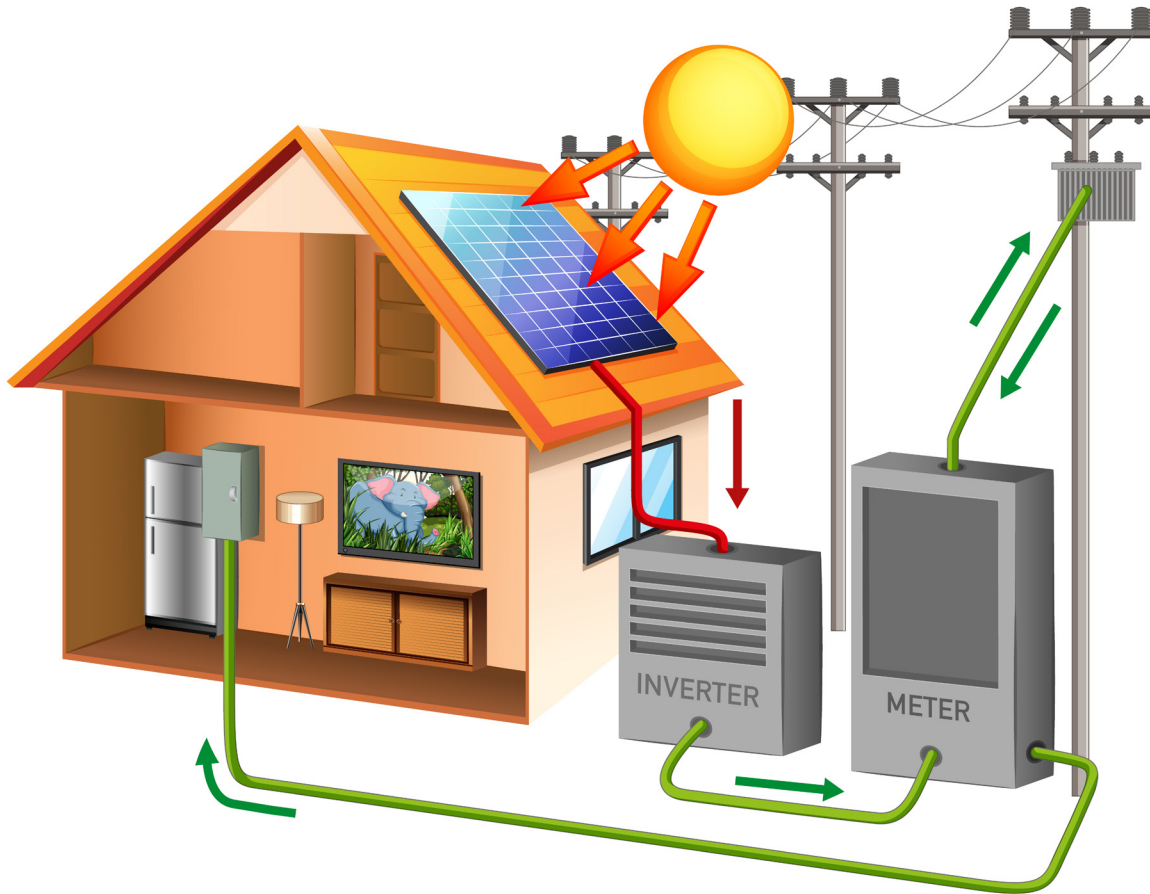




Conceptualización y análisis de los sistemas de seguimiento solar.

Conceptualization and analysis of solar tracking systems.

Arenas, Daniel

Tecnólogo en Electrónica (en formación) Sena– Centro Industrial del Mantenimiento Integral (CIMI) Giron, Santander, Colombia.
dnarenas4@miSena.edu.co móvil:
Móvil: 3164429847

Chacón-Pinzón, Enrique

Ingeniero Eléctrico, Instructor Sennova en CIDM, Floridablanca Santander. Líder del grupo de investigación Vestigium. Líder del "Semillero de Ciencias y Tecnologías Promisorias del Sena", Promisum. enchaconp@Sena.edu.co Móvil: 3123156258

Resumen

Este documento presenta una conceptualización acerca de los sistema de seguimiento solar, los tipos de seguidores solares que hay en el mercado, que ventajas y desventajas posee cada uno y se comparan los diferentes sistemas de seguidores solares basados en pruebas realizadas alrededor del mundo. Luego de seguido este análisis, se puede concluir cual es el tipo de seguidor solar que mejor se adapta a las distintas necesidades de cada sitio. Igualmente se hace una descripción de la construcción de un prototipo de seguidor solar donde se comparten aspectos constructivos con las debidas conclusiones basadas en la investigación y experimentación.

1.0 Introducción

Un sistema fotovoltaico es un método de extracción de energía limpio y renovable que consiste en absorber la radiación solar y transformarla en electricidad. Este sistema basa su funcionamiento en células solares, en las cuales se genera un flujo de electrones debido a la incidencia de fotones sobre ellas. El conjunto de estas células solares forma los comúnmente llamados paneles solares, con los cuales la extracción de energía se hace en una cantidad mayor y por ende se vuelve más útil. (Schmalensee, 2015).

Decir que un sistema de extracción de energía basa su funcionamiento en la radiación del sol, da por entendido que la eficiencia del sistema (energía eléctrica suministrada por el panel / energía luminosa en condiciones estándar) depende de la cantidad de radiación solar que

Summary

This document presents a conceptualization about the solar tracking system, the types of solar trackers that exist in the market, which advantages and disadvantages has and compares the different solar tracking systems based on tests carried out around the world. After following this analysis, we can conclude which is the type of solar tracker that best adapts to the different needs of each site. Likewise, a description of the construction of a prototype solar tracker is made where constructive aspects are shared with the appropriate conclusions based on research and experimentation.

1.0 Introduction

A photovoltaic system is a method of extracting clean and renewable energy that consists of absorbing solar radiation and transforming it into electricity. This system bases its operation on solar cells, in which a flow of electrons is generated due to the incidence of photons on them. The set of these solar cells forms the so-called solar panels, with which the extraction of energy is done in a larger amount and therefore becomes more useful. (Schmalensee, 2015).

To say that an energy extraction system bases its operation on the radiation of the sun, it is understood that the efficiency of the system (electric power supplied by the panel / light energy under standard conditions) depends on the amount of solar radiation that effectively affects the its receivers, in addition to other considerations such as temperature and cell technology. This amount depends on the angle of incidence of the sun with respect to the axis

incide efectivamente sobre sus receptores, además de otras consideraciones como temperatura y tecnología de las celdas. Esta cantidad depende del Angulo de incidencia del sol respecto del eje perpendicular al colector siendo el mejor de los casos el de un ángulo de 0 grados y el peor un ángulo demasiado grande (ley del coseno). Esta es la principal razón del porque implementar un sistema que permita mantener los paneles solares en una posición perpendicular al sol de manera constante. (Lin, Panchangam, Liu, & Lin, 2019).

2.0 Seguidores solares

Los sistemas de seguimiento solar están diseñados y desarrollados para aumentar la cantidad de radiación solar recibida por los dispositivos fotovoltaicos.

(Eldin, Abd-Elhady & Kandil, 2016).

La razón de ser de los seguidores solares es bastante sencilla, pero quien los emplea termina viéndolos como parte esencial de su sistema fotovoltaico; la inclusión de un seguidor solar es el deseo de un propietario por convertir la mayor cantidad de energía posible (hay métodos electrónicos dentro del sistema fotovoltaico para aprovechar un máximo de potencia “MPPT” (Martin, Vázquez & Cano, 2018), pero eso es un sistema aparte del seguidor solar) y que con dicho seguidor logra aumentar la eficiencia de su sistema fotovoltaico, por ello desde hace décadas se hacen estudios y diseños para emplear los seguidores solares. (Zogbi & Laplace, 1984).

Según varios estudios, un porcentaje del 10% al 50% de energía solar se puede recuperar con un sistema fotovoltaico que rastrea el sol en

perpendicular to the collector, the best being an angle of 0 degrees and the worst an angle too large (law of cosine). This is the main reason why to implement a system that allows to keep the solar panels in a position perpendicular to the sun in a constant manner. (Lin, Panchangam, Liu, & Lin, 2019).

2.0 Solar trackers

Solar tracking systems are designed and developed to increase the amount of solar radiation received by photovoltaic devices. (Eldin, Abd-Elhady & Kandil, 2016).

The rationale of solar trackers is quite simple, but who uses them ends up seeing them as an essential part of their photovoltaic system; the inclusion of a solar tracker is the desire of an owner to convert as much energy as possible (there are electronic methods within the photovoltaic system to take advantage of maximum power “MPPT” (Martin, Vázquez & Cano, 2018), but that is a system apart from the solar tracker) and that with this follower manages to increase the efficiency of its photovoltaic system, for that reason studies and designs have been made for decades to use solar trackers. (Zogbi & Laplace, 1984).

According to several studies, a percentage of 10% to 50% of solar energy can be recovered with a photovoltaic system that tracks the sun instead of a fixed-angle photovoltaic system. (Motahhir, Hammoui, Ghzizal & Derouich 2019).

Solar tracking systems can be divided into three classes:

- Active tracking system
- Passive tracking system
- Chronological tracking system

vez de con un sistema fotovoltaico con ángulo fijo. (Motahir, Hammoumi, Ghizal & Derouich 2019).

Los sistemas de seguimiento solar se pueden dividir en tres clases:

- Sistema de seguimiento activo
- Sistema de seguimiento pasivo
- Sistema de seguimiento cronológico

A su vez cada clase de sistema de seguimiento puede tener diferentes grados de libertad:

- Seguidor un eje.
- Seguidor de dos ejes.

2.1 Clasificación según su tipo de seguimiento

Tomando en cuenta la tecnología usada para hacer seguimiento al sol, se puede hablar de varios tipos de seguimientos, a continuación se mencionan.

2.1.1 Sistema de seguimiento activo

Es seguramente el sistema de seguimiento más estudiado y utilizado en comparación con los otros sistemas de seguimiento.

Es un sistema electrónico que se basa en un controlador (PIC, Arduino, PLC, etc...) el cual toma como referencia señales de voltaje entregadas por sensores ópticos para dar instrucción a los motores que mueven los paneles. Este sistema hace un monitoreo constante al sol. El sistema tiene que contar con dos o más sensores para poder hacer una comparación de valores y así determinar cuál es el lado más luminoso; al tener

At the same time, each kind of tracking system can have different degrees of freedom:

- Follower an axis.
- Follower of two axes.

2.1 Classification according to their type of tracking

Taking into account the technology used to track the sun, you can talk about several types of tracking, below are mentioned.

2.1.1 Active tracking system

It is surely the most studied and used tracking system compared to the other tracking systems. It is an electronic system that is based on a controller (PIC, Arduino, PLC, etc ...) which takes as reference voltage signals delivered by optical sensors to give instruction to the motors that move the panels. This system monitors the sun constantly. The system has to have two or more sensors to make a comparison of values and thus determine which is the brightest side; to have clear the microcontroller which is the side on which more is incident light, this gives order to the engine so that the panel turns to that place. When tracking based on the light received, accuracy is lost on days when the sky is covered with clouds, as the difference in intensity between each sensor is low and it becomes difficult to make a decision; This is why it is important to monitor the system frequently, as dirt on the sensors could cause the controller to make a wrong decision.

claro el microcontrolador cual es el lado en que más está incidiendo la luz, este da orden al motor para que gire el panel hacia ese lugar.

Al hacer un seguimiento en base a la luz recibida se pierde precisión en los días en que el cielo este cubierto de nubes, pues la diferencia de intensidad entre cada sensor es baja y se vuelve difícil el tomar una decisión; por esto se vuelve importante hacerle un monitoreo frecuente al sistema, pues una suciedad en los sensores podría ocasionar una decisión errada del controlador.

2.1.2 Sistema de seguimiento pasivo

También llamado “seguidor de funcionamiento térmico”, es un sistema completamente dependiente del calor solar para tener un punto de guía y así mover el seguidor. (Parmar, Parmar & Gautam, 2015)

Por lo general el material usado es un fluido, líquido o gas. Hafez et al. (2018) definieron su funcionamiento así: “El sistema de seguimiento solar pasivo se basa en un fluido de gas comprimido de bajo punto de ebullición, que hace que la estructura del rastreador se mueva a un desequilibrio”. En otras palabras, el fluido se encuentra en un estado de bajo punto de ebullición y al estar dirigiéndose de un lado a otro mueve el seguidor, esto sucede por el desbalance que le crea el calor solar.

Para los casos en los que se requiere alta precisión, los sistemas de seguimiento pasivos no suelen ser usados. Su utilidad se da más en sistemas fotovoltaicos comunes.

Clifford y Eastwood (2004) diseñaron un seguidor solar pasivo activado por tiras bimetálicas de aluminio / acero y controlado mediante un

2.1.2 Passive monitoring system

Also called “follower of thermal operation”, is a system completely dependent on solar heat to have a point of guidance and thus move the follower. (Parmar, Parmar & Gautam, 2015).

In general, the material used is a fluid, liquid or gas. Hafez et al. (2018) defined its operation as follows: “The passive solar tracking system is based on a low-boiling compressed gas fluid, which causes the structure of the tracker to move to an imbalance.” In other words, the fluid is in a state of low boiling point and being directed from one side to another moves the follower, this happens because of the imbalance that creates solar heat.

For cases where high precision is required, passive tracking systems are not usually used. Its utility is given more in common photovoltaic systems.

Clifford and Eastwood (2004) designed a passive solar tracker activated by bimetal aluminum / steel strips and controlled by a viscous damper for use in equatorial regions. By computer, they predicted an increase in efficiency close to 23% on fixed photovoltaic systems, and in the experimental tests they did, they saw that the results obtained were very much in line with the prediction made by computer.

2.1.3 Chronological tracking system

It is not based on the light that is being given to the panel at the moment, nor does it consist in guiding the panel towards the brightest point through climatic variations; This tracking system uses geographic coordinates and a

amortiguador viscoso para uso en regiones ecuatoriales. Mediante computadora predijeron un aumento de eficiencia cercano al 23% sobre los sistemas fotovoltaicos fijos, y en las pruebas experimentales que efectuaron vieron que los resultados obtenidos iban muy de la mano con la predicción por hecha por computadora.

2.1.3 Sistema de seguimiento cronológico

No se basa en la luz que le está dando al panel en el momento, tampoco consiste en guiar al panel hacia el punto más luminoso por medio de las variaciones climáticas; este sistema de seguimiento utiliza coordenadas geográficas y una serie de conocimientos astronómicos que han sido programados en su controlador para saber en qué posición está el sol a lo largo del año.

Su funcionamiento se puede comparar al de un reloj, él ya tiene definida una trayectoria, y se encarga de seguirla sin tomar en cuenta lo que sucede a su alrededor.

Por medio de un sistema electrónico bastante complejo puede ser controlado con el fin de tener bastante exactitud o también se podría más sencillamente hacer que el motor gire unos 15° cada que pase una hora hasta realizar un giro completo de 180°. De igual forma podría ser parcialmente exacto, en cualquier caso necesitaría reiniciarse al final del día para estar en su posición de arranque a la mañana siguiente (Lee Chia-Yen et al, 2009).

Estos dispositivos de seguimiento tienen alta vulnerabilidad frente a descargas eléctricas y al ambiente, así como también su sistema de control resulta siendo más complejo que el de un seguidor activo basado en LDR por

series of astronomical knowledge that has been programmed in its controller to know in what position the sun is throughout the year.

Its operation can be compared to that of a clock, it has already defined a trajectory, and is responsible for following it without taking into account what is happening around it.

By means of a fairly complex electronic system it can be controlled in order to have enough accuracy or it could also be more simply to make the motor turn about 15 ° every one hour to complete a full turn of 180 °. Likewise it could be partially accurate, in any case it would need to be restarted at the end of the day to be in its starting position the next morning (Lee Chia-Yen et al, 2009).

These tracking devices have high vulnerability to electric shock and the environment, as well as their control system is more complex than an active follower based on LDR for example. In certain cases, it may require computer systems that are functioning permanently.

In cases in which the precision required must be exact this device is more advantageous than the rest, similarly it passes in distant latitudes to the equator, where its climate is much colder and have stronger winters, also in places that have enough cloudiness (Tamayo 2010).

Hybrid tracking systems have also been used, which combine the functioning of active followers with that of programmed chronological followers, all of this to give even greater effectiveness when it comes to tracking the best position of the panel in relation to the sun. (Tharamuttam & Ng, 2017).

ejemplo. En determinados casos puede que requiera de sistemas computacionales que estén funcionando de forma permanente.

En casos en que la precisión requerida deba ser exacta este dispositivo es más ventajoso que el resto, de igual forma pasa en latitudes lejanas al ecuador, donde su clima es mucho más frío y cuentan con inviernos más fuertes, también en sitios que tengan bastante nubosidad (Tamayo 2010).

También se han empleado sistemas de seguimiento híbridos, que combinan el funcionamiento de los seguidores activos con el de los seguidores programados – cronológicos, todo esto para dar una efectividad aun mayor al momento de rastrear la mejor posición del panel con relación al sol. (Tharamuttam & Ng, 2017).

2.2 Clasificación según sus grados de libertad

Los seguidores también se pueden clasificar según su tipo de movimiento, esto depende de la cantidad de ejes en los que consten; a continuación se describen los dos tipos de movimiento según sus grados de libertad. (Carballo, Bonilla, Roca & Berenguel 2018)

2.2.1 Seguidor de un eje

Tiene un solo grado de libertad para moverse. Por medio de un solo eje se hace la rotación de la superficie, siendo que puede ser tanto horizontal, vertical u oblicuo (Machado et al., 2015). Debido a que solo puede girar en un sentido, tiene la limitación de no hacerle un seguimiento completo al sol, puesto que solo puede seguir la azimut o la altura solar, pero no las dos. (Kalogirou, 1996)

Huang et al. (2011) descubrieron en

2.2 Classification according to their degrees of freedom

The followers can also be classified according to their type of movement, this depends on the number of axes in which they appear; The two types of movement are described below according to their degrees of freedom. (Carballo, Bonilla, Roca & Berenguel 2018)

2.2.1 Follower of an axis

It has only one degree of freedom to move. By means of a single axis the rotation of the surface is made, being that it can be either horizontal, vertical or oblique (Machado et al., 2015). Because it can only turn in one direction, it has the limitation of not following the sun completely, since it can only follow the azimuth or the solar height, but not both. (Kalogirou, 1996)

Huang et al. (2011) discovered in their research that the difference in the use of energy between a fixed photovoltaic system and one that consists of a solar tracker on one axis can be up to 35.6% more for the photovoltaic system that makes use of the tracker an axis.

2.2.2 Two-axis follower

It is characterized by being a follower who tracks the sun on two different axes using to rotate two turning points (Hafez et al., 2018). The axis that is fixed in the base of the follower is considered as the primary axis, and as for the axis that is in the upper part it is considered as secondary, it is generally perpendicular to the primary. A dual-axis

su investigación que la diferencia en el aprovechamiento de energía entre un sistema fotovoltaico fijo y uno que consta de un seguidor solar de un eje puede llegar a ser de hasta 35.6% más para el sistema fotovoltaico que hace uso del seguidor de un eje.

2.2.2 Seguidor de dos ejes

Se caracteriza por ser un seguidor que rastrea al sol en dos ejes diferentes utilizando para rotar dos puntos de giro (Hafez et al., 2018). Al eje que está fijo en la base del seguidor se le considera como eje primario, y en cuanto al eje que está en la parte superior se le considera como secundario, generalmente es perpendicular al primario. Un sistema de seguimiento de doble eje suele ser más preciso que un sistema de seguimiento de un solo eje, pero también requiere un sistema de control más complejo. (Sumathi et al., 2017)

Si se compara la insolación recibida en los paneles solares fijos con los de un panel que sea movido mediante un seguidor solar a doble eje, se observa un aumento de más del 50% de insolación solar por parte del seguidor a doble eje con respecto a los paneles fotovoltaicos con orientación horizontal fija, y en más del 30% de insolación con respecto a los paneles fotovoltaicos con orientación vertical fija, esto anterior observado en EE.UU por Kelly y Gibson (2009).

Kacira et al. (2004) investigaron de forma experimental el efecto que tenía en la ganancia de energía el contar con un seguidor solar de dos ejes, hicieron las pruebas correspondientes comparándolo con un sistema fotovoltaico fijo y descubrieron que el sistema fotovoltaico con seguidor de dos ejes daba una ganancia promedio diaria de 29.3% por encima del sistema

tracking system is usually more accurate than a single-axis tracking system, but it also requires a more complex control system. (Sumathi et al., 2017)

If you compare the insolation received in the fixed solar panels with those of a panel that is moved by a double-axis solar tracker, an increase of more than 50% of solar insolation is observed by the double-axis tracker with respect to the photovoltaic panels with fixed horizontal orientation, and in more than 30% of insolation with respect to photovoltaic panels with fixed vertical orientation, this was observed in the USA by Kelly and Gibson (2009).

Kacira et al. (2004) experimentally investigated the effect on energy gain of having a solar tracker with two axes, made the corresponding tests comparing it with a fixed photovoltaic system and discovered that the photovoltaic system with two-axis tracker gave a profit daily average of 29.3% above the fixed photovoltaic system; On a particular day in July, the difference in production of the system with two-axis tracker with respect to the fixed system came to 34.6%.

2.2.3 Comparison

The comparison between a tracker of an axis and a tracker of two axes can be described as that the tracker of an axle has the advantage of a lower cost and greater simplicity, with the disadvantage of more imprecision and a smaller uptake of solar energy with respect to the follower of two axes; As for the double-axis tracker, it is more accurate and more energy-efficient, but has a greater cost disadvantage than the single-axis tracker.

There is 42.57% of the studies analyzed that single-axis tracking systems are presented, while

fotovoltaico fijo; en un día en particular en el mes de julio la diferencia de producción del sistema con seguidor de dos ejes respecto al sistema fijo llegó a ser de un 34.6%.

2.2.3 Comparación

La comparación entre un seguidor de un eje y uno de dos ejes puede describirse como que el seguidor de un eje tiene la ventaja de un menor costo y mayor simplicidad, con la desventaja de mas imprecisión y una captación menor de energía solar respecto al seguidor de dos ejes; en cuanto al seguidor de doble eje este consta con mayor precisión y más captación de energía, pero tiene como desventaja un costo mayor que el seguidor de un solo eje.

Hay un 42,57% de los estudios analizados que se presentan sistemas de seguimiento de un solo eje, mientras que el 41,58% de estos estudios se aplican a los sistemas de seguimiento de dos ejes. Esto lleva a que la diferencia entre el seguimiento de un solo eje y los ejes duales estén muy cerca porque la ganancia de la potencia de salida aumenta también por los aumentos de costo. (Hafez et al., 2018, p.780)

Los investigadores citados anteriormente concluyeron que instalar un seguidor solar de un eje no tenía mayor diferencia a instalar uno de dos ejes, porque la ganancia generada por el seguidor de doble eje no resultaba tan justificable frente a los aumentos de costos que requiere un seguidor de estas características.

3.0 Normativa

Actualmente en Colombia hay unas características técnicas y normas exigidas a la hora de contar con un sistema fotovoltaico. Estas se encuentran en el Código Eléctrico Colombiano

41.58% of these studies are applied to two-axis tracking systems. This leads to the difference between the tracking of a single axis and the dual axes being very close because the gain of the output power also increases because of the cost increases. (Hafez et al., 2018, p.780)

The aforementioned researchers concluded that installing a single-axis solar tracker did not make much difference to installing one of two axes, because the gain generated by the double-axis tracker was not as justifiable in the face of the cost increases required by a tracker of these axes. characteristics.

3.0 Regulations

Currently in Colombia there are some technical characteristics and standards required when it comes to having a photovoltaic system. These are found in the Colombian Electric Code NTC 2050 (there are 23 NTCs related to the use of solar systems for thermal or electric energy use, some specify terms, uses, tests of optimal usability, implementation guides in rural and urban areas, among others), the safety requirements of the RETIE Electrical Installations Technical Regulations must also be met. Added to this, there is also a universal technical standard for photovoltaic systems, which is itself a summary of standards from different countries that top the list of countries with the most solar production (Arrieta et al., 2018).

The IEC 62817: 2014 certification "Photovoltaic systems - Design qualification of solar trackers", is the specific standard for photovoltaic tracking systems, with which the quality of relevant components and the whole of the follower is

NTC 2050 (son 23 NTC relacionadas con el uso de sistemas solares para uso térmico o energía eléctrica, en algunas se especifican términos, usos, pruebas de usabilidad óptima, guías de implementación en zonas rurales y urbanas, entre otras), también se debe cumplir con las exigencias de seguridad del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE. Agregado a esto, también existe una Norma técnica universal para sistemas fotovoltaicos, la cual es en sí un sumario de normas de distintos países que encabezan el listado de los países con más producción solar (Arrieta et al., 2018).

La certificación IEC 62817:2014 “Photovoltaic systems – Design qualification of solar trackers”, es la norma específica para sistemas de seguimiento fotovoltaicos, con la que se evalúa la calidad de componentes relevantes y el conjunto del seguidor; esta norma internacional permite certificar seguidores solares para aplicaciones fotovoltaicas considerando tanto la precisión como la durabilidad. (Sallaberry, Pujol-Nadal, Larcher, & Rittmann-Frank 2015)

4.0 Planeación y construcción de un seguidor solar inteligente

Se propuso la tarea de construir un seguidor solar con sistema de seguimiento activo y libertad de movimiento a dos ejes. Para saber la ubicación del sol y encontrar la posición con más luminosidad recibida se usaron fotorresistencias (LDR); se dio uso de un servomotor para girar el panel en sentido vertical, de igual forma se empleó en el sentido horizontal.

Todo se controla mediante un Arduino UNO, que se encarga de ser quien dirige a los servomotores en base a las lecturas de las fotorresistencias.

Figura 1: Servomotores, Arduino y sensores usados.

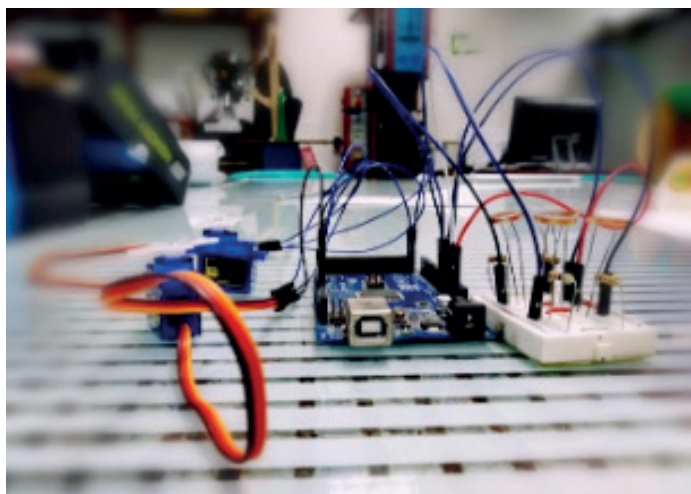
evaluated; This international standard allows certifying solar trackers for photovoltaic applications considering both accuracy and durability. (Sallaberry, Pujol-Nadal, Larcher, & Rittmann-Frank 2015)

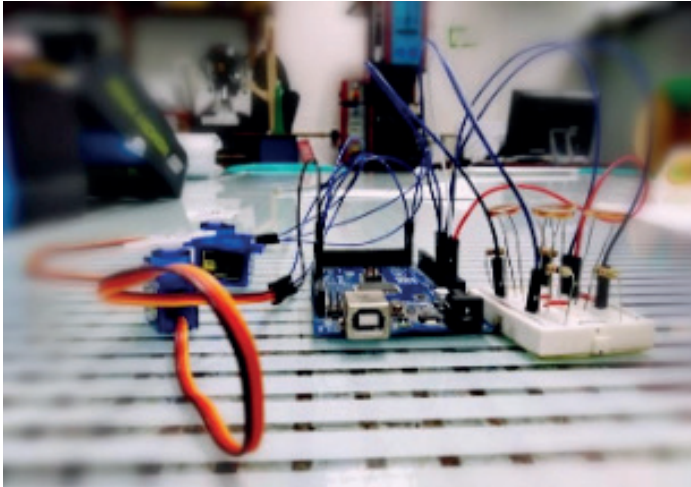
4.0 Planning and construction of a smart solar tracker

The task of building a solar tracker with active tracking system and freedom of movement to two axes was proposed. To know the location of the sun and find the position with the most luminosity received, photoresistors (LDR) were used; A servomotor was used to rotate the panel vertically, similarly it was used in the horizontal direction.

Everything is controlled by an Arduino UNO, which is in charge of being the one who directs the servomotors based on the readings of the photoresistors.

Figure 1: Servo motors, Arduino and sensors used. Source:





Fuente: José Gregorio Beltrán (2018)

Suministro de materiales para el prototipo: Ing. José Beltrán – Sena CIDM.

Software

Arduino es un sistema de código abierto (Open Source) que permite programar el chip de manera que el usuario desee. Basándonos en esto dimos uso de un Arduino UNO para leer las señales de los LDR, que estuvieron dispuestos de la siguiente manera:

Un LDR para la parte superior izquierda (LDRIS), uno para la parte superior derecha (LDRDS), uno para la parte inferior izquierda (LDRIL) y el último para la parte inferior derecha (LDRDI). Se dispuso de una estructura que separara los LDR de forma de que la única manera en la cual estas fotorresistencias dieran una señal igual, o por lo menos muy parecida, fuera que tuvieran la luz exactamente encima de ellas, siendo esto una forma para guiar al Arduino. Cada LDR da una salida con señal analógica, la cual llega a los pines analógicos del Arduino uno (A0, A1, A2, A3).

José Gregorio Beltrán (2018)

Supply of materials for the prototype: Ing. José Beltrán - Sena CIDM.

Software

Arduino is an open source system that allows you to program the chip in a way that the user wants. Based on this, we used an Arduino UNO to read the LDR signals, which were arranged as follows:

One LDR for the upper left (LDRIS), one for the upper right (LDRDS), one for the lower left (LDRIL) and the last for the lower right (LDRDI). There was a structure that separated the LDR so that the only way in which these photoresistors gave an equal signal, or at least very similar, was that they had the light exactly above them, this being a way to guide the Arduino. Each LDR gives an output with analog signal, which reaches the analog pins of the Arduino one (A0, A1, A2, A3).

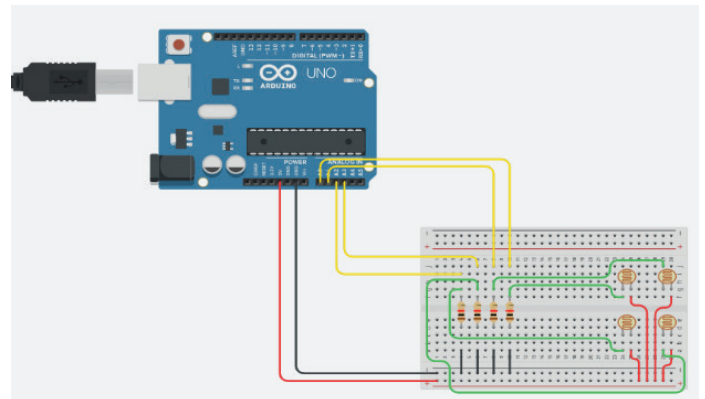


Figure 2: connection of the sensors with the Arduino. Source: self made.

The average values for each coordinate were extracted, explained as follows

Left-side signal value equal to: (LDRIS x LDRIL)

Conceptualización y análisis de los sistemas de seguimiento solar.

Conceptualization and analysis of solar tracking systems.

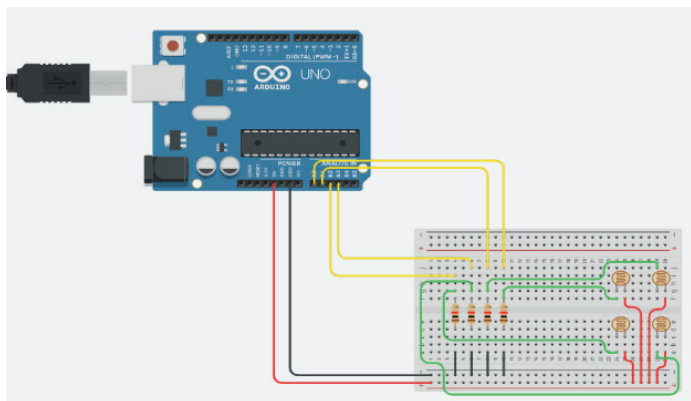


Figura 2: conexión de los sensores con el Arduino. Fuente: Elaboración propia.

Se sacaron los valores promedio por cada coordenada, explicado de la siguiente manera

Valor de señal del lado izquierdo igual a: $(LDRIS \times LDRII) / 2$.

Valor de señal del lado derecho igual a: $(LDRDS \times LDRDI) / 2$.

Valor de señal del lado superior igual a: $(LDRIS \times LDRDS) / 2$.

Valor de señal del lado inferior igual a: $(LDRII \times LDRDI) / 2$.

En el momento en que el valor del lado izquierdo sea superior al valor del lado derecho el microcontrolador dirige al servomotor hacia el lado izquierdo, pues es el lado que más luz está recibiendo. De esta forma se hace con cada una de las coordenadas para asegurar que el panel esté de manera constante en la posición más luminosa.

/ 2.

Signal value on the right side equal to: $(LDRDS \times LDRDI) / 2$.

Signal value of the upper side equal to: $(LDRIS \times LDRDS) / 2$.

Signal value of the lower side equal to: $(LDRII \times LDRDI) / 2$.

As soon as the value on the left side is greater than the value on the right side, the microcontroller directs the servo motor to the left side, since it is the side that is receiving the most light. This is done with each of the coordinates to ensure that the panel is constantly in the most luminous position.

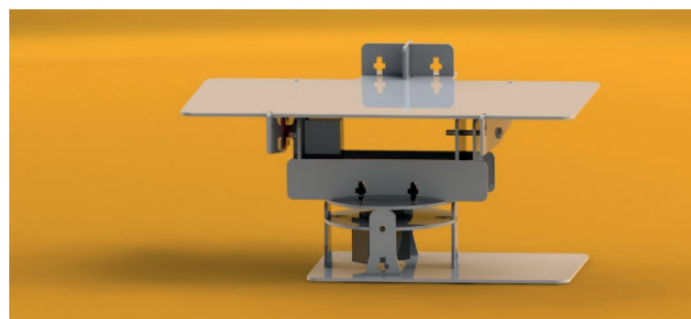


Figure 3: horizontal view of the follower. Source: Víctor Sarmiento Sena - CIDM (2018)

The design was based on an existing solar tracker prototype, shared at <https://browndoggadgets.dozuki.com>

This follower has a freedom of movement of more than 150° horizontally and vertically, its reaction speed at the time of a change of light is very fast, as well as effective.

During various tests that were done to him, we noticed that when receiving sunlight on his sensors, it is very difficult to deviate due to external lights of reflectors or lanterns, although

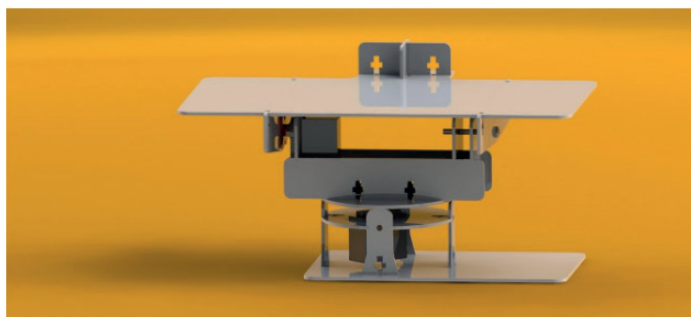


Figura 3: vista horizontal del seguidor. Fuente: Víctor Sarmiento Sena – CIDM (2018)

El diseño se basó en un prototipo de seguidor solar ya existente, compartido en <https://browndoggadgets.dozuki.com>

Este seguidor cuenta con una libertad de movimiento de más de 150° en sentido horizontal y vertical, su velocidad de reacción al momento de un cambio de luz es muy rápido, así como también efectivo.

Durante distintas pruebas que se le hicieron notamos que al momento de estar recibiendo la luz solar sobre sus sensores, muy difícilmente se llega a desviar debido a luces externas de tipo reflectores o linternas, aunque a medida que la luz solar tiende a bajar, el seguidor se hace más vulnerable a ser engañado mediante algún tipo de luz artificial.

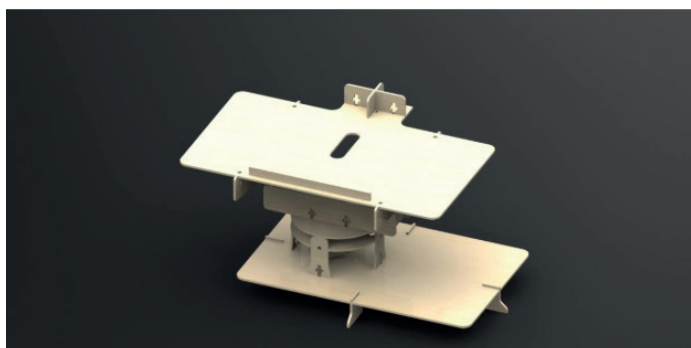


Figura 4: Render final del prototipo. Fuente: Víctor Sarmiento Sena – CIDM (2018)

as sunlight tends to decrease, the follower he becomes more vulnerable to being tricked by some kind of artificial light.

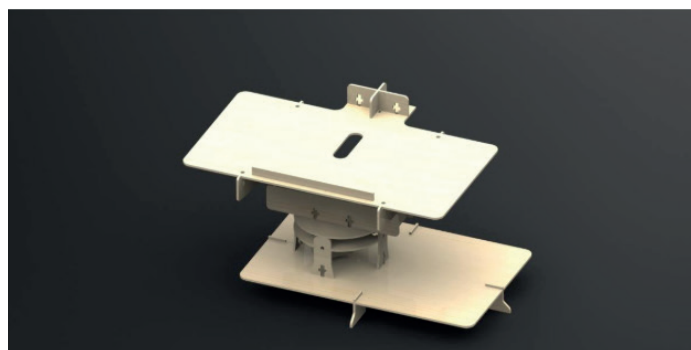


Figure 4: Final prototype rendering. Source: Víctor Sarmiento Sena - CIDM (2018)



Image 5: tests with the prototype finalizing details and final version of the follower made in acrylic. Own source



Imagen 5: pruebas con el prototipo ultimando detalles y versión final del seguidor hecha en acrílico. Fuente propia

Conclusiones

La conclusión que queda luego del análisis, es que los sistemas de seguimiento solar pueden mejorar la eficiencia y rendimiento de nuestro sistema fotovoltaico, dando como resultado un aumento en la generación de energía. Algo primordial a la hora de querer implementar un sistema de seguimiento solar es calcular los gastos de instalación y mantenimiento, pues pueden hacer que la inversión no llegue a ser justificable, después de todo, el fin de implementar el sistema de seguimiento fotovoltaico es que sea un mayor ahorro para el dueño de la inversión; por ello Martínez (2006) diseñó una ecuación para calcular la rentabilidad de un seguidor solar, dependiendo de nuestro sistema fotovoltaico; la ecuación de un sistema fotovoltaico sin seguidor es la siguiente: $t:CM$, donde: t corresponde al tiempo total en el cual se recuperaría la inversión,

C corresponde al coste total de la planta sin seguidores y

Conclusions

The conclusion that remains after the analysis, is that solar tracking systems can improve the efficiency and performance of our photovoltaic system, resulting in an increase in power generation. Something essential when it comes to wanting to implement a solar tracking system is to calculate the installation and maintenance costs, since they can make the investment not justifiable, after all, in order to implement the photovoltaic tracking system it is greater savings for the owner of the investment; for that reason Martínez (2006) designed an equation to calculate the profitability of a solar tracker, depending on our photovoltaic system; The equation of a photovoltaic system without a follower is the following: $t: C / M$, where: t corresponds to the total time in which the investment would be recovered,

C corresponds to the total cost of the plant without followers and

M corresponds to the annual turnover for production.

Martínez (2006) continues to expand the equation, adding other variables, which are:

I : performance increase.

Y : increase followers cost.

$\mathcal{E}$: proportion of the plant with followers.

G : annual maintenance expense.

In the end, Martínez (2006) gives a complete, very useful equation to calculate the profitability that our photovoltaic system would yield if it consists of a solar tracker.

The most used solar tracking system is active monitoring, it is quite efficient and reliable, however, its design must be subject to not

corresponde a la facturación anual por producción.

Martínez (2006) sigue ampliando la ecuación, añadiéndole otras variables, las cuales son:

I: incremento de rendimiento.

Y: incremento coste de seguidores.

£: proporción de la planta con seguidores.

G: gasto anual mantenimiento.

Al final Martínez (2006) da una ecuación completa, muy útil, para calcular la rentabilidad que llegaría a dar nuestro sistema fotovoltaico si consta de un seguidor solar.

El sistema de seguimiento solar más usado es el seguimiento activo, es bastante eficiente y confiable, sin embargo, su diseño debe estar sujeto a que no consuma más corriente de la necesaria, pues su finalidad es conseguir la mayor cantidad de energía, sin gastarla en el proceso. (Lazaroiu, Longo, Roscia, & Pagano 2015) En zonas en que la radiación solar sea mayor, más efectivo será el seguimiento. (Obara, Matsumura, Aizawa, Kobayashi, Hamada, & Suda, 2017).

Es importante tomar en cuenta en el sistema de seguimiento la función de retorno nocturno, que el sistema sea capaz de volver a su posición “cero” al día siguiente, para que así pueda comenzar el día haciéndole un rastreo correcto al sol. También tener en cuenta siempre en qué posición va estando el sol según nuestra localización geográfica. (Miloudi, Acheli & Chaib, 2013)

El prototipo de seguidor solar propuesto es de

consume more current than necessary, because its purpose is to get the most energy, without spending it on the process. (Lazaroiu, Longo, Roscia, & Pagano 2015) In areas where solar radiation is greater, more effective monitoring. (Obara, Matsumura, Aizawa, Kobayashi, Hamada, & Suda, 2017).

It is important to take into account in the tracking system the function of night return, that the system is able to return to its “zero” position the next day, so that it can start the day by making a correct tracking in the sun. Also, always bear in mind the position of the sun according to our geographical location. (Miloudi, Acheli & Chaib, 2013)

The proposed solar tracker prototype is low cost, easy to make and didactic for computer classes, electrical engineering and mechanical engineering; It is quite effective when it comes to tracking the sun and shows that tracking systems do their job, as well as encouraging the idea of looking for more alternatives to obtain clean energy. Today we have more investigative facilities to know the operation of this type of systems, we also have many more fundamental elements to build one, for example the Arduino, the PLC, the PIC, which facilitate the work of who want to make an active solar tracker; Decades ago it was different, and you had to resort to operational amplifiers and differentials to be able to make the tracking system make decisions. Salawu and Oduyemi (1986) designed an active solar tracker using differential amplifiers more than 3 decades ago

o, this makes it clear that solar tracking has always been a fundamental and important aspect in photovoltaic systems and that today we have many aids for to use them, besides that the

bajo costo, sencillo de hacer y didáctico para clases de informática, ingeniería eléctrica e ingeniería mecánica; es bastante efectivo a la hora de rastrear el sol y demuestra que los sistema de seguimiento si cumplen su función, así como también se incentiva la idea de buscar más alternativas para la obtención de energía limpia. A día de hoy se cuenta con más facilidades investigativas para conocer el funcionamiento de este tipo de sistemas, también se tienen muchos más elementos fundamentales para poder construir uno, por ejemplo los Arduino, los PLC, los PIC, los cuales facilitan el trabajo de quien quiera hacer un seguidor solar activo; hace décadas era distinto, y se tenía que recurrir a amplificadores operacionales y diferenciales para poder hacer que el sistema de seguimiento tomara decisiones. Salawu y Oduyemi (1986) diseñaron un seguidor solar activo mediante amplificadores diferenciales hace más de 3 décadas, esto nos deja claro que el seguimiento solar siempre ha sido un aspecto fundamental e importante en los sistemas fotovoltaicos y que hoy en día contamos con muchas ayudas para emplearlos, además que la necesidad actual por energías renovables cada vez se hace más grande y obvia. (Quesada, Guillon, Rousse, Mehrtash, Dutil & Paradis, 2015)

Reconocimientos

Al Ing. José Gregorio Beltrán por su disposición para llevar a cabo el montaje del seguidor estudiado, tanto por su tiempo como por el aporte de los materiales que se utilizaron.

El diseño original corresponde al de la página <http://browndoggadgets.dozuki.com>, los reconocimientos por el diseño son para ellos. De igual se agradece al aprendiz Víctor Alfonso Sarmiento Sena - CIDM quien a partir

current need for renewable energies is getting bigger and more obvious. (Quesada, Guillon, Rousse, Mehrtash, Dutil & Paradis, 2015)

Acknowledgments

Ing. José Gregorio Beltrán for his willingness to carry out the assembly of the trainee studied, both for his time and for the contribution of the materials that were used.

The original design corresponds to the page <http://browndoggadgets.dozuki.com>, the recognition for the design are for them. Likewise, the apprentice Víctor Alfonso Sarmiento Sena - CIDM is grateful for who, from that design, elaborated the renders of the prototype shown in this article.

BIBLIOGRAPHY

Arrieta Morelo, D. J., & Puello Bravo, S. Y. (2018). Design and construction of a solar tracker to increase the energy efficiency in photovoltaic panels of a pumping system (Doctoral dissertation).

Carballo, J. A., Bonilla, J., Roca, L., & Berenguel, M. (2018). New low-cost solar tracking system based on open source hardware for educational purposes. *Solar Energy*, 174, 826-836.

Clifford, M. J., & Eastwood, D. (2004). Design of a novel passive solar tracker. *Solar Energy*, 77 (3), 269-280.

Eldin, S. S., Abd-Elhady, M. S., & Kandil, H. A. (2016). Feasibility of solar tracking systems for PV panels in hot and cold regions. *Renewable Energy*, 85, 228-233.

de ese diseño, elaboró los renders del prototipo mostrados en este artículo.

BIBLIOGRAFÍA

Arrieta Morelo, D. J., & Puello Bravo, S. Y. (2018). Diseño y construcción de un seguidor solar para aumentar el rendimiento energético en paneles fotovoltaicos de un sistema de bombeo (Doctoral dissertation).

Carballo, J. A., Bonilla, J., Roca, L., & Berenguel, M. (2018). New low-cost solar tracking system based on open source hardware for educational purposes. *Solar Energy*, 174, 826-836.

Clifford, M. J., & Eastwood, D. (2004). Design of a novel passive solar tracker. *Solar Energy*, 77(3), 269-280.

Eldin, S. S., Abd-Elhady, M. S., & Kandil, H. A. (2016). Feasibility of solar tracking systems for PV panels in hot and cold regions. *Renewable Energy*, 85, 228-233.

Hafez, A. Z., Yousef, A. M., & Harag, N. M. (2018). Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 754-782.

Huang, B. J., Ding, W. L., & Huang, Y. C. (2011). Long-term field test of solar PV power generation using one-axis 3-position sun tracker. *Solar Energy*, 85(9), 1935-1944.

Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y., & Demirkol, S. (2004). Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey. *Renewable energy*, 29(8), 1265-1275.

Kalogirou, S. A. (1996). Design and construction of a one-axis sun-tracking system. *Solar Energy*, 57(6), 465-469.

Hafez, A. Z., Yousef, A.M., & Harag, N.M. (2018). Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 754-782.

Huang, B.J., Ding, W.L., & Huang, Y. C. (2011). Long-term field test of solar PV power generation using one-axis 3-position sun tracker. *Solar Energy*, 85 (9), 1935-1944.

Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y., & Demirkol, S. (2004). Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey. *Renewable energy*, 29 (8), 1265-1275.

Kalogirou, S. A. (1996). Design and construction of a one-axis sun tracking system. *Solar Energy*, 57 (6), 465-469.

Kelly, N. A., & Gibson, T. L. (2009). Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system. *Solar Energy*, 83 (11), 2092-2102.

Lee Chia-Yen, Po-Cheng Chou, Che-Ming Chiang, Chiu-Feng Lin. (2009). Sun Tracking Systems: A Review. *Sensors* No.9, pp. 3875-3890.

Lin, Y.C., Panchangam, S.C., Liu, L.C., & Lin, A.Y.C. (2019). The design of a sunlight-focusing and solar tracking system: A potential application for the degradation of pharmaceuticals in water. *Chemosphere*, 214, 452-461.

Lazaroiu, G.C., Longo, M., Roscia, M., & Pagano, M. (2015). Comparative analysis of fixed and sun tracking low power PV systems considering energy consumption. *Energy Conversion and Management*, 92, 143-148.

Kelly, N. A., & Gibson, T. L. (2009). Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system. *Solar Energy*, 83(11), 2092-2102.

Lee Chia-Yen, Po-Cheng Chou, Che-Ming Chiang, Chiu-Feng Lin. (2009). Sun Tracking Systems: A Review. *Sensors* No.9, pp. 3875-3890.

Lin, Y. C., Panchangam, S. C., Liu, L. C., & Lin, A. Y. C. (2019). The design of a sunlight-focusing and solar tracking system: A potential application for the degradation of pharmaceuticals in water. *Chemosphere*, 214, 452-461.

Lazaroiu, G. C., Longo, M., Roscia, M., & Pagano, M. (2015). Comparative analysis of fixed and sun tracking low power PV systems considering energy consumption. *Energy Conversion and Management*, 92, 143-148.

Machado Toranzo, N., Lussón Cervantes, A., Carralero, O., Leysdian, L., Bonzon Henríquez, J., & Escalona Costa, O. (2015). Seguidor Solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar. *Ingeniería Energética*, 36(2), 190-199.

Martin, A. D., Vázquez, J. R., & Cano, J. M. (2018). MPPT in PV systems under partial shading conditions using artificial vision. *Electric Power Systems Research*, 162, 89-98.

Martínez, J. (2006). Rentabilidad de seguidores solares: Cálculo del gasto crítico de mantenimiento. *Energética XXI*, 12(58), 34-36.

Motahhir, S., Hammoui, A. E., Ghzizal, A. E., & Derouich, A. (2019). Open hardware/software test bench for solar tracker with virtual instrumentation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 31, 9-16.

Machado Toranzo, N., Lussón Cervantes, A., Carralero, O., Leysdian, L., Bonzon Henríquez, J., & Escalona Costa, O. (2015). Solar tracker, optimizing the use of solar energy. *Energy Engineering*, 36 (2), 190-199.

Martin, A. D., Vázquez, J. R., & Cano, J. M. (2018). MPPT in PV systems under partial shading conditions using artificial vision. *Electric Power Systems Research*, 162, 89-98.

Martínez, J. (2006). Profitability of solar trackers: Calculation of critical maintenance expense. *Energetic XXI*, 12 (58), 34-36.

Motahhir, S., Hammoui, A.E., Ghzizal, A.E., & Derouich, A. (2019). Open hardware / software test bench for solar tracker with virtual instrumentation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 31, 9-16.

Parmar, N. J., Parmar, A. N., & Gautam, V. S. (2015). Passive solar tracking system. *Int J Emerg Technol Adv Eng*, 5 (1), 138-145.

Quesada, G., Guillon, L., Rouse, D.R., Mehrtash, M., Dutil, Y., & Paradis, P.L. (2015). Tracking strategy for photovoltaic solar systems in high latitudes. *Energy conversion and Management*, 103, 147-156.

Salawu, R. I., & Oduyemi, T. A. (1986). An electronic sun finder and solar tracking system. *Solar & wind technology*, 3 (3), 215-218.

Sallaberry, F., Pujol-Nadal, R., Larcher, M., & Rittmann-Frank, M. H. (2015). Direct tracking error characterization on a single-axis solar tracker. *Energy Conversion and Management*,

Parmar, N. J., Parmar, A. N., & Gautam, V. S. (2015). Passive solar tracking system. *Int J Emerg Technol Adv Eng*, 5(1), 138-145.

Quesada, G., Guillon, L., Rouse, D. R., Mehrtash, M., Dutil, Y., & Paradis, P. L. (2015). Tracking strategy for photovoltaic solar systems in high latitudes. *Energy conversion and Management*, 103, 147-156.

Salawu, R. I., & Oduyemi, T. A. (1986). An electronic sun finder and solar tracking system. *Solar & wind technology*, 3(3), 215-218.

Sallaberry, F., Pujol-Nadal, R., Larcher, M., & Rittmann-Frank, M. H. (2015). Direct tracking error characterization on a single-axis solar tracker. *Energy Conversion and Management*, 105, 1281-1290.

Schmalensee, R. (2015). The future of solar energy: a personal assessment. *Energy economics*, 52, S142-S148.

Sumathi, V., Jayapragash, R., Bakshi, A., & Akella, P. K. (2017). Solar tracking methods to maximize PV system output—A review of the methods adopted in recent decade. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 130-138.

Tamayo, D. (2010) Diseño de un seguidor solar pasivo para su uso con diversos paneles de captación de energía solar.

Tharamuttam, JK, & Ng, AK (2017). Diseño y desarrollo de un seguidor solar automático. *Energy Procedia*, 143, 629-634.

Zogbi, R., & Laplace, D. (1984). Design and construction of a sun tracker. *Solar energy*, 33(3), 368-372.

105, 1281-1290

Schmalensee, R. (2015). The future of solar energy: a personal assessment. *Energy economics*, 52, S142-S148.

Sumathi, V., Jayapragash, R., Bakshi, A., & Akella, P.K. (2017). Solar tracking methods to maximize PV system output—A review of the methods adopted in recent decade. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 130-138.

Tamayo, D. (2010) Design of a passive solar tracker for use with various panels of solar energy collection.

Tharamuttam, JK, & Ng, AK (2017). Design and development of an automatic solar tracker. *Energy Procedia*, 143, 629-634.

Zogbi, R., & Laplace, D. (1984). Design and construction of a sun tracker. *Solar energy*, 33(3), 368-372.