energía solar es una de las más relevantes. Para su correcto uso e implementación es importante conocer un parámetro importante como la radiación solar en una ubicación geográfica específica, ya que esto influye directamente en qué tan eficiente es y qué aprovechamiento útil tendrá. Para realizar un adecuado modelado y diseño de los esquemas necesarios de energía solar térmica y fotovoltaica, es necesario relacionar los datos obtenidos de radiación solar. En un estudio para obtener información sobre parámetros meteorológicos en la amazonia brasilera, realizado por el Laboratorio de sistemas (LASAD) de la universidad de Brasilia (Di Lascio & dos Santos, 1996), se desarrolla la construcción de una estación meteorológica remota, la cual requerirá de un bajo costo de operación y que estará diseñada específicamente para el ecosistema amazónico. Esta estación será autosuficiente, ya que recibirá energía mediante un panel solar. La intención de esa estación es realizar un completo seguimiento a la radiación solar y así poder utilizar dicha información para realizar futuros proyectos relacionados con la energía solar. Se pretende demostrar que la radiación solar es de vital importancia de cara a la implementación y desarrollo de proyectos que requieran de la utilización de la energía solar. La radiación solar se puede definir como la energía emitida por el Sol, la cual se propaga por todas direcciones en el espacio por medio de ondas electromagnéticas. Esta energía es producto de las reacciones del hidrógeno en el núcleo del Sol por fusión nuclear y es emitida por la superficie de este.

La energía solar incide en la Tierra en forma de ondas electromagnéticas o luz. Las ondas electromagnéticas se forman producto de la oscilación de cargas eléctricas y no necesitan de algún material para propagarse, es decir, pueden viajar por el vacío hasta llegar a la tierra. Para determinar la energía y otras características de estas ondas electromagnéticas, es importante conocer su longitud de onda y la frecuencia, así como saber que se propagan a la velocidad de la luz  $C=299,792$  km/s. En muchas disciplinas que requieren del aprovechamiento de este tipo de energía necesitan conocer datos concretos y precisos de la radiación solar en una ubicación específica para el desarrollo de sus equipos técnicos y sus actividades. También, la radiación solar es importante en campos de investigación y estudio como el balance energético atmosférico, climatología y contaminación, análisis de la carga térmica en edificios, sistemas de captación de energía solar y viabilidad económica de los métodos (Jakhrani et al., 2010).

La radiación solar también es un motor que impulsa al medio ambiente, ya que es responsable para la vida de las plantas en su proceso de la fotosíntesis y ayuda a mantener la temperatura media del planeta. Para la obtención de estos datos de radiación solar existen bases de datos de red estacionales, encargadas de medir la radiación solar. Aun así, en algunos países en vía de desarrollo tal información es muy limitada y hay pocas estaciones con los implementos necesarios para la medición de radiación solar en un periodo constante. La forma óptima de obtener estos datos es a través de la medición de la irradiancia, con estos valores obtenidos se puede proceder a la realización de diversos cálculos que ayudan a la correcta utilización y aprovechamiento de la radiación solar, ya que el valor medio y el promedio de la irradiancia obtenido en una ubicación geográfica específica indica qué tan conveniente es implementar tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar.

En lugares en donde no es posible contar con dispositivos para la medición de la irradiancia, se puede recurrir a métodos para obtener buenas aproximaciones de la radiación solar con factores meteorológicos (Jakhrani et al., 2010), como la

---

posición del Sol según la hora del día, las temperaturas máximas y mínimas, la humedad relativa y la cantidad de nubes que obstruyan en la ubicación geográfica. Para poder utilizar estos métodos, se han creado varias correlaciones para estimar la radiación solar en diferentes partes del mundo (Jakhrani et al., 2010).

La radiación solar emitida por la superficie del Sol no llega en la misma cantidad al planeta. Ello se debe a que al ingresar a la atmósfera de la Tierra sufre por tres factores principales que generan pérdidas: la radiación solar es mitigada al ingresar a la atmósfera porque la energía es absorbida, los fotones de luz son dispersados en pequeñas partículas y sufre del fenómeno de reflexión al tratar de incidir en distintos objetos. Es importante tener una buena estimación de la radiación solar en superficies inclinadas para así poder calcular el ángulo de inclinación, por ejemplo, en aplicaciones de paneles solares. Un panel solar recibe la radiación solar en tres formas: radiación de haz, radiación difusa y radiación reflejada. Existen materiales que poseen características que indican niveles de reflectividad o albedo; los materiales con un mayor nivel de albedo poseen propiedades que hacen que tenga mayor reflectividad, ayudando así a mejorar la radiación obtenida. La energía que se genera con paneles solares fotovoltaicos está directamente determinada mediante la cantidad de radiación solar absorbida. La radiación solar por unidad de área es denominada como irradiancia solar, cuya unidad de medición es  $[\frac{W}{m^2}]$ . El valor de irradiancia solar convencional para paneles solares fotovoltaicos comerciales es de  $1000 [\frac{W}{m^2}]$ . Si el ángulo de incidencia es mayor que  $0^\circ$  en la superficie de un panel solar fotovoltaico, la energía que se puede generar es reducida. Existe una relación entre la irradiancia directa y la irradiancia normal directa, establecida mediante la ecuación  $ID = IDN \cos \theta$ , en donde ID es la irradiancia directa, IDN es la irradiancia normal directa y  $\theta$  es el ángulo de incidencia. Mientras más se logre disminuir el ángulo de incidencia, mejor será la irradiancia que se generara por los paneles solares fotovoltaicos.

### 1.1.1 Ecuaciones fundamentales de la radiación solar

En esta sección, las ecuaciones de la radiación solar son tomadas de: (Duffie & Beckman, 2013). La irradiancia normal sobre una superficie en lo alto de la atmósfera para cada día del año se puede calcular por dos expresiones:

$$G_{on} = G_{sc}(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}); \quad (1)$$

$n$  - día consecutivo del año.

$$G_{on} = G_{sc}(1.000110 + 0.034221 \cos \beta + 0.001280 \sin \beta + 0.000719 \cos 2\beta - 0.000077 \sin 2\beta). \quad (2)$$

$$\beta = (n - 1) \frac{360}{365}. \quad (3)$$

$$G_{sc} = 1367 \frac{W}{m^2}. \quad (4)$$

La masa de aire ( $m$ ) es la razón o índice de la masa de aire de la atmósfera a través de la cual pasa la radiación directa respecto a la masa de aire de la atmósfera como si la radiación pasara cuando el sol está en el zenit.

$M=1$  - cuando el sol está en el ZENIT

$M=2$  - cuando  $\theta_Z=60^\circ$

$M=\frac{1}{\cos \theta_Z}$  - cuando  $\theta_Z=0-70^\circ$

La declinación ( $\delta$ )– es la posición angular del Sol cuando esta al mediodía (sobre el meridiano local) respecto al plano del ecuador.

$$\delta = 23.45[2\pi \left(\frac{284+n}{365}\right)] \quad (5)$$

El ángulo horario ( $\omega$ ) es el desplazamiento angular del Sol de este a oeste en el meridiano local, debido a la rotación de la Tierra respecto a su eje y de  $15^\circ$  por cada hora. Por la mañana se considera negativo ( $-15^\circ$ ) o y por la tarde positivo ( $+15^\circ$ ).

$$\omega = (h - 12.00)15^\circ$$

El ángulo zenital ( $\theta_z$ ) es el ángulo que se forma entre el rayo solar y una línea vertical normal a una superficie que define el zenit de la superficie.

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (6)$$

El ángulo azimutal solar ( $\gamma_s$ ) es el desplazamiento angular desde el sur de la proyección de un rayo directo solar en el plano horizontal. El desplazamiento desde el este hasta el sur se considera negativo, y del sur al oeste positivo

$$\gamma_s = \text{Sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left( \frac{\cos \theta_z \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \phi} \right) \right| \quad (7)$$

El ángulo de incidencia ( $\theta$ ) es el ángulo que se forma entre la radiación directa sobre una superficie y la línea normal a dicha superficie

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (8)$$

Para un plano que rota continuamente en los dos ejes y sigue la radiación solar se debe lograr que

$$\beta = \theta_z$$

$$\gamma = \gamma_s$$

$$\cos(\theta) = 1$$

Es decir, el ángulo de inclinación  $\beta$  debe ser igual al ángulo zenital, el ángulo azimutal igual al ángulo azimutal solar y que el coseno del ángulo de incidencia solar sobre el plano sea igual a la unidad.

## 1.2 Seguidores solares

En la actualidad, uno de los principales problemas para el bienestar de la sociedad es el cambio climático, en especial, por la alta dependencia de los combustibles fósiles. Para que la Humanidad no sea tan subordinada de estos

comburentes, se ha invertido para el desarrollo, investigación científica e implementación de nuevas energías limpias renovables. Uno de los campos que más ha tenido relevancia, es el de los sistemas de generación solar fotovoltaica.

En la investigación y aplicación de los sistemas solares fotovoltaicos, la eficiencia de conversión de energía es de los temas con mayor importancia, ya que esta pueda definir cuán efectivo es el sistema según sus costos. Por eso, se están desarrollando varios enfoques para la solución de esta problemática. Uno de esos enfoques está dado por el empleo de sistemas de seguimiento solar, en donde un dispositivo se mueve en la dirección del Sol para capturar la máxima radiación solar directa.

Existen sistemas de seguimiento en un solo eje y de dos ejes (Garcia et al., 2015), utilizados para captar la energía emitida por la radiación solar y hacer una comparación de la eficiencia de conversión de energía con respecto a una instalación de energía solar fotovoltaica fija. Para el desarrollo de esto, se implementa el sistema mecánico planteado, que se basa principalmente de los siguientes elementos:

- Un servomotor, el cual cumple con generar movimiento sobre un eje, el cual abarca un ángulo de  $180^\circ$ .
- Un sensor de siete elementos para la medición y aproximación de la magnitud del ángulo de radiación solar máxima.
- Un sistema de control, empleado para la obtención de la salida de energía óptima de la energía solar fotovoltaica.

Los sistemas fotovoltaicos se emplean para convertir la energía emitida por el Sol en energía eléctrica. Este tipo de energía es bien vista, ya que es segura, confiable, autosustentable y no contribuye al deterioro del medio ambiente. El principio de la utilización de módulos fotovoltaicos es generar en lo posible la mayor cantidad de energía eléctrica a un costo relativamente bajo, es decir, se espera una gran eficiencia en estos módulos fotovoltaicos.

---

Debe tenerse en cuenta que, para obtener la mejor potencia de salida, la matriz fotovoltaica debe recibir la mayor cantidad posible de radiación solar, por lo que la matriz fotovoltaica debe ser posicionada en la dirección más conveniente respecto al Sol. El rendimiento de los sistemas fotovoltaicos se reduce si no cuenta con la orientación y el ángulo de inclinación requeridos, ya que estos factores definen la cantidad de radiación solar recibida en la superficie de un módulo fotovoltaico que se encuentra en una ubicación específica.

Los seguidores solares son paneles solares que se programan para que funcionen de forma automática, siguen la trayectoria del sol para ampliar la potencia de salida del panel solar. Los rastreadores solares se utilizan para diversas aplicaciones que recuerdan a las células solares, los sistemas de iluminación y los paneles solares térmicos. Los sistemas de seguimiento solar son muy útiles gracias a su gran eficiencia acumulada en comparación con un panel fijo sin movimiento de seguimiento solar.

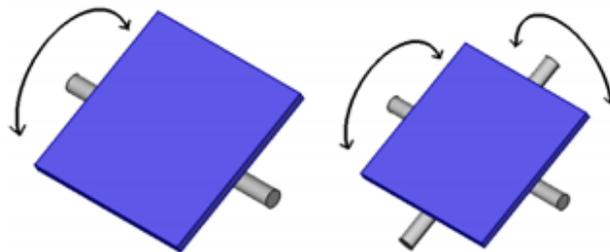
En el ámbito de los sistemas de seguimiento solar, hay dos tipos de clasificaciones principales de acuerdo con los ejes de rotación: eje de rotación simple o eje de rotación doble.

- ✓ El eje de rotación simple utiliza solo un grado de libertad, lo que le permite al panel solar tener movimiento en un solo eje. Los sistemas de rotación simple emplean una forma básica para su funcionamiento, que consta principalmente de un solo motor de accionamiento. Este sistema tiene grandes ventajas: hay poca pérdida de energía porque la fricción generada por el movimiento es insignificante debido a su simplicidad, se puede emplear un mecanismo de control unidimensional simple para accionar sistema. Por otra parte, al hacer el seguimiento del sol, se encuentran restricciones y no puede realizar seguimiento con precisión en regiones con cambios estacionales. Estos sistemas están diseñados para ser utilizados generalmente en condiciones climáticas tropicales, en donde el movimiento del sol se puede representar con movimiento en un solo plano.

- ✓ Diferente al eje de rotación simple, los ejes de doble rotación emplean 2 grados de libertad para seguir la trayectoria del Sol, sin importar la hora del día ni la temporada del año. La potencia de conversión de energía de este sistema mejora, al compararla respecto al sistema anterior de un solo eje, pero estos sistemas requieren de un mecanismo más complejo, el cual debe contar con 2 motores y necesitan un sistema complejo de control bidimensional. Los inconvenientes de este tipo de sistemas con dos ejes es que son más costosos respecto a los sistemas de un solo eje, pero esta configuración de doble eje se ajusta de una manera más deseable a las regiones estacionales, en donde se quiere seguir la trayectoria del sol de una manera más compleja.

En la Figura 1.1 se muestra una vista sobre las configuraciones de eje único y eje doble.

*Figura 1.1: Eje de rotación de eje único y eje doble.*



*Fuente:* (Garcia et al., 2015).

### **1.3 Concentradores solares**

En gran cantidad de aplicaciones para aprovechar la radiación solar es necesario obtener altas temperaturas muy superiores a la temperatura con que llega la radiación solar sobre una superficie convencional absorbidora. Para lograr un

---

incremento de las temperaturas es necesario disminuir el área desde el cual ocurre la pérdida de calor (Duffie & Beckman, 2013).

La superficie concentradora de los rayos solares puede ser: reflectora o refractora y pueden ser superficies de cilindros o en revolución continuas o segmentadas, la que recibe los rayos concentrados y pueden tomar diferentes formas como: convexas, planas o cóncavas y pueden estar cubiertas o descubiertas. Las cubiertas, a su vez, pueden estar al vacío o contener algún tipo de fluido a presión normal. La relación de la concentración de los rayos solares está dada por la relación entre el área de apertura del colector respecto al área de la superficie absorbidora (Duffie & Beckman, 2013).

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (9)$$

La relación de concentración puede ir desde la unidad ( $C=1$ ) hasta valores muy grandes, como  $C=10^5$ . El incremento de la concentración significa el incremento de la temperatura en el área receptora, requiriendo materiales y condiciones especiales. Lo anterior significa que el incremento de concentración con el consecuente incremento de la temperatura aumenta los costos del concentrador solar (Duffie & Beckman, 2013) . Para lograr esas altas temperaturas es necesario que el dispositivo concentrador se mueva buscando que el ángulo de incidencia de la radiación sea el mínimo, es decir, que el coseno del ángulo de incidencia sea igual a 1. En otras palabras, el concentrador debe estar montado sobre un seguidor solar en dos planos.

Las principales aplicaciones de los concentradores solares son para el desarrollo de generadores de vapor presurizados acoplados a generadores eléctricos y para los procesos de desalinizar las aguas en zonas remotas (H. Reif, 2011). Las partes fundamentales de un concentrador solar son: el concentrador primario, el concentrador secundario (para algunas aplicaciones) y el receptor.

### **Concentradores solares parabólicos**

Es una de las primeras tecnologías desarrolladas por el hombre con el objetivo de concentrar la radiación solar, como se puede observar en la Figura 1.2

*Figura 1.2: Concentrador solar parabólico construido en Egipto 1912.*



*Fuente: (Vidriales, 2007).*

De igual forma se puede ver está misma tecnología, pero ya más recientemente como se observa en la Figura 1.3.

*Figura 1.3: Concentrador solar parabólico construido en 1988 en Egipto*

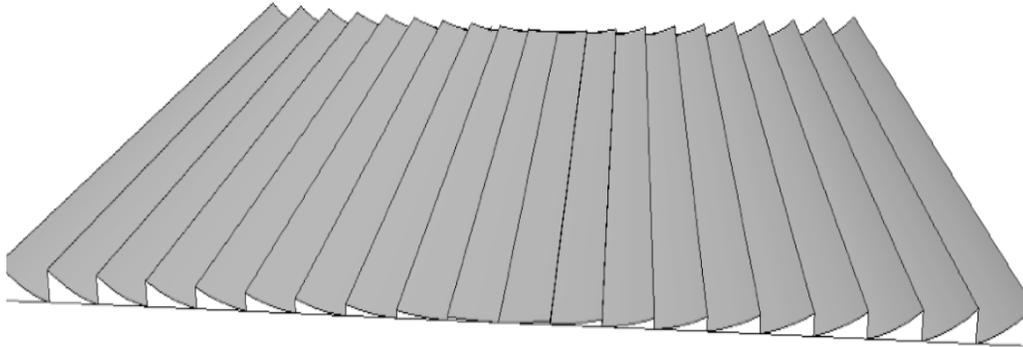


*Fuente: (Vidriales, 2007).*

### **Concentradores de lineal Fresnel**

Son concentradores que toman sus componentes forman una superficie óptica llamadas reflector solar linear Fresnel, donde sus propiedades ópticas son similares a una superficie cóncava de lentes como se muestra en la Figura 1.4.

*Figura 1.4: Lentes Fresnel que forman un concentrador lineal.*

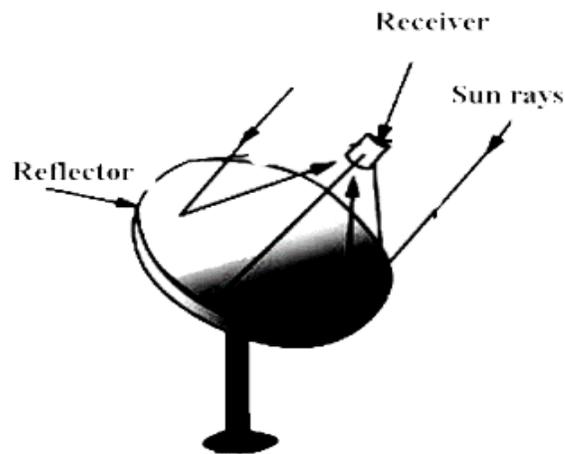


*Fuente: (H. Reif, 2011)*

### **Discos Solares Parabólicos Concentradores**

Es una superficie parabólica en revolución que tiene un punto focal y el cual se instala un receptor que absorbe la energía y la transfiere a diferentes dispositivos, como pueden ser termo generadores, motores Stirling o intercambiadores de calor para aprovechar la energía calórica, ver Figura 1.5.

Figura 1.5: Disco parabólico concentrador con sus diferentes partes.

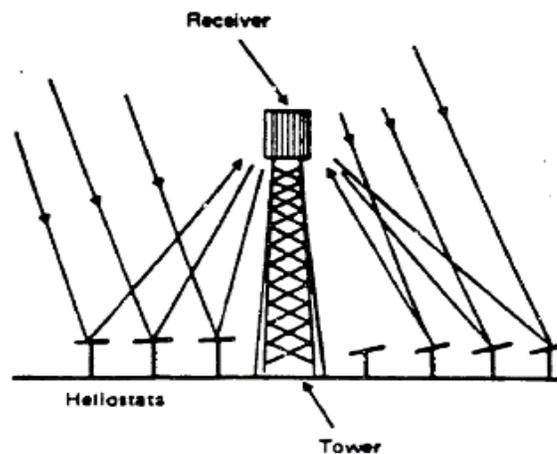


Fuente: (Estrada & Figueredo, 2019).

### Torres receptoras Concentradoras

Consiste en una torre central en la cual se tiene el receptor, alrededor de la torre hay un conjunto de helióstatos que reflejan y concentran los rayos solares en el receptor. En el receptor de la torre se tiene algún caloportador como puede ser sodio líquido o sal fundida, ver Figura 1.6.

Figura 1.6: Torre central con helióstatos.



Fuente: (Estrada & Figueredo, 2019).

### **1.3.1 Heliostatos y reflectores solares**

Los heliostatos son dispositivos que cuentan con un conjunto de espejos que se utilizan para reflejar y hacer que incidan los rayos solares en su superficie para llevarlos a un concentrador.

El seguimiento solar existente en los helióstatos y en sus espejos se da gracias a 2 mecanismos de accionamiento que permiten el movimiento en el azimut y la elevación. Previamente es necesario saber que el par de ejes azimut-elevación son aquellos que definen la posición de un astro en el cielo en un momento dado, y desde una localización determinada (Collado & Joaquin, 2013).

Un primer mecanismo permite el posicionamiento azimutal, es decir, el ángulo que se mide desde el punto cardinal norte sobre el plano de proyección de la superficie terrestre, esto se da gracias a un movimiento rotatorio del helióstato sobre el pedestal sobre el cual está soportado al suelo. Por otra parte, el segundo mecanismo que permite el accionamiento en el ángulo de elevación, por el cual se entiende la distancia angular vertical desde el plano horizontal. Este movimiento es como consecuencia al tubo de torsión en donde se encuentran las vigas transversales como las estructuras de soporte de los espejos (Collado & Joaquin, 2013) siendo el principal objetivo de los helióstatos mantener siempre reflejados los rayos solares al colector solar, una función a cuidar es seguimiento solar. Por ello, el sistema del seguidor solar consta de motores, los cuales controlan el seguimiento primario y secundario del helióstato, reflejando los rayos del Sol a un foco.

La energía solar recogida en el receptor se puede enviar a almacenarse directamente, o bien como fuente de energía renovable (Iriarte, 2013). Por consiguiente, en la actualidad en respuesta a la necesidad de la adquisición de una mayor concentración de radiación solar, asequible de presupuesto y

mejorando la eficiencia constantemente, han aparecido tecnologías que tributan a obtener los resultados esperados.

#### **1.4 Módulos fotovoltaicos**

Los módulos fotovoltaicos permiten gran aprovechamiento de energía eléctrica debido a la fabricación de sus celdas. Se considera que aquellos que rinden y demuestran mayor eficiencia son los elaborados con materiales semiconductores pese a que tienen en su capa externa silicio producen una diferencia de potencial eléctrico entre ambas caras que hace que los electrones salten de un lugar a otro, generando así corriente eléctrica. Frente a esto, un factor determinante que incide en la composición del módulo es la cantidad de células que lo posean.

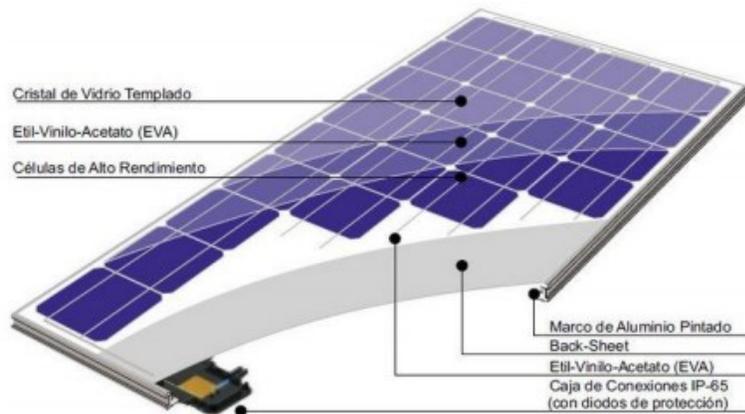
Las células fotovoltaicas son las unidades básicas de los módulos, componentes electrónicos capaces de generar electricidad a partir de energía solar y gracias al efecto fotovoltaico. Descubierta en 1839 por Edmond Becquerel, este fenómeno se basa en el comportamiento de los materiales semiconductores cuando reciben la luz del Sol. Según esto, algunos materiales semiconductores pueden introducir los fotones que emergen del espectro solar al interior de la célula, lo que es fundamental porque en otros casos si el material no es totalmente aislante a bajas temperaturas o viceversa, cuando se encuentra a alta exposición de energía, actuará como elemento conductor, los fotones no entrarán y solamente se reflejarán en la superficie externa de la célula, sin producir corriente eléctrica. En concordancia, si presenta conexiones en serie o en paralelo pueden ofrecer niveles de tensión y corriente deseados. Del mismo modo, influye la extensión de la misma y el tipo de conexión que se realice. Asimismo, es necesario conocer los elementos que componen un módulo fotovoltaico:

- Una cubierta exterior transparente realizado en vidrio templado de unos 3 o 4 mm de espesor, con su cara exterior texturada de modo que mejore el rendimiento cuando la radiación solar ocurre a bajo ángulo de incidencia, así como para absorber mejor la radiación solar difusa del ambiente.

- 
- Un material de relleno interior, que funciona de encapsulante, hecho a base de vinilo de acetato etileno (EVA), que sirve para recubrir las células fotovoltaicas dentro del módulo, protegiéndolas de la entrada de aire o humedad, y evitando así que se produzca la oxidación del silicio que conforma las células, dado que de producirse dejarían de funcionar.
  - Una cubierta posterior realizada normalmente a base de fluoruro de polivinilo (PVF), que además de sus propiedades como aislante dieléctrico, ofrece gran resistencia a la radiación ultravioleta, contribuyendo a servir de barrera a la entrada de humedad y ofreciendo una gran adhesión al material del que está hecho el encapsulante interior.
  - Las propias células fotoeléctricas, ya estudiadas en apartados anteriores.
  - Elementos de conexión eléctrica entre células, para establecer el circuito eléctrico.
  - Una caja estanca de conexiones, dotada de bornes de conexión normalizados y con grado de protección IP65, de donde parte el cableado exterior del módulo para su conexión con otros módulos que conforman el sistema completo de generación fotovoltaica. En dicha caja se incluyen los diodos de protección cuya misión es la de reducir la posibilidad de pérdida de energía debido a un mal funcionamiento por sombreados parciales de paneles y de evitar la rotura del circuito eléctrico por este efecto. Ello es así porque cuando se produce una sombra parcial sobre un panel, deja de generar corriente y se convierte en absorbedor de energía, lo que produciría un recalentamiento excesivo del mismo que podría dañarlo.
  - El marco estructural realizado generalmente en aluminio anodizado que ofrece resistencia mecánica y soporte al conjunto. Se deberá comprobar en las especificaciones del fabricante del módulo su resistencia mecánica frente al viento y otras condiciones, como cargas de nieve, de manera que el conjunto se adecue a las condiciones ambientales del lugar donde se instalen.

En la figura 1.7 se ilustra un panel solar fotovoltaico con sus principales componentes.

*Figura 1.7: Componentes de un panel solar.*



*Fuente:*(Eliseo, 2018).

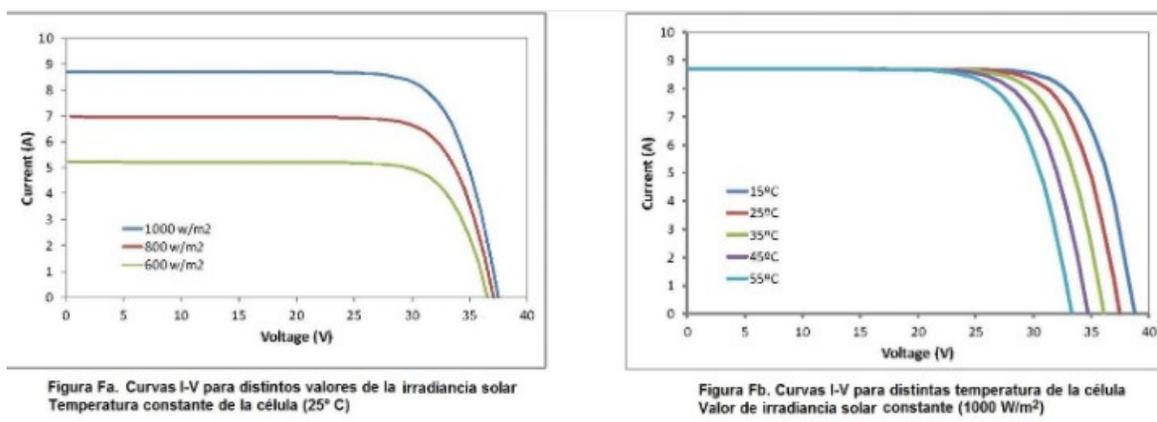
Los beneficios de los módulos que aparecen en la información técnica que proporciona cualquier fabricante están imponiendo a los módulos requisitos estándar de medida (CEM) de irradiancia y temperatura, que son siempre las mismas y son utilizadas universalmente para caracterizar células, módulos y generadores solares. Estas condiciones son las siguientes:

- Irradiancia solar: 1000 W/m<sup>2</sup>;
- Distribución espectral: AM 1,5 G;
- Temperatura de célula: 25 °C.

No obstante, las condiciones verdaderas de operación de los módulos serán distintas a los estándares anteriores, por lo que habrá que aplicar las correspondientes causas correctoras a los procedimientos de cálculos que se realicen. Según se indican en las siguientes gráficas de la figura 1.8, donde se define el funcionamiento de un módulo fotovoltaico, el valor de corriente generado

por el módulo crece con la magnitud de radiación solar, mientras que la tensión que ofrece cae conforme aumenta la temperatura alcanzada en las células del módulo. En la Figura 1.8 se muestran unas gráficas que describen el funcionamiento de los módulos fotovoltaicos.

Figura 1.8: Curvas de funcionamiento de módulos fotovoltaicos.



Fuente: (Duffie & Beckman, 2013).

Se dice que el funcionamiento de un módulo fotovoltaico depende de su potencia pico, es decir, de la cantidad de insolación solar que pueda percibir, que a su vez se puede medir por la longitud de onda de la misma, de la temperatura alcanzada en su exterior o el valor de carga eléctrica emanado. Por ende, cuando la instalación del módulo se hace, es necesario que la disposición se efectúe de manera que la radiación solar pueda ser captada provechosamente, esto se genera con la ayuda de un seguidor, que permite guiar los paneles fotovoltaicos hacia el Sol y de esta forma obtener un mejor y eficaz rendimiento. En consecuencia, atribuir a la conformación de potencia se involucra en el proceso de recepción de luz solar a las células del panel y la transformación de energía eléctrica. Inciden factores como la inclinación, ubicación del panel, y la irradiancia solar constante. Según lo anterior, el uso de este tipo de sistemas fotovoltaicos es

considerado en cualquier instancia, debido a que proporciona un recurso que no emite sustancias tóxicas ni contaminantes al aire. Tampoco genera algún tipo de residuos o de contaminación a las fuentes hídricas (debe resaltarse que en las últimas décadas el uso indiscriminado del agua potable provoca su escasez), por lo que resulta de gran utilidad como alternativa para mitigar los daños ambientales ocasionados a través del tiempo.

## **1.5 Estado del arte**

En el estado de la técnica existe una pluralidad de divulgaciones relacionadas con reflectores o sistemas específicos para concentradores solares, dentro de los que se encuentra la patente CN108508923. Este documento describe un tipo de sistema de seguimiento solar y su método de control para que se pueda lograr el seguimiento de dos ejes.

El documento WO2008043871A1 revela sistemas y métodos para controlar conjuntos de paneles solares. El grupo de paneles solares puede incluir una o más juntas articuladas que pueden proporcionar versatilidad en la disposición de los paneles solares, lo que puede permitir que el conjunto de paneles solares se distribuya sobre diversos tipos de superficies subyacentes (Cabanillas, 2008).

El documento US4564275A revela un método para alinear automáticamente los heliostatos, comparando la posición real del centroide del rayo de sol en un objetivo con una posición de referencia de comando para determinar el error en la ubicación del centroide del rayo de sol (Kenneth W, 1986).

El documento MX2011009760A describe un sistema de colectores solares concentradores que utilizan un reflector concentrador para dirigir la radiación solar incidente hacia una tecnología solar y a la vez este mecanismo rastrea la trayectoria del sol por lo menos en un eje (Finot & Wells, 2011).

El documento WO 2012/117123 A1, prioriza la utilización de sensores solares actuando con distinta función, dos sensores detectando la luz solar para coordinar el movimiento de los heliostatos y que la energía apunte al mismo punto de captación (López et al., 2012).

El documento WO 2013/124501 A1, utiliza un sensor que capta la luz solar y al mismo tiempo sincroniza el movimiento mecánico accionado por dos motores en dos ejes con esto optimiza las proyecciones solares de los reflectores hacia un punto (Quero & Rodríguez, 2013).

El documento US 4,586,488, es un rastreador solar que incorpora un solo sensor de seguimiento solar y emitiendo señales a un mecanismo que es accionado en dos planos con la característica de que compensa las variaciones en los cambios angulares azimutales y altitudinales (Noto, 1986) .

El documento US 8,748,733 B2, presenta soportes de campos solares situados en construcciones altas en las que se necesita una excelente fijación a los soportes y al mismo tiempo una conexión cableada óptima para el desempeño energético de los paneles (Leary, 2014).

## **2. Capítulo 2. Diseño de un reflector solar para módulos fotovoltaicos**

### **2.1 Requerimientos**

Los requerimientos técnicos para el desarrollo (diseño, construcción y ensayos) del reflector solar para módulos fotovoltaicos exigen lograr un dispositivo que:

1. Incremente la potencia de los módulos fotovoltaicos que se instalan de forma fija sobre cualquier superficie.
2. Que los costos de adquisición y uso del dispositivo sean menores que los gastos asociados a la adquisición y uso de seguidores solares que sigan la trayectoria solar en uno o dos ejes.
3. Que sus elementos sean modulares, lo que permitirá obtener diferentes configuraciones en dependencia del área de los módulos fotovoltaicos a utilizar.
4. Que su masa sea razonablemente pequeña, para facilitar su instalación y montaje sin necesidad de máquinas de izaje.
5. Que al realizar un análisis comparativo entre el uso del reflector solar o incrementar la superficie de los módulos fotovoltaicos sea más económico y rentable la utilización del reflector solar.

## 2.2 Diseño conceptual

Para mejorar la eficiencia de los grandes campos de paneles solares fijos, se propone un dispositivo reflector con movimiento de elevación que sea capaz de redireccionar los rayos solares hacia la superficie de módulos fotovoltaicos, estando estos (módulos) colocados de forma fija sobre la estructura portante del reflector solar y con el ángulo de inclinación definido por la empresa de montaje o diseñador del sistema.

El presente trabajo de grado relaciona un dispositivo con movimiento autónomo de elevación que redirecciona los rayos solares hacia la superficie de un de un módulo fotovoltaico. Consta de las siguientes partes:

- Estructura de soporte (100).
- Sistema de movimiento (200).
- Sistema Reflector (300).
- Estructura de Soporte (100)

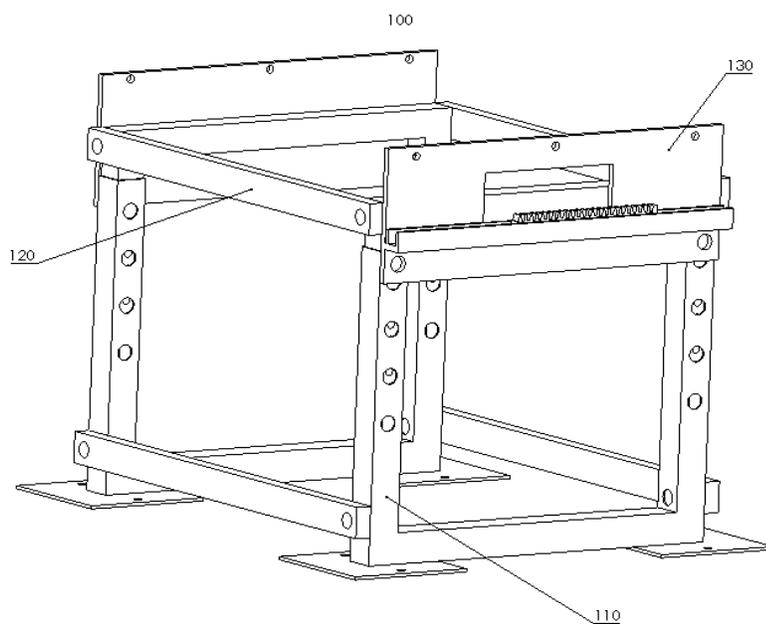
La estructura soporta todos los elementos que forman parte del reflector (ver Figura 2.9) y está compuesto por:

- Columnas portantes plegables ajustables vertical y horizontal (110).
- Soporte para paneles solares (120).
- Soporte para el sistema de movimiento (130)

Sistema de movimiento (200)

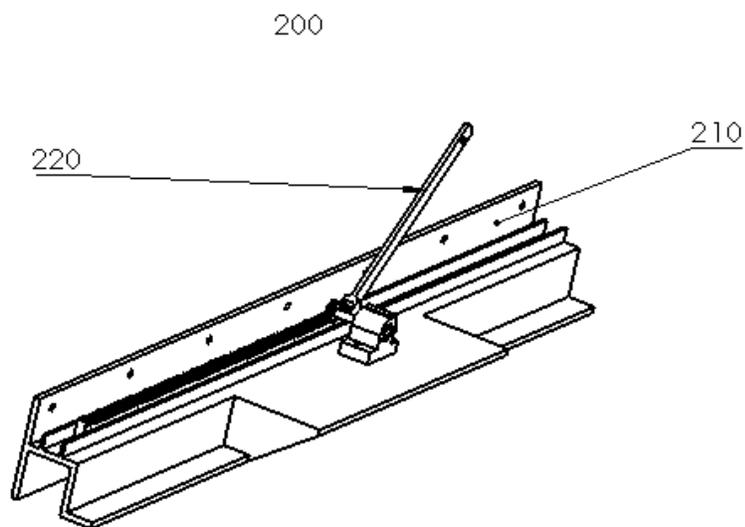
- Este sistema permite el movimiento de elevación del Sistema Reflector (ver Figura 2.10) y está formado por:
- Soporte para los reflectores y otros elementos (210).
- Biela (220).

Figura 2.9: Estructura soporte (100) del reflector solar



Fuente: Autores, 2020.

Figura 2.10: Sistema de movimiento (200) del reflector solar.



Fuente: Autores, 2020.

### Sistema Reflector (300)

El Sistema Reflector (ver Figura 2.11) permite desviar los rayos solares hacia la superficie de la tecnología solar. Está formado por:

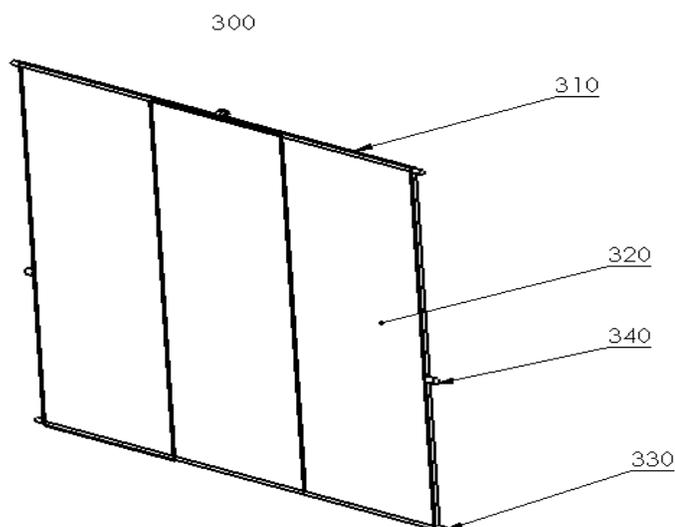
Soportes de elementos reflectantes (310).

Elementos reflectantes dobles (320).

Eje del movimiento vertical (330).

Soporte para bielas de unión de soportes (340)

*Figura 2.11: Sistema Reflector (300)*



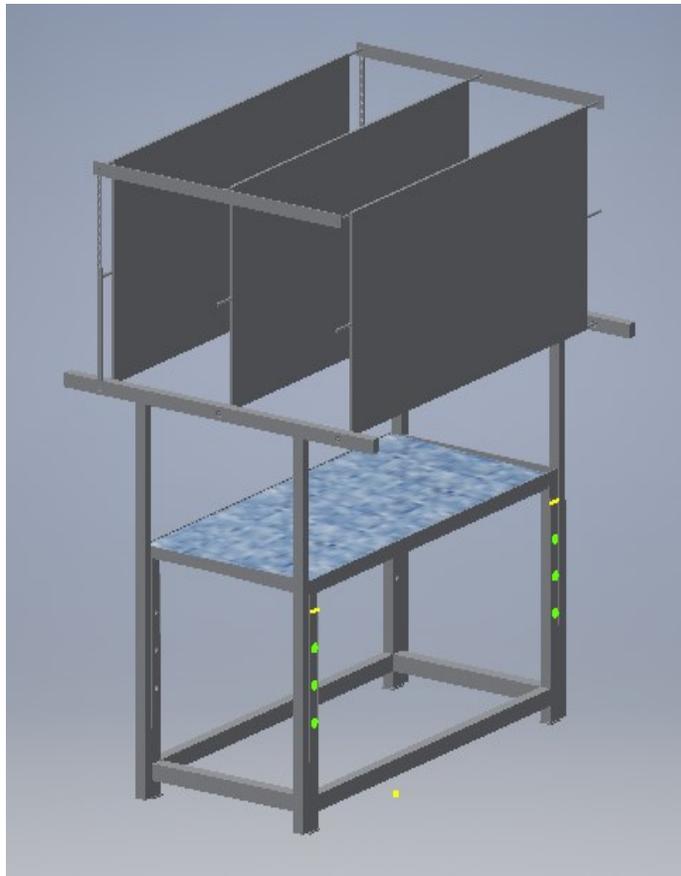
*Fuente: Autores, 2020.*

### **Descripción del funcionamiento del Reflector Solar con Espejos Móviles (RSEM)**

El RSEM se colocará en el lugar donde se realizará el montaje de la tecnología de aprovechamiento de la energía solar (módulo fotovoltaico). Para ilustrar la idea, en la Fig. 2.12 el RSEM está representado con un panel de un campo solar que se puede colocar con un ángulo horizontal.

Una vez colocado el RSEM con el módulo fotovoltaico los espejos reflectantes se posicionan con el ángulo zenital correcto, en correspondencia con la latitud donde se encuentre situado el sistema, el día del año y la hora del día. Ello permitirá que los rayos solares sean guiados hacia la superficie de la tecnología solar. Al ser los reflectores dobles permite que con giros de ángulos pequeños (ver Tabla 2.1), tanto por la mañana como por la tarde, los rayos solares puedan incidir normalmente sobre las superficies de las tecnologías solares.

*Figura 2.12. Reflector solar con espejos móviles y módulo fotovoltaico.*

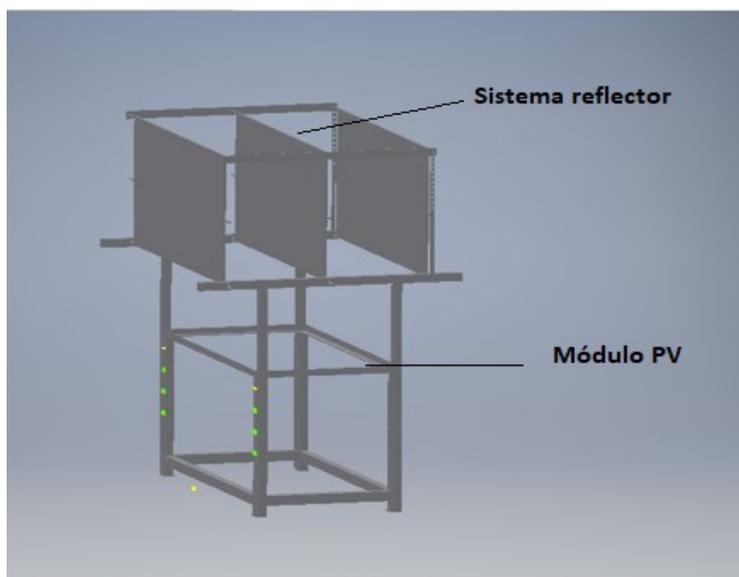


*Fuente: Autores, 2020.*

### 2.3 Diseño en detalles del reflector solar

La parte principal del reflector solar es su sistema de reflexión (300), el cual requiere moverse angularmente. El sistema de reflexión consiste en un conjunto de superficies reflectantes que están montadas en una estructura móvil que es la que realiza el movimiento angular. La posición inicial de trabajo del sistema reflectante es perpendicular al módulo fotovoltaico en el horario antes de la salida del Sol (cero grados de inclinación respecto a la superficie de los módulos fotovoltaicos) como se muestra en la Figura 2.13.

*Figura 2.13: Sistema reflector en posición inicial de trabajo.*



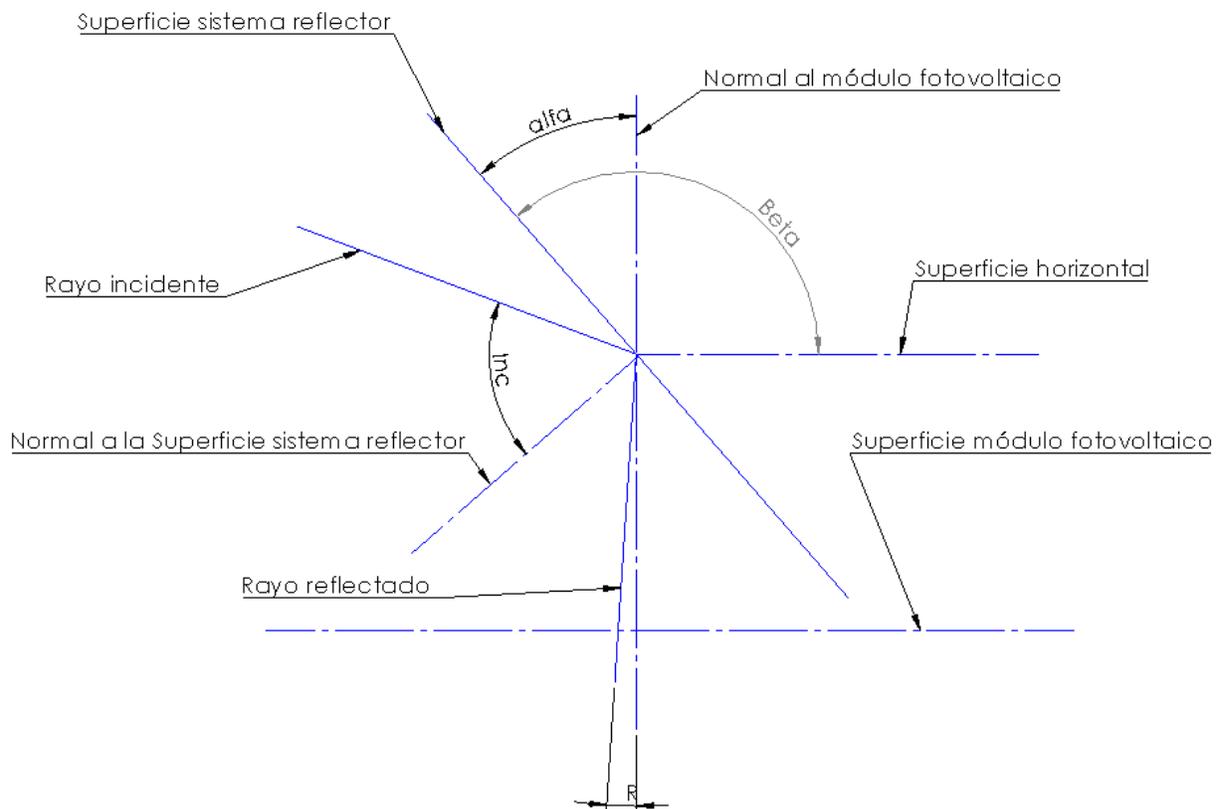
*Fuente: Autores, 2020.*

Al comenzar a salir el Sol y aumentar su posición angular (zenital y acimutal), el sistema reflector se moverá con el objetivo de que los rayos solares incidan con un determinado ángulo sobre la línea normal a la superficie reflectora y al reflectarse los rayos solares incidan sobre la superficie del módulo fotovoltaico. Para lograr ese objetivo se procede a desarrollar el procedimiento que permita saber para cada instante del día cual es el ángulo que debe rotar el sistema

reflector. Es evidente que los horarios de por la mañana el movimiento será con una inclinación hacia el este (posición por donde sale el Sol) y en los horarios de por la tarde el movimiento será hacia el oeste (posición por donde se pone el Sol).

### Cálculo del ángulo de rotación (alfa) por la mañana

Figura 2.14: Ángulos de posicionamiento para el sistema reflector en horario de la mañana.



Fuente: Autores, 2020

El ángulo de rotación ideal del sistema reflector sería aquel en el cual el rayo incidente sea reflejado para la superficie del módulo con un ángulo igual a cero ( $R=0$ ), es decir, que incidiera perpendicularmente sobre la superficie del módulo fotovoltaico de la Figura 2.14 se puede ver que esto se logra cuando

$$180 - R - 2Inc - (90 - Inc) - \alpha = 0 \quad (10)$$

$$\alpha = 90 - Inc$$

Se conoce que para cualquier superficie inclinada se puede calcular el ángulo de incidencia sobre la superficie por la expresión (11) (ángulo de incidencia =  $\theta$ ).

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (11)$$

De la ecuación (10) se puede ver que

$$\beta = 90 + \alpha$$

$$\beta = 180 - \theta$$

Se sustituye en la ecuación (11) la expresión del ángulo de incidencia y se puede buscar cual es el ángulo  $\beta$  que satisface esa condición y posteriormente se calcula el ángulo  $\alpha$  de inclinación requerido para el sistema reflector.

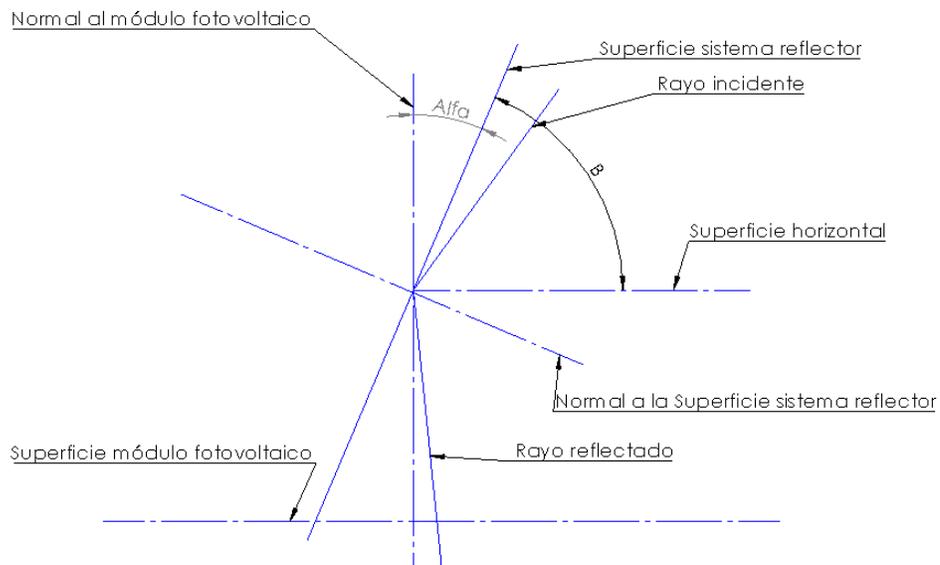
$$\cos(180 - \beta) = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma)$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{1 + \cos \theta_z}{\sin \theta_z \cos(\gamma_s - \gamma)}$$

Para la Figura 2.15 cuando el Sol se pone por la tarde se realiza un procedimiento similar y se encuentra que el ángulo  $\beta$  se calcula por la expresión

$$\beta = \tan^{-1} \frac{1 - \cos \theta_z}{\sin \theta_z \cos(\gamma_s - \gamma)}$$

Figura 2.15: Ángulos de posicionamiento para el sistema reflector en horario de la tarde.



Fuente: Autores, 2020.

A continuación, se muestra un fragmento de los cálculos realizados para los días en los que se realizaron las muestras.

Tabla 2.1: Cálculo del ángulo de rotación  $\alpha$ .

Fecha	Hora	$\theta_z$	$\gamma_s$	$\gamma$	$\beta$	$\alpha$	$\theta$	R
13/09/2020	10:30	22.63	-83.51	0	101.31	11.31	97.96	19.27
13/09/2020	12:39	4.18	-45.89	0	88,57	1,43	85,76	2,81
13/09/2020	14:28	36.91	86.9	0	89.0	1.0	87.39	1.61
19/09/2020	11:50	5.91	-25,62	0	92.95	2.95	87.63	0.58
19/09/2020	13:03	15.9	70.9	0	87.39	2.61	82.34	5.02
19/09/2020	14:35	39	83.4	0	87.69	2.31	84.00	3.60
20/09/2020	11:33	8.85	-49.83	0	94.42	4.42	88.70	3.12
20/09/2020	12:55	8.85	49.8	0	87.14	2.86	81.47	5.49
20/09/2020	14:20	35.36	81.80	0	87.40	2.60	83.14	4.26
27/09/2020	10:04	31.16	-74.78	0	105.58	15.58	95.68	20.53

27/09/2020	12:45	14.12	52.99	0	85.74	4.26	77.38	8.36
27/09/2020	14:06	31.16	74.78	0	85.82	4.18	78.59	7.10
03/10/2020	10:35	23.91	-63.14	0	101.96	11.96	90.59	12.54
03/10/2020	12:15	11.55	18.96	0	84.53	5.47	73.63	10.91
03/10/2020	13:50	29.51	68.71	0	84.54	5.46	74.88	9.66
04/10/2020	10:04	32.02	-69.75	0	106.01	16.01	93.29	18.60
04/10/2020	11:40	12.42	-24.29	0	96.21	6.21	84.88	1.09
04/10/2020	13:08	20.36	56.47	0	84.34	5.66	73.51	10.82
10/10/2020	14:39	41.92	71.34	0	83.01	6.99	72.39	10.63
11/10/2020	10:30	26.45	-58.17	0	103.23	13.23	88.64	11.86
11/10/2020	11:57	14.03	-3.06	0	82.99	7.01	68.98	0.02
11/10/2020	13:17	23.73	53.94	0	82.95	7.05	69.67	13.28
11/10/2020	14:40	42.18	70.87	0	82.80	7.20	71.88	10.92
12/10/2020	9:10	44.84	-71.53	0	112.42	22.42	93.67	26.09
12/10/2020	10:30	26.65	-57.46	0	103.32	13.32	88.35	11.68
12/10/2020	12:05	14.44	4.76	0	82.81	7.19	68.42	14.38
12/10/2020	13:30	26.65	57.46	0	82.74	7.26	69.38	13.36
12/10/2020	14:53	45.41	71.77	0	82.55	7.45	71.83	10.72
17/10/2020	10:00	33.99	-61.50	0	106.99	16.99	89.27	16.27
17/10/2020	11:35	17.39	-21.14	0	98.70	8.70	82.46	1.15
17/10/2020	13:05	22.88	44.84	0	81.84	8.16	66.20	15.64
18/10/2020	10:17	30.57	-57.14	0	105.2	15.28	87.75	13.04
18/10/2020	11:40	17.34	-17.02	0	81.70	8.30	65.18	0.75
18/10/2020	13:18	23.53	49.48	0	81.63	8.37	65.90	15.73

*Fuente: Autores, 2020*

En la Tabla 2.1 se puede observar que  $R$  es el ángulo de incidencia sobre el panel fotovoltaico después de haber sido reflejado por los espejos móviles. Es de notar que este ángulo de incidencia sobre el panel se acerca a cero, es decir, que actúe perpendicular sobre el panel, pero no logra un valor cero porque solamente el reflector se mueve en un solo plano.

A continuación, se muestra los resultados comparativos entre el ángulo de incidencia sobre un módulo fotovoltaico colado fijo (con la mejor inclinación ( $\beta$ ) en la ciudad de Tunja-Boyacá que tiene una latitud de 5.53 y el ángulo de incidencia que se obtiene con el sistema reflector.

*Tabla 2.2: Diferencia entre el ángulo de incidencia de un panel fijo y otro con el reflector solar .*

Fecha	Hora	R	$\beta$ - fijo	$\theta$	Diferencia ( $\theta$ -R)
13/09/2020	10:30	19.27	5.53	22.64	3.37
13/09/2020	12:39	2,81	5.53	10.09	7.28
13/09/2020	14:28	1.61	5.53	36.98	35.37
19/09/2020	11:50	0.58	5.53	2.56	1.98
19/09/2020	13:03	5.02	5.53	15.75	10.73
19/09/2020	14:35	3.60	5.53	38.70	35.10
20/09/2020	11:33	3.12	5.53	6.75	3.63
20/09/2020	12:55	5.49	5.53	13.65	8.16
20/09/2020	14:20	4.26	5.53	34.95	30.69
27/09/2020	10:04	20.53	5.53	29.24	8.71
27/09/2020	12:45	8.36	5.53	11.64	3.29
27/09/2020	14:06	7.10	5.53	31.63	24.53
03/10/2020	10:35	12.54	5.53	21.94	9.40
03/10/2020	12:15	10.91	5.53	6.57	-4.33
03/10/2020	13:50	9.66	5.53	27.94	18.28
04/10/2020	10:04	18.60	5.53	29.62	11.02
04/10/2020	11:40	1.09	5.53	7.71	6.62
04/10/2020	13:08	10.82	5.53	17.89	7.06
10/10/2020	14:39	10.63	5.53	40.43	29.81
11/10/2020	10:30	11.86	5.53	23.97	12.11
11/10/2020	11:57	0.02	5.53	8.52	8.50
11/10/2020	13:17	13.28	5.53	20.93	7.65

11/10/2020	14:40	10.92	5.53	40.64	29.72
12/10/2020	9:10	26.09	5.53	43.34	17.25
12/10/2020	10:30	11.68	5.53	24.10	12.42
12/10/2020	12:05	14,38	5.53	8.94	-5.45
12/10/2020	13:30	13.36	5.53	24.10	10.73
12/10/2020	14:53	10.72	5.53	43.92	33.20
17/10/2020	10:00	16.27	5.53	31.68	15.41
17/10/2020	11:35	1.15	5.53	12.39	11.24
17/10/2020	13:05	15.64	5.53	19.33	3.69
18/10/2020	10:17	13.04	5.53	27.92	14.88
18/10/2020	11:40	0.75	5.53	12.16	11.41
18/10/2020	13:18	15.73	5.53	22.31	6.58
Ángulo de incidencia media incrementado					12.94

*Fuente: Autores, 2020*

De la Tabla 2.2 se puede observar que el uso del reflector solar respecto a un panel fijo mejora la incidencia diaria media sobre un panel solar en un ángulo de 12.94, para las muestras tomadas en esta investigación. Esta mejora repercute directamente en el incremento de la potencia adicional porcentual suministrada por el panel y mejora aproximadamente en un 15% según estudios que se han realizado al respecto por otros autores [24]. Se puede observar que solamente en dos horarios y días el ángulo de incidencia del panel fijo es mejor que el ángulo de incidencia reflectado: en los días 3 de octubre a las 12:15 pm y el día 12 de octubre a las 12:05. Nótese que el mejor desempeño del reflector solar es para los horarios alejados del mediodía

#### **2.4 Materiales y costos del reflector solar**

- Base que consta de dos piezas. De tubo rectangular 2" \* 1 calibre 18.
- Base para panel solar. Tubo cuadrado 1" \* 1" con 1.1 mm de espesor.

- Lamina gradual (biela) entre los reflectores y la estructura.
- Laminas tipo unión entre reflectores.
- Reflectores en lámina de acero cold rolled Calibre 18. 1.43 m \* 0.66 m

*Tabla 2.3: Información de los materiales empleados.*

RECURSO	COSTO (pesos)	CANTIDAD
Tubo rectangular 2" * 1 calibre 18	30.000	1
Tubo cuadrado 1" * 1" con 1.1 mm de espesor	30.000	1
Lámina tipo unión	10.000	2
Reflectores en lámina acero cold rolled Calibre 18	270.000	3
Mano de obra	150.000	1
Transporte	80.000	1
Tornillos	10.000	20
Cable calibre 14	4500	6 m
Costos diseño y construcción	200.000	1

*Fuente: Autores, 2020*

### **3. Construcción y ensayos del reflector solar**

Para la realización de la propuesta de construcción del prototipo reflector solar mediante espejos planos móviles, fue necesario llevar a cabo una ejecución procedimental para lograr ejecutar el desarrollo de los objetivos planteados. Por lo tanto, se procedió a establecer las fases de acción enunciadas a continuación.

Como fase inicial, se tomó la ubicación del proyecto pese a que hay diferentes aspectos que pueden influir en el rendimiento del prototipo, tales como: la ubicación geográfica, el ángulo de  $10^\circ$  respecto a la línea ecuatorial, la radiación solar captada en un lugar específico y/o la temperatura ambiente. Estas fueron las especificaciones técnicas elementales para la realización del proyecto y se procedió a realizar su diseño correspondiente.

La segunda fase consistió en tomar los referentes del diseño para su construcción. La cual tuvo lugar con: selección de materiales, planos de dibujo mecánico, fabricación de la estructura, pruebas de ensayo y error, resultados de las pruebas y mejoras en caso de ser necesarias.

En la tercera fase, con el diseño previo hecho, se procedió a la construcción del reflector solar con espejos móviles, para paneles solares.

La cuarta fase consistió en realización de pruebas y ensayos para el del reflector solar.

#### **3.1 Metodología para la construcción del reflector solar**

Con el diseño previo hecho, se procedió a realizar la elección de materiales, usando solamente un material para evitar cadenas de corrosión. En este caso, el acero 1020 wqt340 quien fue el principal material para construcción de las estructuras definidas. Este apartado se divide en tres secuencias para tener como fin la posible construcción del reflector solar mediante espejos planos móviles.

### **3.1.1 Estructura para el panel solar**

La estructura para el panel solar es el elemento encargado servir como soporte a las láminas de acero cold rolled calibre 18. Fueron las elegidas pese a que este material tiene un alto índice reflector. Además, su espesor es el indicado que permite evitar que cuando se tomaran las muestras con ángulos de 90° hiciera la menor sombra posible. También son las encargadas de brindar una adecuada reflexión de la luz solar.

De acuerdo con lo anterior, se tiene en cuenta para su elaboración los siguientes pasos:

- Tomar las dimensiones del panel.
- Elaborar un marco de tubo cuadrado 1" \* 1" con 1.1 mm de espesor de espesor, con material en acero la cual consta de cuatro apoyos verticales que van soportados al suelo. Cabe anotar que es graduable en sentido vertical.
- Después de ello irá ensamblado a la estructura del reflector solar con espejos planos móviles.

### **3.1.2 Estructura tipo soporte para los reflectores**

Esta estructura fue la principal para el desarrollo del objetivo de este proyecto porque tiene como fin presentar la funcionalidad y mejora de la eficiencia del panel solar al permitir la movilidad mecánica gradual de los espejos planos.

En esta fabricación, los siguientes elementos fueron establecidos:

- Se realizo del mismo material del compendio anterior.
- Elaboración de un soporte con tubo rectangular 2" \* 1 calibre 18. donde reposan los espejos y panel. Fue necesario en primer lugar concebir un diseño previo que incluyó tomar las dimensiones respecto al soporte del panel. A partir de ello, se empezó con la construcción de la estructura tipo soporte para los espejos reflectantes (ensamblado en acero

---

para fácil mantenibilidad). Luego de ello se incluyeron láminas en su superficie para poderlas inclinar, dependiendo la hora del día. Dicha inclinación depende de dos soportes laterales que constan de orificios (Lamina gradual entre los reflectores y la estructura) para encontrar el ángulo óptimo que permita un trabajo eficiente en cuanto a la reflexión de los rayos del sol.

- Se incluyeron al proceso anterior, láminas tipo unión entre los reflectores que funcionan como separación fija entre ellos.
- Se incluyeron también reflectores en lámina acero cold rolled Calibre 18. 1.43 m \* 0.66 m.

### **3.1.3 Ensamble funcional**

En adición, después de haber elaborado las estructuras se tienen en cuenta los aspectos relacionados en las siguientes líneas: el ensamble de las piezas de la estructura se realizó según el diseño previo y la unión de estas partes metálicas se realizó con soldadura manual de metal por arco eléctrico con electrodo revestido y parte con tornillería. Cabe resaltar que, la mayor parte de la estructura es desarmable, esto ayuda a poder realizar mejores pruebas, buena mantenibilidad y fácil transporte. El resultado final de la estructura se puede evidenciar en la figura 3.18.

## **3.2 Ensayos realizados**

Para llevar a cabo la realización de los ensayos se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. Mantenimiento de los dispositivos requeridos para la realización de proyecto (panel solar, regulador, batería, albedómetro, datalogger) de la siguiente manera:

- Inicialmente, se realizó limpieza al albedómetro para tomar correctamente los datos requeridos, según se puede apreciar en la Figura 3.16.

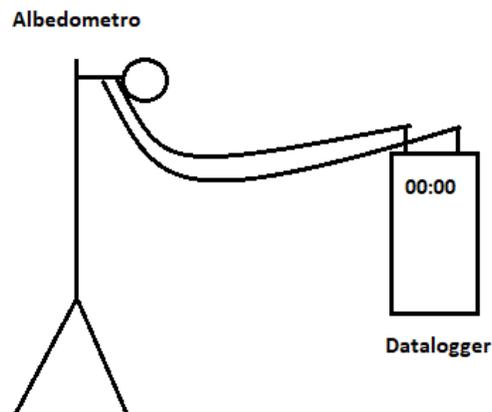
*Figura 3.16: Albedómetro.*



*Fuente: Autores, 2020*

- Se sincronizó el datalogger con el albedómetro para comenzar con las mediciones, como se ilustra en la Figura 3.17.

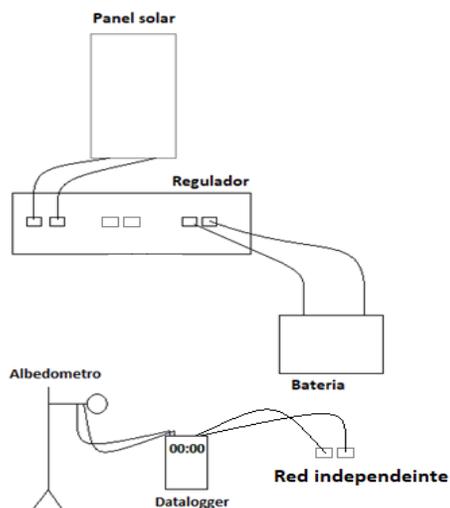
*Figura 3.17: Conexión albedómetro-datalogger.*



*Fuente: Autores. 2020.*

- Posteriormente se ubicó la batería en un lugar con las condiciones idóneas del entorno.
- 2. Conexión cableada con cable número 10 de todos los elementos (panel solar, regulador, batería, datalogger y albedómetro), como se muestra en la Figura 3.18.

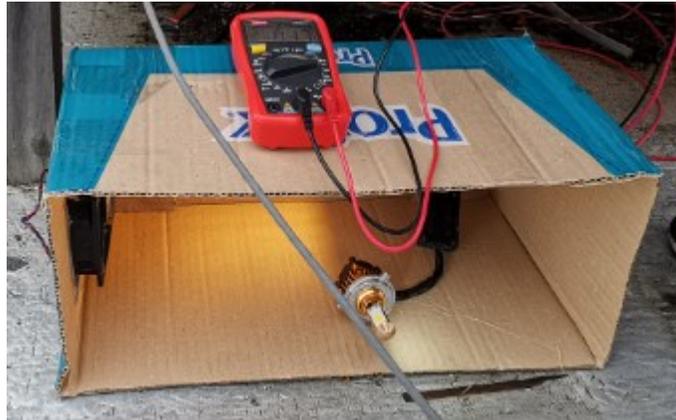
*Figura 3.18: Conexión de todos los elementos.*



*Fuente: Autores, 2020.*

- 3. Fabricación de descargador de baterías vinculando el uso de halógenos de 100W y un disipador de 12 voltios dentro de un soporte en material reciclable.

*Figura 3.19: Descargador de baterías.*



*Fuente: Autores, 2020.*

4. Selección óptima de posición del panel solar respecto a la hora del día y posición del Sol para tomar las pruebas de la radiación solar.

*Figura 3.20: Posicionamiento del panel solar.*



*Fuente: Autores, 2020.*

5. Toma de pruebas en horarios aproximados, comprendidos entre las 09:00 y las 15:00.

### **3.2.1 Ensayos realizados al módulo fotovoltaico sin reflector**

La secuencia de los trabajos realizados para los ensayos fue:

1. Descarga de batería, teniendo en cuenta la seguridad necesaria para no dañar su capacidad de funcionamiento.

*Figura 3.21: Descarga de batería.*



*Fuente: Autores, 2020.*

2. Sincronización de la hora entre el datalogger y el cronómetro.
3. Conectar el panel solar para cargar la batería según los intervalos de voltaje y tiempo. El tiempo total de carga de la batería se tomó como el tiempo necesario para aumentar el voltaje de la batería de 11.9 V hasta 12.5 V.
4. Descarga de datos del datalogger en un fichero de Excel para su posterior procesamiento de los datos en el período de carga de la batería.
5. Con los datos de irradiancia registrado en el datalogger en el período de carga de la batería se procedió a calcular la irradiancia ( $\text{KJ/m}^2$ ).

$$\text{Irradiación} = \frac{\Delta t \cdot G_{\text{media}}}{1000}$$

6. Se calculó el índice de irradiación necesaria para incrementar el voltaje de la batería desde 11.9 V hasta 12.5 V, por la ecuación

$$K_I = \frac{\text{Irradiación}}{\Delta V} = \frac{\text{Irradiación}}{0.6}$$

Los resultados de los cálculos se muestran en la Tabla 2.4.

### 3.2.2 Ensayos realizados al módulo fotovoltaico con el reflector

1. Montaje del módulo fotovoltaico a la estructura del reflector solar mediante espejos planos móviles. En la figura 3.22 se aprecia el panel solar en la estructura del reflector solar con espejos planos móviles.

*Figura 3.22: Reflector Solar con Espejos Móviles.*



*Fuente: Autores 2020.*

2. Descarga de batería hasta el 30% de su capacidad.
3. Sincronización de la hora entre el datalogger y el cronómetro.
4. Con el diseño de la estructura y los cálculos realizados de los ángulos requeridos de tal manera que los rayos del Sol se reflejen para que incidan de forma perpendicular a la superficie del panel solar, según la hora del día y el movimiento azimutal del sol, se gradúan los reflectores

para tener un ángulo de inclinación específico, que entre menor sea dicho ángulo, más aprovechamiento va a tener dado que los rayos del sol van a incidir a la superficie del panel de forma normal a la superficie de este.

*Figura 3.23: Graduación de inclinación específica del reflector.*



*Fuente: Autores, 2020.*

5. Conectar el panel solar para cargar la batería según los intervalos de voltaje y tiempo. El tiempo total de carga de la batería para cada prueba es de una hora (para intervalos de diez minutos).
6. Descarga de datos del datalogger en un fichero de Excel para su posterior comparación.

### **3.3 Resultados de los ensayos**

Los resultados de los ensayos realizados, con el reflector y sin el reflector, se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Ensayos realizados.

Fecha	Hora Inicio	Hora final	$\Delta t$ (min)	$\Delta V$ (v)	Irradiación (kJ/m <sup>2</sup> )	K <sub>i</sub> (kJ/m <sup>2</sup> V)	Con reflector
13/09/2020	10:30	10:50	20	0.6	1044,8	1441,4	NO
13/09/2020	12:39	13:09	30	0.6	--	--	NO
13/09/2020	14:28	15:18	50	0.6	--	--	NO
20/09/2020	11:33	11:53	20	0.6	--	--	NO
20/09/2020	14:20	14:50	30	0.6	--	--	NO
27/09/2020	10:04	10:24	20	0.6	--	--	NO
27/09/2020	12:45	13:40	55	0.6	--	--	NO
27/09/2020	14:06	15:06	60	0.6	2150,8	3584,70	NO
03/10/2020	10:35	11:05	30	0.6	1217,1	2028,60	NO
03/10/2020	12:15	12:45	30	0.6	1600,7	2667,80	NO
03/10/2020	13:50	14:30	40	0.6	1418,7	2364,50	NO
04/10/2020	10:15	10:45	60	0.6	1606,6	2682,60	NO
04/10/2020	11:40	12:40	60	0.6	1209,3	2015,60	NO
04/10/2020	13:08	14:08	60	0.6	1811,5	3019,20	NO
10/10/2020	14:39	15:39	60	0.6	1850,9	3084,80	SI
11/10/2020	10:31	10:51	20	0.6	1063,8	1772,90	SI
11/10/2020	11:57	12:17	20	0.6	1318,5	2197,50	SI
11/10/2020	13:17	13:37	50	0.6	2841,6	4736,00	SI
11/10/2020	14:40	15:40	60	0.6	2105,5	3509,10	SI
12/10/2020	9:10	9:30	20	0.6	318,0	530,10	SI
12/10/2020	10:30	10:50	20	0.6	--	--	SI
12/10/2020	12:05	12:25	30	0.6	--	--	SI
12/10/2020	13:30	14:30	60	0.6	--	--	SI
12/10/2020	14:53	15:53	60	0.6	--	--	SI
17/10/2020	10:00	10:30	30	0.6	--	--	SI
17/10/2020	11:35	11:55	20	0.6	--	--	SI

17/10/2020	13:05	14:05	60	0.6	--	--	SI
18/10/2020	10:17	10:37	20	0.6	--	--	SI
18/10/2020	11:40	12:00	20	0.6	--	--	SI
18/10/2020	13:18	14:08	60	0.6	--	--	SI

*Fuente: Autores, 2020.*

### 3.4 Conclusiones sobre los ensayos

Con los ensayos realizados sin el uso del Reflector solar se puede observar, que el incremento del voltaje en la batería requiere mayor cantidad de radiación en los horarios más alejados al mediodía que en otros horarios. Se infiere que esto ocurre debido a que el ángulo de incidencia es mayor y por lo tanto se aprovecha menos la energía solar. Al realizar los ensayos con el Reflector Solar esta situación se mejora porque la diferencia entre  $\theta - R$  disminuye con una media de  $12.94^\circ$ .

Se realizaron las pruebas con el reflector solar demostrando que las muestras tomadas con y sin reflector en los mismos horarios, pero en días distintos, mejoraron respecto a que el día 03/10/2020 a las 10:35 sin reflector solar se necesitaron  $2028,6 \text{ KJ/m}^2$  para incrementar en un voltio la carga de la batería, pero en cambio el día 11/10/2020 a las 10:31 con reflector solar se necesitaron  $1772,9 \text{ KJ/m}^2$  para incrementar en un voltio la carga de la batería.

Esto representa que efectivamente los reflectores intervienen mejorando la eficiencia del panel solar.

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

Con el desarrollo del proyecto se ha logrado alcanzar los objetivos propuestos en el mismo que consistió en el diseño, construcción y ensayos de un Reflector solar con espejos móviles para paneles solares.

Dado a los materiales y elementos que requiere el montaje y aplicación de un sistema de seguidor solar para aprovechamiento de esta energía en comparación por este trabajo desarrollado se aprecia que con este diseño elaborado se utilizan menos elementos y dispositivos lo que se ve reflejado en costos de inversión final.

Se logró realizar el diseño de la estructura funcional de modo  $\theta - R$  da una media favorable de  $12.94^\circ$ , como se puede apreciar en la tabla 2.2. Esto permite que la radiación solar incida con mayor eficacia sobre la superficie del panel solar fotovoltaico.

Se construyó este sistema mecánico del reflector solar, que es funcional y de costos accesibles como se puede observar en la tabla 2.3.

Con la construcción y las pruebas realizadas al dispositivo diseñado se manifiesta que es posible técnicamente su uso para la realización de ensayos que puedan mostrar su utilidad práctica para incrementar la eficiencia de los paneles solares. Los ensayos ejecutados muestran que a lo largo del día la necesidad de irradiación solar para cargar una batería varía, y que en los horarios más alejados del mediodía se necesita una mayor cantidad de energía para lograr la carga de la batería. Esto está dado porque el ángulo de incidencia de los rayos solares es mucho mayor que los horarios cercanos a las 12 PM. Lo anterior confirma la hipótesis que el uso de un Reflector solar con espejos móviles, como el diseñado,

se puede disminuir el ángulo de incidencia, como se demostró en los cálculos realizados y mostrados en la tabla 2.2.

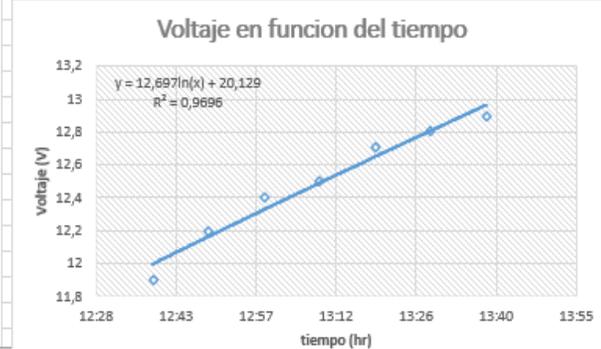
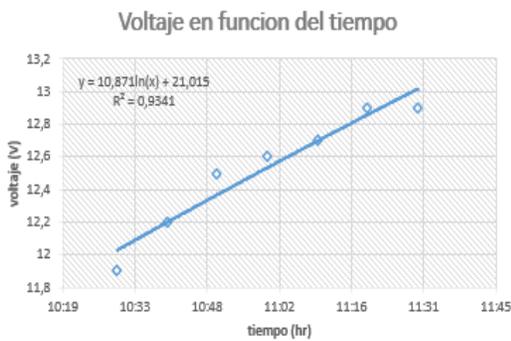
#### **4.2 Recomendaciones**

- Se sugiere que se debe continuar con los ensayos y perfeccionamiento de esta intención de generación solar.
- Se recomienda que se realice otra tesis de investigación sobre el diseño y construcción de Reflector solar con espejos móviles, para paneles solares, ya que esta es una idea con potencial.
- Se sugiere mejorar este proyecto añadiendo un movimiento en un segundo plano obteniendo así una mejor captación de la luz solar a distinta hora del día.
- Se recomienda que en el desarrollo a futuro de esta investigación se emplee un tiempo mayor o igual a 6 meses como mínimo, esto con el fin de lograr un diseño adecuado y mayor toma de muestras.
- Se recomienda realizar un mantenimiento a la estructura del Reflector Solar cada 5 días para su correcto funcionamiento.

## A. Anexo:

### Carga de batería sin reflector solar.

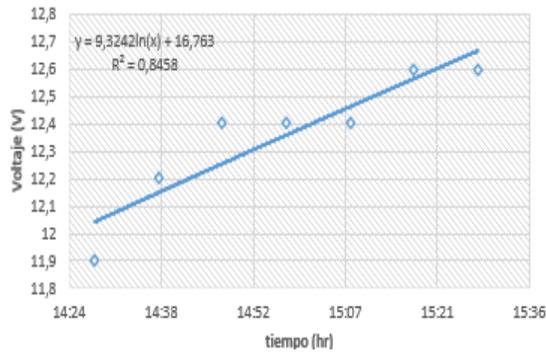
13/09/2020		13/09/2020	
Vo	11.9 V	Vo	11.9 V
HORA INICIO 10:30		HORA INICIO 12:39	
T (hr)	V (Volts)	T (hr)	V (Volts)
10:30	11,9	12:39	11,9
10:40	12,2	12:49	12,2
10:50	12,5	12:59	12,4
11:00	12,6	13:09	12,5
11:10	12,7	13:19	12,7
11:20	12,9	13:29	12,8
11:30	12,9	13:39	12,9



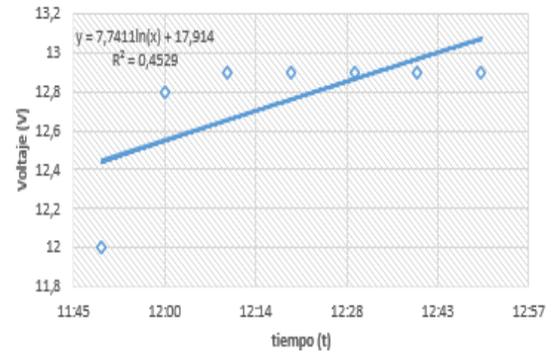
13/09/2020	
Vo	11.9 V
HORA INICIO 2:28	
T (hr)	V (Volts)
14:28	11,9
14:38	12,2
14:48	12,4
14:58	12,4
15:08	12,4
15:18	12,6
15:28	12,6

19/09/2020	
Vo	12 V
HORA INICIO 11:50	
T (hr)	V (Volts)
11:50	12
12:00	12,8
12:10	12,9
12:20	12,9
12:30	12,9
12:40	12,9
12:50	12,9

Voltaje en funcion del tiempo



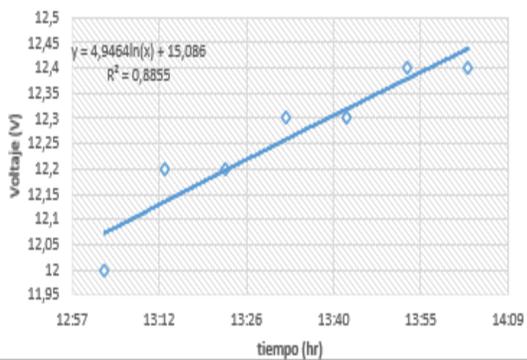
Voltaje en funcion del tiempo



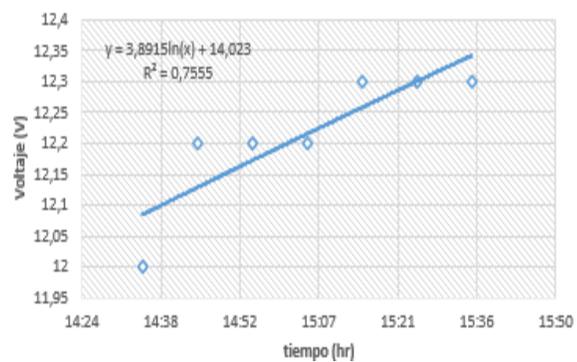
19/09/2020	
Vo	12 V
HORA INICIO 13:03	
T (hr)	V (Volts)
13:03	12
13:13	12,2
13:23	12,2
13:33	12,3
13:43	12,3
13:53	12,4
14:03	12,4

19/09/2020	
Vo	12V
HORA INICIO 14:35	
T (hr)	V (Volts)
14:35	12
14:45	12,2
14:55	12,2
15:05	12,2
15:15	12,3
15:25	12,3
15:35	12,3

### Voltaje en funcion del tiempo



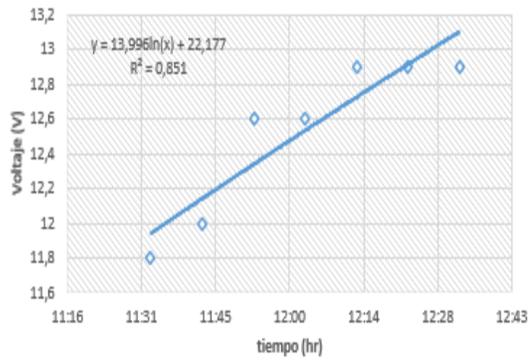
### Voltaje en funcion del tiempo



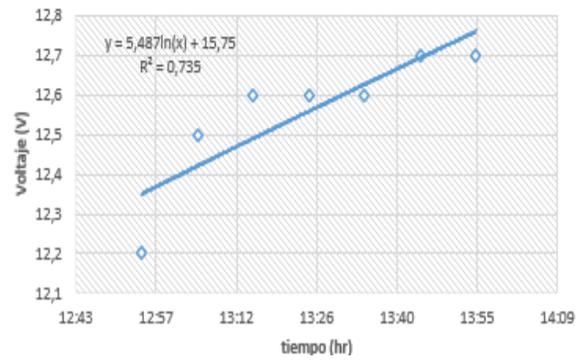
20/09/2020	
Vo	11.8 V
HORA INICIO 11:33	
T (hr)	V (Volts)
11:33	11,8
11:43	12
11:53	12,6
12:03	12,6
12:13	12,9
12:23	12,9
12:33	12,9

20/09/2020	
Vo	12.2 V
HORA INICIO 12:55	
T (hr)	V (Volts)
12:55	12,2
13:05	12,5
13:15	12,6
13:25	12,6
13:35	12,6
13:45	12,7
13:55	12,7

Voltaje en funcion del tiempo



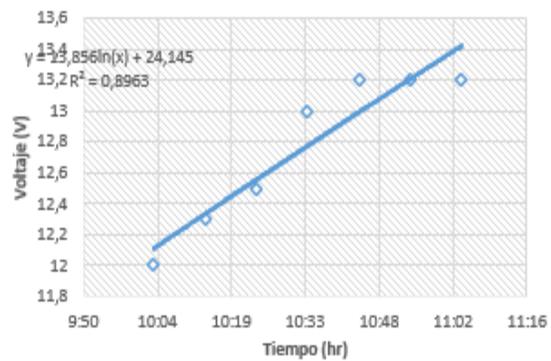
Voltaje en funcion del tiempo



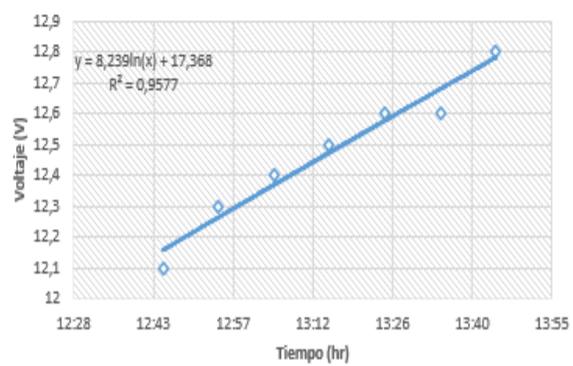
27/09/2020	
Vo	12 V
HORA INICIO 10:04	
T (hr)	V (Volts)
10:04	12
10:14	12,3
10:24	12,5
10:34	13
10:44	13,2
10:54	13,2
11:04	13,2

27/09/2020	
Vo	12,1 V
HORA INICIO 12:45	
T (hr)	V (Volts)
12:45	12,1
12:55	12,3
13:05	12,4
13:15	12,5
13:25	12,6
13:35	12,6
13:45	12,8

**Voltaje en funcion del tiempo**



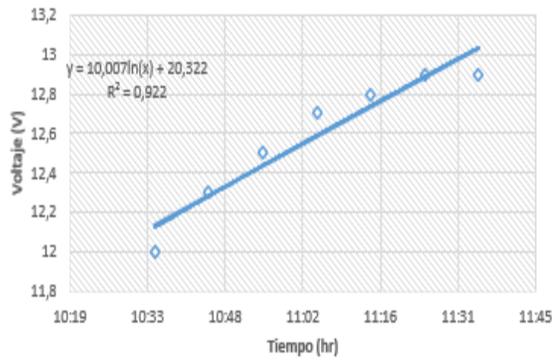
**Voltaje en funcion del tiempo**



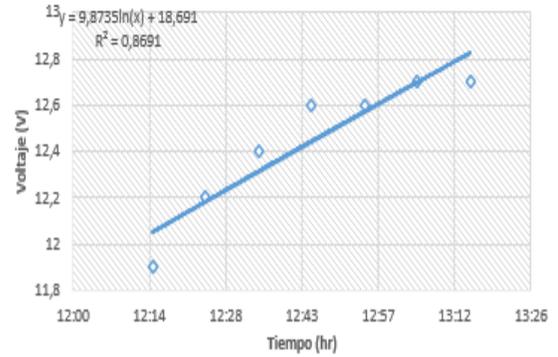
3/10/2020	
Vo	12,0 V
HORA INICIO 10:35	
T (hr)	V (Volts)
10:35	12
10:45	12,3
10:55	12,5
11:05	12,7
11:15	12,8
11:25	12,9
11:35	12,9

3/10/2020	
Vo	11,9 V
HORA INICIO 12:15	
T (hr)	V (Volts)
12:15	11,9
12:25	12,2
12:35	12,4
12:45	12,6
12:55	12,6
13:05	12,7
13:15	12,7

Voltaje en funcion del tiempo



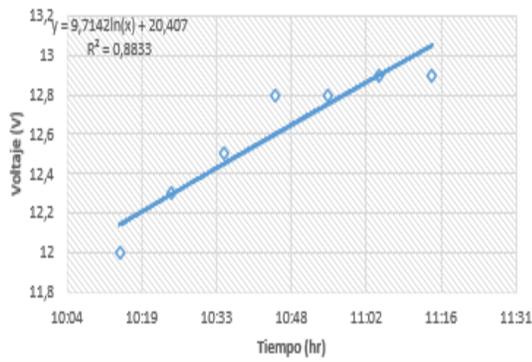
Voltaje en funcion del tiempo



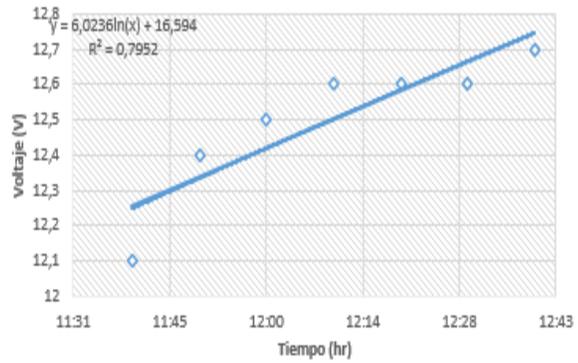
4/10/2020	
V <sub>0</sub>	12,0 V
HORA INICIO 10:04	
T (hr)	V (Volts)
10:15	12
10:25	12,3
10:35	12,5
10:45	12,8
10:55	12,8
11:05	12,9
11:15	12,9

4/10/2020	
V <sub>0</sub>	12,1 V
HORA INICIO 11:40	
T (hr)	V (Volts)
11:40	12,1
11:50	12,4
12:00	12,5
12:10	12,6
12:20	12,6
12:30	12,6
12:40	12,7

Voltaje en funcion del tiempo



Voltaje en funcion del tiempo

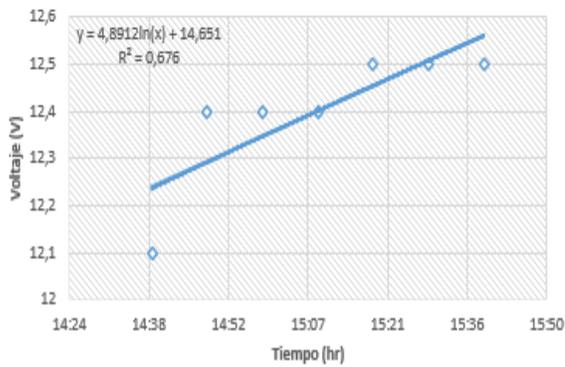


### Carga de batería con reflector solar.

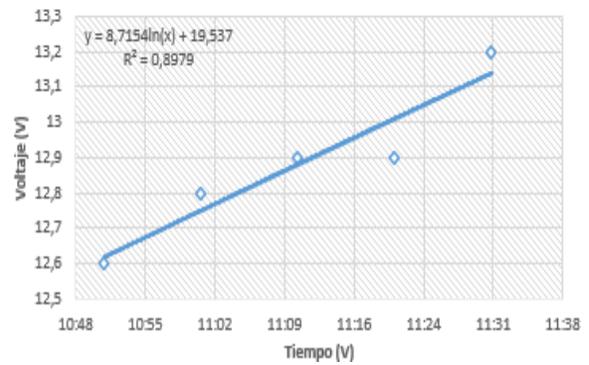
10/10/2020		11/10/2020	
Vo	12,1 V	Vo	12,0 V
HORA INICIO 14:39		HORA INICIO 10:30	
T (hr)	V (Volts)	T (hr)	V (Volts)
14:39	12,1	10:31	12
14:49	12,4	10:41	12,6
14:59	12,4	10:51	12,6
15:09	12,4	11:01	12,8
15:19	12,5	11:11	12,9
15:29	12,5	11:21	12,9
15:39	12,5	11:31	13,2

Área del gráfico

Voltaje en funcion del tiempo



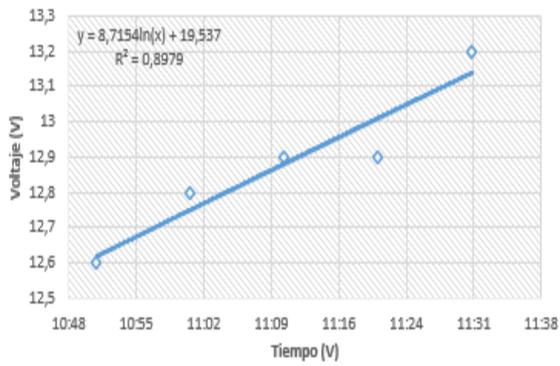
Voltaje en funcion del tiempo



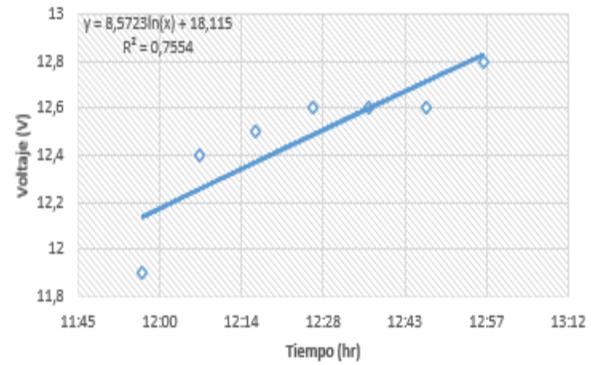
11/10/2020	
Vo	12,0 V
HORA INICIO 10:30	
T (hr)	V (Volts)
10:31	12
10:41	12,6
10:51	12,6
11:01	12,8
11:11	12,9
11:21	12,9
11:31	13,2

11/10/2020	
Vo	11,9 V
HORA INICIO 11:57	
T (hr)	V (Volts)
11:57	11,9
12:07	12,4
12:17	12,5
12:27	12,6
12:37	12,6
12:47	12,6
12:57	12,8

Voltaje en funcion del tiempo



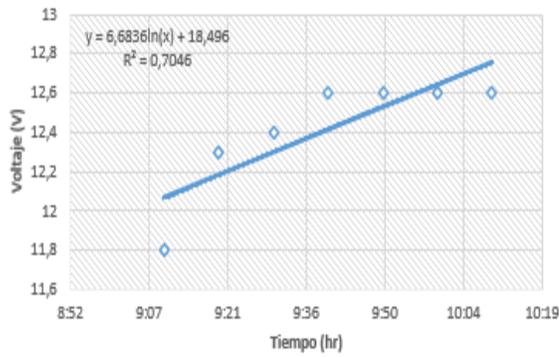
Voltaje en funcion del tiempo



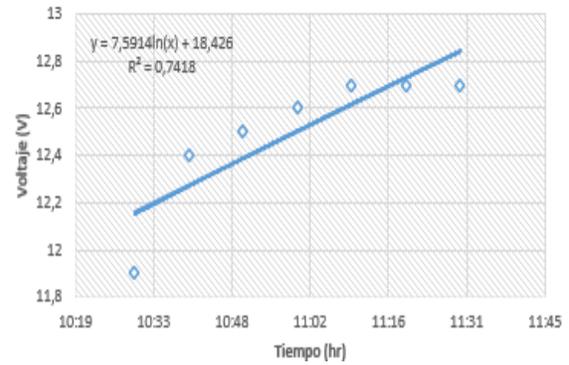
12/10/2020	
Vo	11,8 V
HORA INICIO 9:10	
T (hr)	V (Volts)
9:10	11,8
9:20	12,3
9:30	12,4
9:40	12,6
9:50	12,6
10:00	12,6
10:10	12,6

12/10/2020	
Vo	11,9 V
HORA INICIO 10:30	
T (hr)	V (Volts)
10:30	11,9
10:40	12,4
10:50	12,5
11:00	12,6
11:10	12,7
11:20	12,7
11:30	12,7

Voltaje en funcion del tiempo

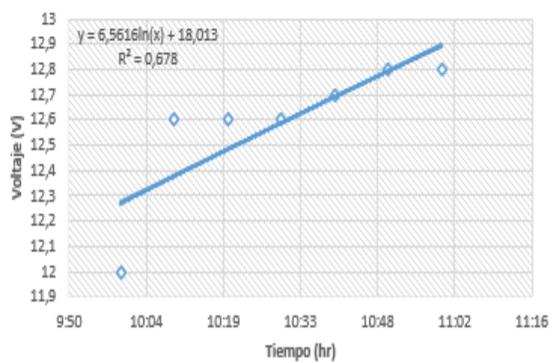


Voltaje en funcion del tiempo

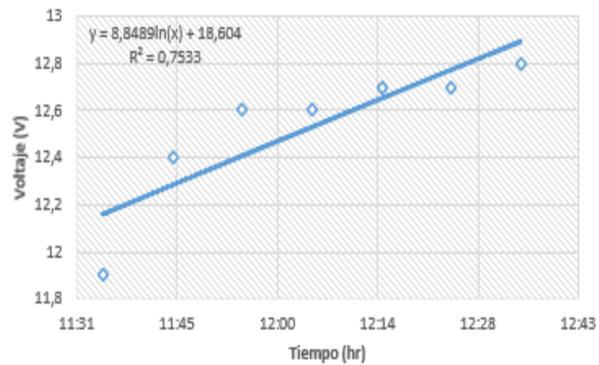


17/10/2020		17/10/2020	
Vo	12,0 V	Vo	11,9 V
HORA INICIO 14:40		HORA INICIO 11:35	
T (hr)	V (Volts)	T (hr)	V (Volts)
10:00	12	11:35	11,9
10:10	12,6	11:45	12,4
10:20	12,6	11:55	12,6
10:30	12,6	12:05	12,6
10:40	12,7	12:15	12,7
10:50	12,8	12:25	12,7
11:00	12,8	12:35	12,8

### Voltaje en funcion del tiempo



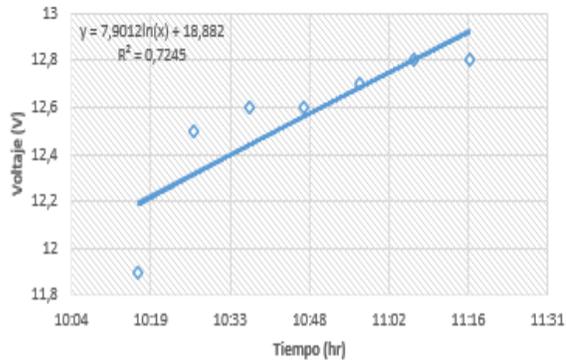
### Voltaje en funcion del tiempo



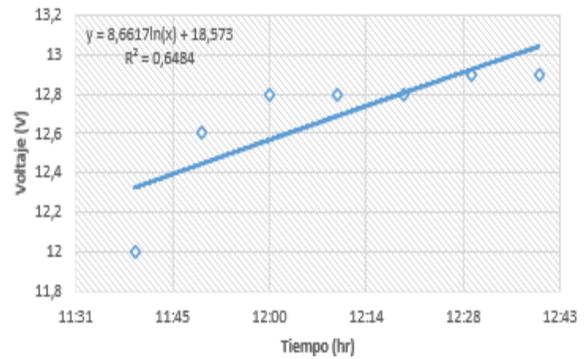
18/10/2020	
Vo	11,9 V
HORA INICIO 10:17	
T (hr)	V (Volts)
10:17	11,9
10:27	12,5
10:37	12,6
10:47	12,6
10:57	12,7
11:07	12,8
11:17	12,8

18/10/2020	
Vo	12,0 V
HORA INICIO 11:40	
T (hr)	V (Volts)
11:40	12
11:50	12,6
12:00	12,8
12:10	12,8
12:20	12,8
12:30	12,9
12:40	12,9

Voltaje en funcion del tiempo

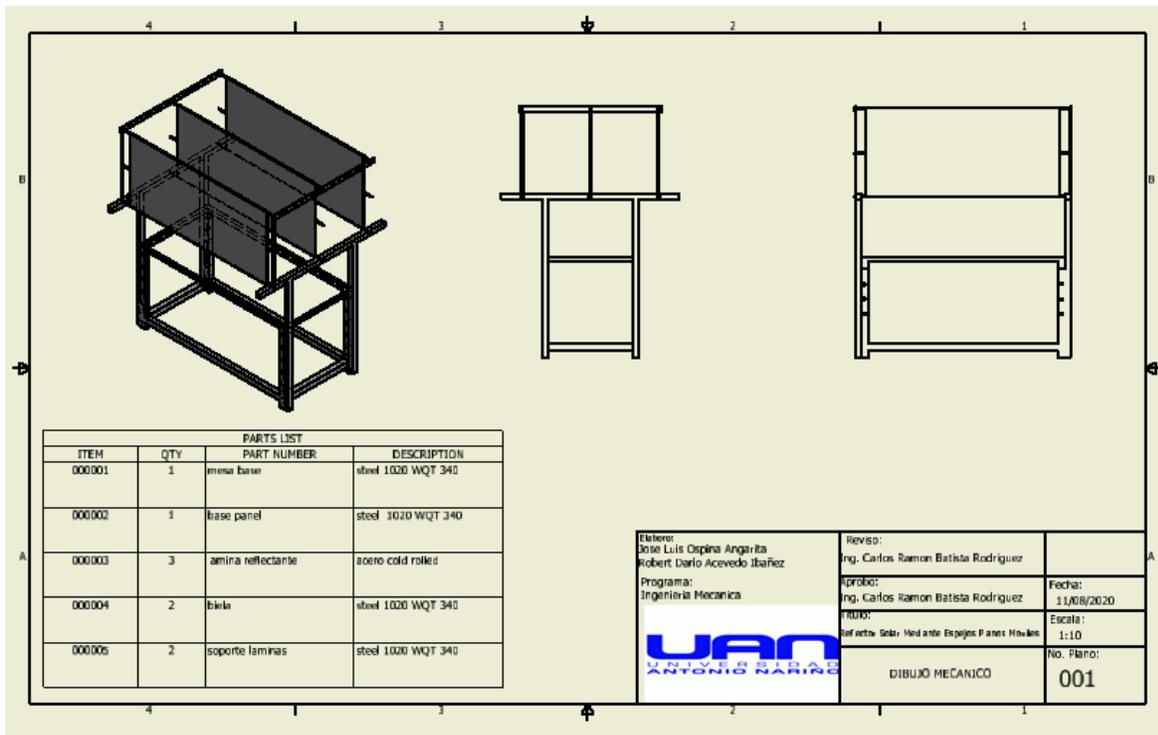


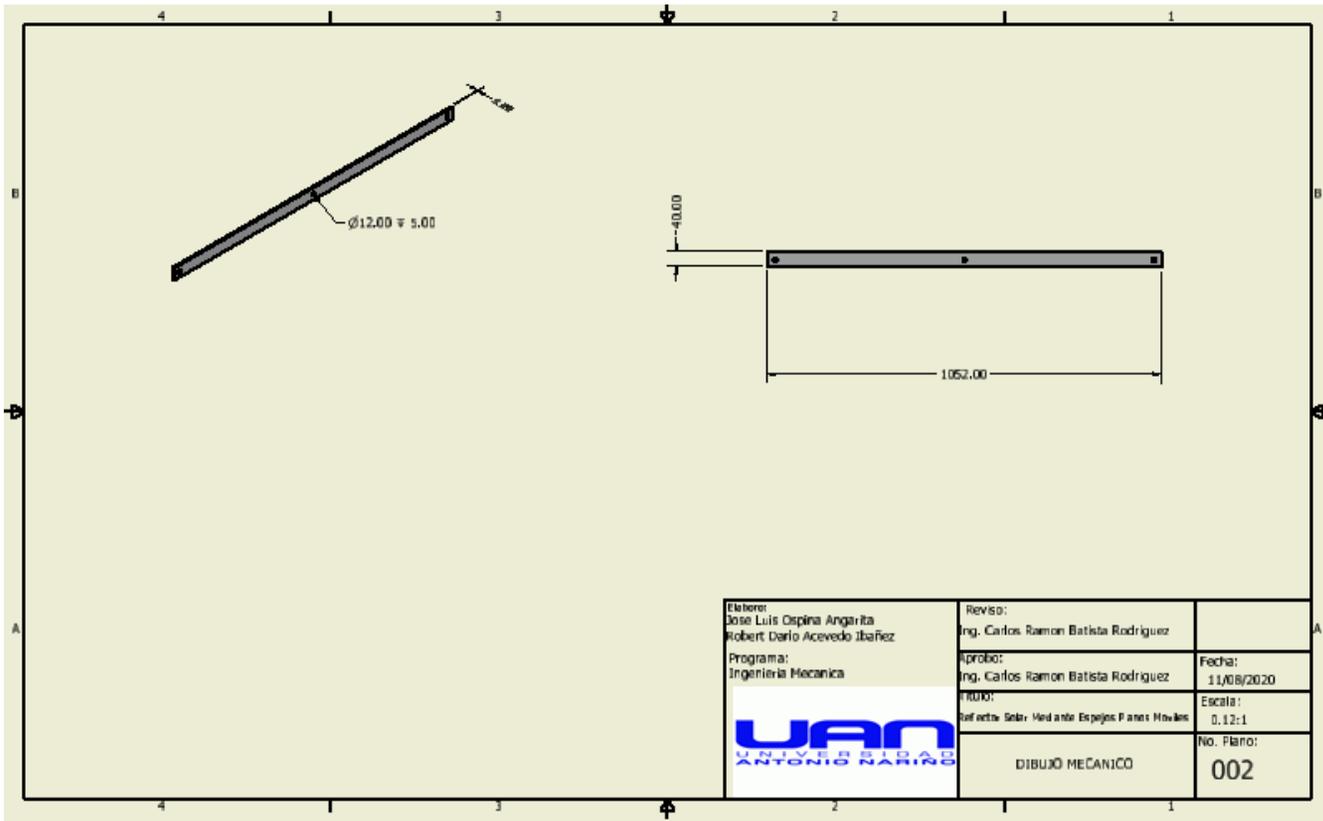
Voltaje en funcion del tiempo



## A. Anexo:

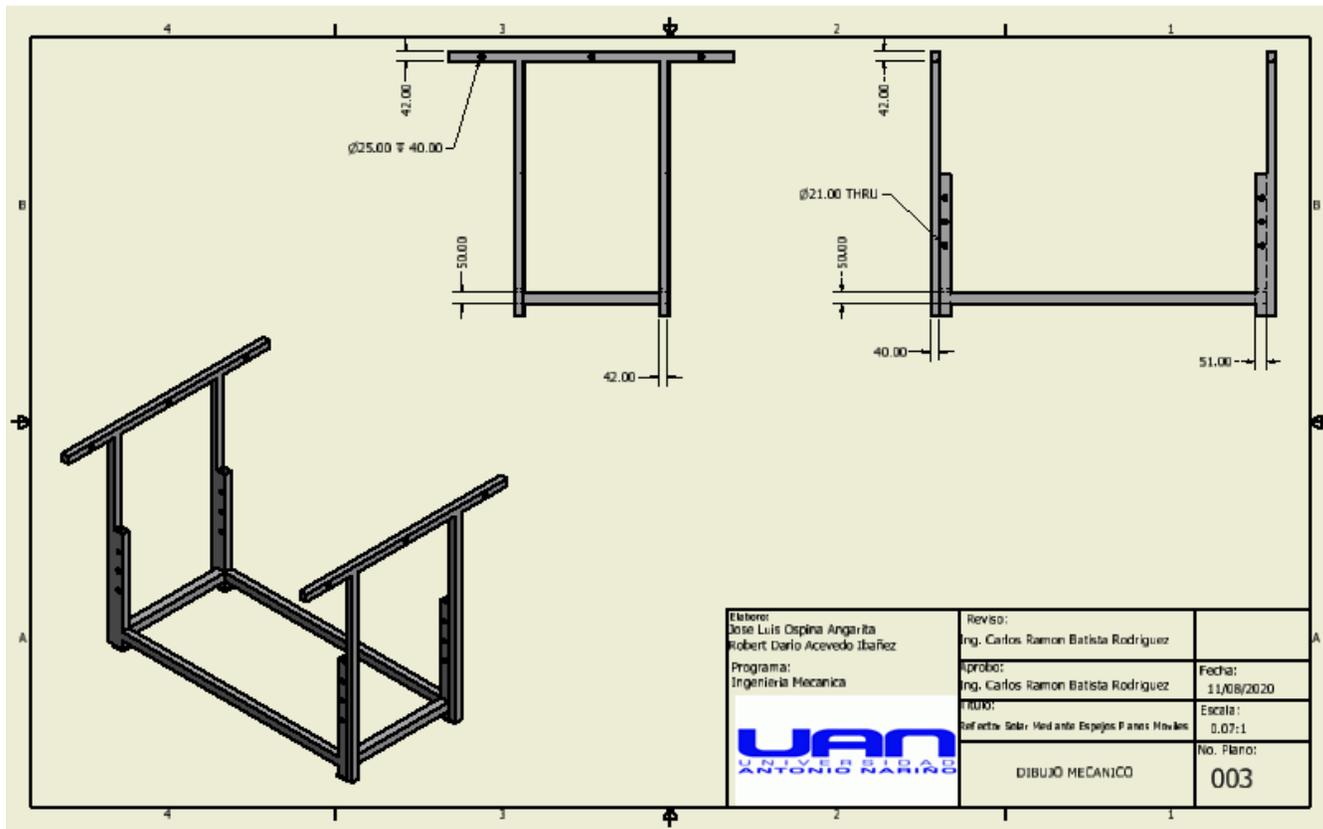
### Planos Estructura Reflector Solar Mediante Espejos Planos Móviles

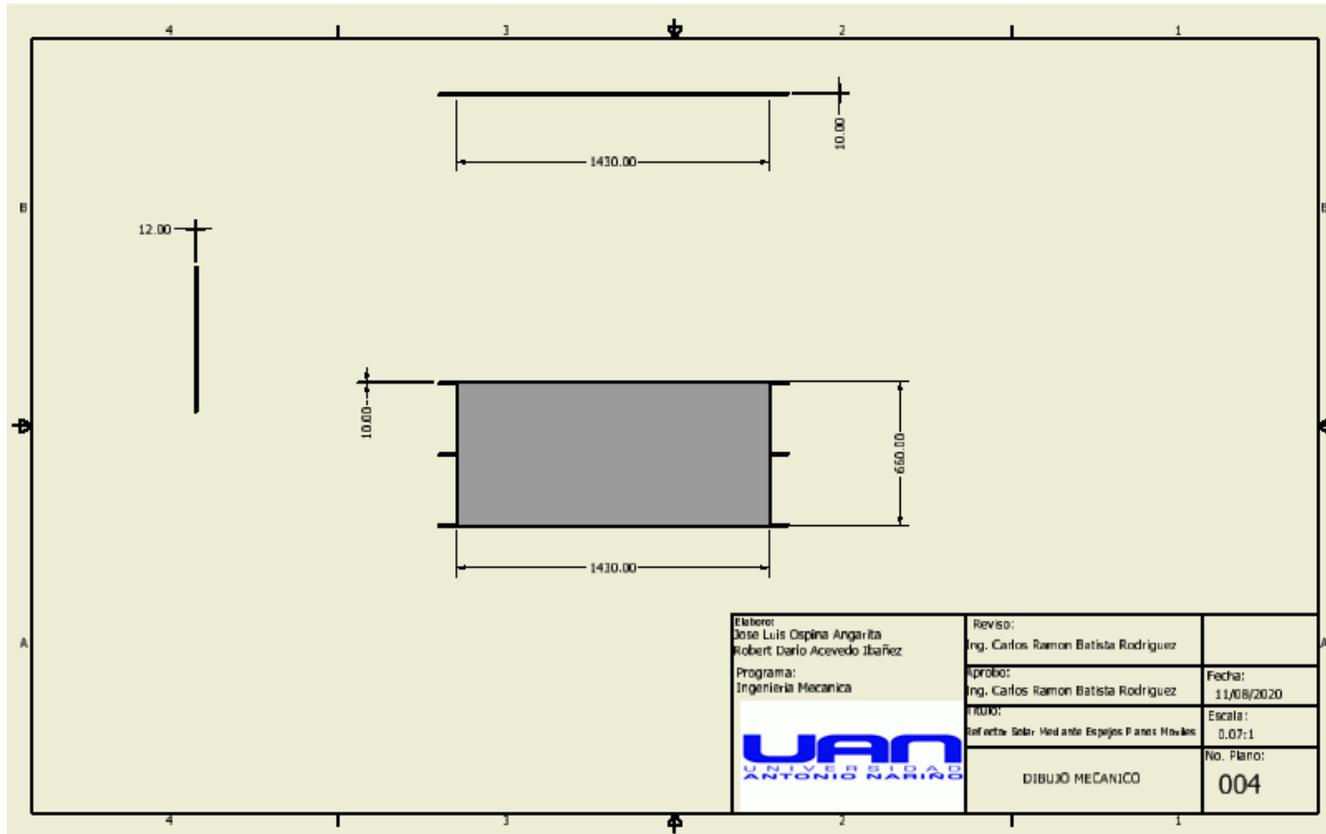


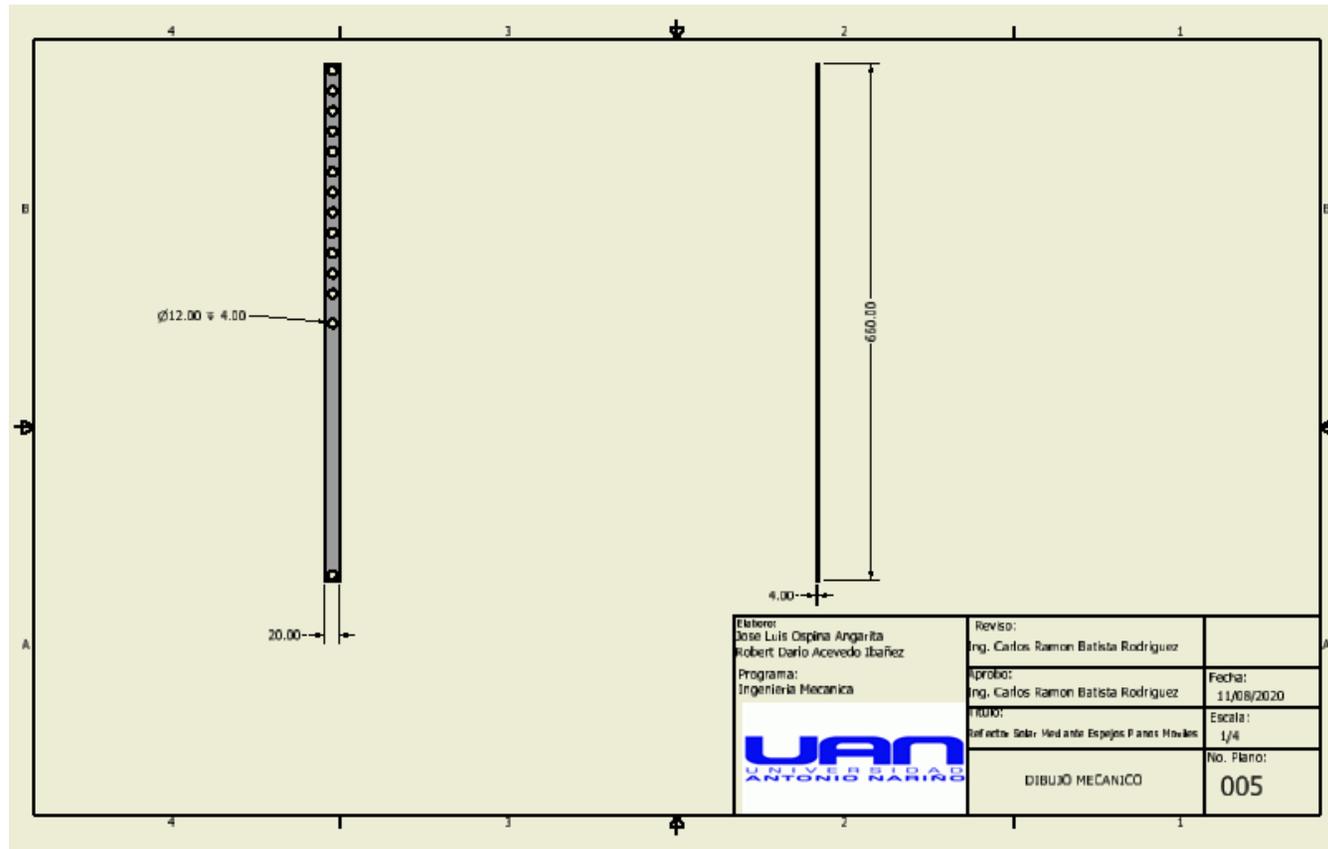


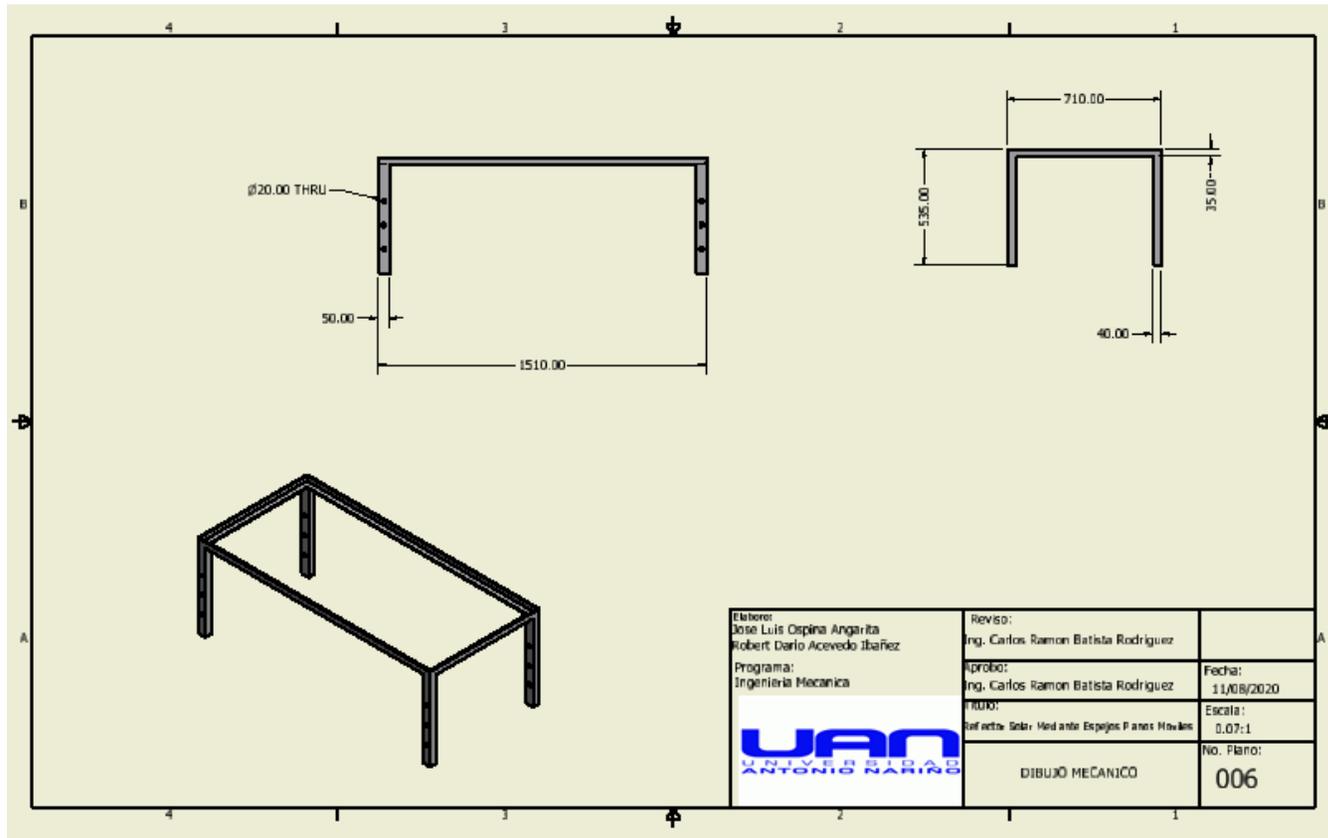
Elabores: José Luis Ospina Angarita Robert Darío Acevedo Ibañez	Revisó: Ing. Carlos Ramon Batista Rodriguez	
Programa: Ingeniería Mecánica	Aprobó: Ing. Carlos Ramon Batista Rodriguez	Fecha: 11/08/2020
TÍTULO: Reflector Solar Mediante Espejos Planos Móviles		Escala: 0.12:1
DIBUJO MECANICO		No. Plano: 002

**UAN**  
 ANTONIO NARIÑO









**B. Anexo:****Fichero con los datos del albedometro**

Dia	Hora	Ti	G(mv/m2)	Ga(mv)	G(W/m2)	Ga(W/m2)
2020/09/27	14:07:28	20.9	4.994	1.847	379.19514	140.242976
2020/09/27	14:09:28	20.9	4.827	1.82	366.514806	138.192863
2020/09/27	14:11:28	20.9	5.046	1.876	383.143508	142.444951
2020/09/27	14:13:28	20.9	5.36	2.016	406.985573	153.075171
2020/09/27	14:15:28	20.89	6.011	2.325	456.416097	176.537585

---

Dia	Hora	Ti	G(mv/m2)	Ga(mv)	G(W/m2)	Ga(W/m2)
2020/10/03	10:35:28	16.74	9.684	3.389	735.307517	257.327259
2020/10/03	10:37:28	16.82	9.581	3.34	727.486712	253.606682
2020/10/03	12:13:28	18.98	7.144	2.716	542.444951	206.226272
2020/10/03	12:15:28	19	13.778	5.777	1046.16553	438.648443
2020/10/03	13:49:28	20.47	7.373	2.841	559.832954	215.71754
2020/10/03	13:51:28	20.53	8.211	3.231	623.462415	245.330296

---

Dia	Hora	Ti	G(mv/m2)	Ga(mv)	G(W/m2)	Ga(W/m2)
2020/10/04	10:13:28	16.05	6.342	2.237	481.548975	169.855733
2020/10/04	10:15:28	16.1	5.691	1.996	432.118451	151.556568
2020/10/04	10:17:28	16.15	5.577	1.951	423.462415	148.139711
2020/10/04	11:39:28	17.41	15.446	6.224	1172.81701	472.589218
2020/10/04	11:41:28	17.43	8.506	3.131	645.861807	237.737282
2020/10/04	13:07:28	17.55	3.525	1.226	267.653759	93.0903569
2020/10/04	13:09:28	17.57	3.539	1.247	268.716781	94.6848899

Dia	Hora	Ti	G(mv)	Ga(mv)	G(W/m2)	Ga(W/m2)
2020/10/10	14:38:28	21.37	3.099	1.235	235.308	93.774
2020/10/10	14:40:28	21.46	7.882	3.628	598.481	275.475
2020/10/11	10:30:28	16.71	8.739	3.044	663.554	231.131
2020/10/11	10:32:28	16.8	13.221	4.554	1003.872	345.786
2020/10/11	11:56:28	18.58	5.652	2.061	429.157	156.492
2020/10/11	11:58:28	18.62	11.942	4.893	906.758	371.526
2020/10/11	13:16:28	19.81	7.192	2.728	546.090	207.137
2020/10/11	13:18:28	19.86	16.8	7.513	1275.626	570.463
2020/10/11	14:38:28	21.04	9.673	4.476	734.472	339.863
2020/10/11	14:40:28	21.07	10.962	5.215	832.346	395.976
2020/10/11	14:42:28	21.12	10.737	5.153	815.262	391.268
2020/10/12	09:08:28	15.24	4.907	1.778	372.589	135.004
2020/10/12	09:10:28	15.32	4.471	1.589	339.484	120.653
2020/10/12	09:12:28	15.39	3.901	1.327	296.203	100.759

## **Bibliografía:**

Swaan. (2019). *Solar panel-instruction manual*.

Machado, N., Bonzon, H., Escalona, C., Lussón, A., & Leysdian, L. (2014). *Solar tracker, optimizing ofimprovementof the solar energy*.

LEDESMA, J., Reynaldo, SÁNCHEZ, R., & LÓPEZ, H. (2016). *Análisis dinámico estructural de un helióstato concentrador de energía solar*.

*Global solar atlas*. (2020). <https://globalsolaratlas.info/map?c=5.504589,-73.359833,10&s=5.533978,-73.353653&m=site>

Vargas, F. (2005). *LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL COMO FACTOR DETERMINANTE DE LA SALUD*.

T, D., & G, C. (s. f.). *Instalaciones solares fotovoltaicas*.

*NREL data viewer*. (2020).

[https://www.solaranywhere.com/?gclid=Cj0KCQjwreT8BRDTARIsAJLI0KJ86s4\\_Jw5aMShQ6dMzrHvy26-muVshg3QEjoNVP9fS8MQ8eMr1cqcaAv64EALw\\_wcB](https://www.solaranywhere.com/?gclid=Cj0KCQjwreT8BRDTARIsAJLI0KJ86s4_Jw5aMShQ6dMzrHvy26-muVshg3QEjoNVP9fS8MQ8eMr1cqcaAv64EALw_wcB)

Di Lascio, M., & dos Santos, V. (1996). *MONITORING OF TOTAL SOLAR RADIATION USING SOLAR ARRAY*.

Jakhrani, A., Othman, A., & Samo, R. (2010). *A simple method for the estimation of global solar radiation from sunshine hours and other meteorological parameters*.

Duffie, J., & Beckman, W. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes, 4th Edition ,2013 by John Wiley & Sons*.

Garcia, Y., Diaz, O., & C, A. (2015). *Performance of a solar PV tracking system on tropic regions*.

H. Reif, J. (2011). *Design and Analysis of a High-Efficiency, Cost-Effective Solar Concentrator*.

Vidriales, L. (2007). *Colector de Canal Parabólico para la Generación Directa de Vapor para Calor de Proceso*.

Estrada, & Figueredo. (2019). *Desarrollo de un concentrador solar parabólico compuesto*. UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO.

Collado, J., & Joaquin, G. (2013). *Sistema, procedimiento y programa informático de calibración de posicionamiento de los espejos en heliostatos*.

Iriarte, C. (2013). *Automatización de sistema de control para campo de helióstatos*.

Eliseo, S. (2018). *Componentes de un panel solar fotovoltaico*.

Cabanillas, P. (2008). *Seguidor solar a dos ejes*.

Kenneth W, S. (1986). *AUTOMATIC HELIOSTAT TRACK ALIGNMENT METHOD*.

Finot, M. A., & Wells, J. (2011). *Superficie reflectante para colector de energía solar*.

López, J., Murcia, E., Iñesta, D., & Murcia, P. (2012). *Helióstato con un eje de accionamiento apuntando al objetivo, Sensor de Reflexión y Control en lazo cerrado*.

Quero, J., & Rodríguez, M. (2013). *Sistema para el posicionamiento de una superficie reflectante respecto del Sol mediante el uso de un sensor solar en la luz reflejada*.

Noto, H. (1986). *Reflective Solar Tracking System*.

Leary, P. (2014). *Solar Module Integration System*.