

Comparative Analysis of the Extractable Energy Potential between Fixed Photovoltaic Panels and with an Axis Tracking System Installed at the ULEAM

Análisis Comparativo del Potencial Energético Extraíble entre Paneles Fotovoltaicos Fijo y con Sistema de Seguimiento de un Eje Instalados en la ULEAM

A.A. Moreira-Espinoza¹  0009-0003-9867-9778 J.C. Intriago¹  0009-0003-9039-4778
 I.P. Pazmiño¹  0000-0002-5673-8915 M.A. Ponce-Jara¹  0000-0002-4450-4740
 M.E. Moreano¹  0000-0003-3369-4793

¹ Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta, Ecuador

E-mail: e1351209208@live.uleam.edu.ec, e1315172443@live.uleam.edu.ec, ivan.pazmino@uleam.edu.ec,
marcos.ponce@uleam.edu.ec, milton.moreano@uleam.edu.ec

Abstract

For years, solar energy has been a subject of study for electricity generation as an alternative power source. The main objective of this project is to carry out a comparative analysis of the production of electrical energy between fixed photovoltaic panels and those with tracking systems on one axis. Three solar modules were designed and built with the same technical characteristics but different solar tracking systems; Single-axis tracking systems will use tracking systems by astronomical programming and light tracking by LDR sensors. Current, voltage and temperature sensors were implemented along with software capable of obtaining the characteristic curves of the production behavior in each prototype. The data processing, as well as the management of I/O signals coming from the different electronic components associated with the operation of each system, are governed by an Arduino mega board linked to an Ethernet module to be able to observe the curves of production from a website, all operating automatically. Therefore, we determined that the PV system by astronomical programming is the most convenient, due to its lower energy consumption when correcting the panel's position.

Index terms— System, solar tracker, analysis, LDR, astronomical programming.

Resumen

Desde hace años la energía solar viene siendo motivo de estudio para la generación eléctrica como fuente de alimentación alternativa. El objetivo principal de este proyecto es realizar un análisis comparativo de la producción de energía eléctrica entre paneles fotovoltaicos fijos y con sistemas de seguimiento en un eje. Se diseñó y construyó tres módulos solares con las mismas características técnicas, pero con diferentes sistemas de seguimiento solar; los sistemas seguidores de un eje utilizaron sistemas de seguimiento por programación astronómica y seguimiento de luz por sensores LDR. Se implementaron sensores de corriente, voltaje y temperatura, así como un software encargado de obtener las curvas características del comportamiento de la producción en cada prototipo. El procesamiento de los datos, así como la gestión de señales de E/S proveniente de los diferentes componentes electrónicos asociados al funcionamiento de cada sistema, son gobernados por una placa Arduino mega unida a un módulo ethernet con la finalidad de poder observar las curvas de producción desde un sitio web, todo esto operando de manera automática. Por tanto, determinamos que el sistema FV por programación astronómica es el más conveniente, debido a su menor consumo energético al corregir la posición del panel.

Palabras clave— Sistema, seguidor solar, análisis, LDR, programación astronómica.

Recibido: 29-10-2023, Aprobado tras revisión: 21-12-2023

Forma sugerida de citación: Moreira, A.; Intriago, J.; Pazmiño, I.; Ponce, M. (2024). "Análisis Comparativo del Potencial Energético Extraíble entre Paneles Fotovoltaicos Fijo y con Sistema de Seguimiento de un Eje Instalados en la ULEAM". Revista Técnica "energía". No. 20, Issue II, Pp. 98-107

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

Doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v20.n2.2024.599>

© 2024 Operador Nacional de Electricidad, CENACE



Esta publicación es de acceso abierto bajo una licencia Creative Commons



1. INTRODUCCIÓN

La energía solar es una fuente de energía limpia, renovable, que no modifica el medio ambiente y sobre todo gratuita, con amplias aplicaciones en los sistemas eléctricos de potencia en general [1]. El veintinueve estudio del The World Energy Council, menciona que para el año 2100 el 70% de la energía consumida será de origen solar [2]. Para poder producir energía eléctrica, el panel solar no solo depende de la intensidad de la radiación solar que incide sobre el mismo, sino que también depende del ángulo en la que esta llega. Ambas variables son importantes para determinar la producción de energía, la cual se lleva a cabo a través del efecto fotovoltaico. Este efecto es la aplicación del efecto fotoeléctrico de tal manera que se puede generar electricidad por diferencia de potencial entre dos puntos al incidir la radiación electromagnética de la luz sobre un mismo material semiconductor denominado unión p-n. Este efecto se caracteriza por la producción de corriente eléctrica mediante dos materiales, piezas que están en contacto y expuestas a la luz o por lo general, a una radiación electromagnética

El módulo fotovoltaico tiene un comportamiento que sigue una curva denominada I-V, según la cual, en un estado de irradiación solar y de temperatura determinado, el módulo es capaz de generar una curva de tensión-intensidad de una morfología representada en la Fig. 1. [3].

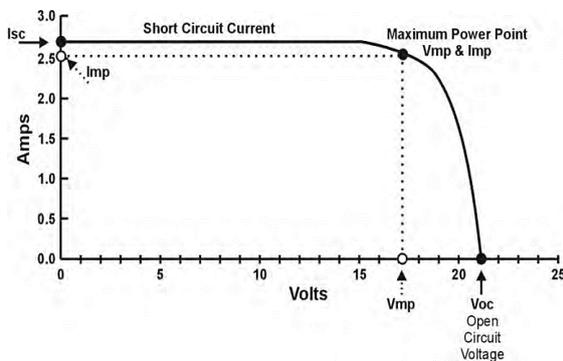


Figura1: Curva I-V modelo fotovoltaico [Martínez Rubio, 2014]

En general el fabricante provee datos operacionales como la tensión de circuito abierto Voc, la corriente de cortocircuito Isc, estos datos están referidos a condiciones estándar de radiación (1000 W/m²) y temperatura de celda (25° C) [4].

Una de las técnicas utilizadas para aumentar la captación de radiación solar y por ende la energía suministrada por la instalación solar fotovoltaica pasa por implementar un dispositivo como lo es un seguidor solar.

Un seguidor solar es básicamente un dispositivo formado por una parte fija y una móvil, cuya finalidad es el aumento de la captación de radiación solar, para esto necesita una superficie de captación que lo mantenga lo

más perpendicular posible a los rayos del, dentro de su rango de movimiento [5].

2. DESARROLLO

2.1 Diseño y construcción de parte mecánica del sistema solar (estructura fija y móvil)

La estructura de cada prototipo se elaboró bajo la orientación de proyectos como [6]–[8], de tal manera que sea resistente a fenómenos ambientales que pudieran afectar el funcionamiento eléctrico y mecánico. Para el caso de los seguidores de un eje, se determinaron los siguientes requerimientos de diseño:

- Se necesita el movimiento libre en un eje (este a oeste) y así mismo poder establecer una inclinación fija, según la localidad.
- La base principal será de un solo poste fijo al lugar de instalación.
- La estructura debe soportar el peso del panel fotovoltaico de 120W (22,5 Voc-7,2 A Icc) con dimensiones de 670*970*30 mm, para este caso 6,5kg.
- El panel realizará su movimiento mediante un motor eléctrico en conjunto con un tornillo de potencia el cual convertirá el movimiento rotacional a movimiento lineal, otorgando mayor fuerza y precisión al movimiento del panel solar



Figura 2: Diseño de seguidor solar [Los autores, 2023]

La estructura que sujeta el panel fotovoltaico debe tener la capacidad de girar en un eje, este tiene que moverse de una manera muy suave y con el coeficiente más bajo de rozamiento para evitar posibles atascamientos y desgastes producidos en la acción. La idea principal del diseño se detalla en la Fig. 3.

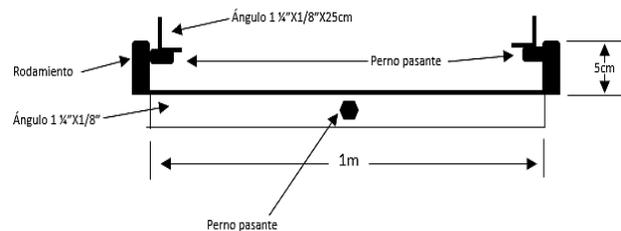


Figura 1: Plataforma del seguidor solar [Los autores, 2023]

Para efectuar el movimiento, el eje del motor eléctrico estará unido a un perno sin fin y así mismo, una tuerca introducida en un tubo se desplazará a lo largo del perno haciendo el recorrido, convirtiendo el movimiento rotacional a lineal [9]. Se utilizó un motor paso a paso NEMA23, esto se lo aprecia en la Fig. 4.



Figura 4: Actuador Lineal [Los autores, 2023]

Teniendo los datos de entrada, se realizaron los cálculos para determinar el torque del motor a implementar para elevar y descender la masa del panel colocado sobre un eje de rotación, (para este caso, se contempla la elevación como el momento más crítico). El par para un tornillo de potencia, en este caso (con rosca ACME o rosca unificada sin collarín) se expresa mediante (1).

$$T_s = \frac{F * dm}{2} * \frac{p + \pi * \mu * dm * \sec \alpha}{\pi * dm - \mu * p \sec \alpha} \quad (1)$$

Por consiguiente, utilizando los datos de la Tabla 1, se reemplazan los valores y obtenemos el valor que se observa en (2).

Tabla 1: Datos del tornillo de potencia

| Datos de entrada (tornillo de potencia) | | | | | |
|---|------|--------|-------|-------|--------------------|
| 6,5kg | D | dm | p | μ | α (ACME) |
| 6,37 N | 10mm | 9,25mm | 1,5mm | 0,2 | 30° |

$$T_s = 0,08425N.m \quad (2)$$

En el movimiento de este a oeste, debido a limitaciones de diseño, la estructura posee 130° libres de recorrido, lo cuales deberán ser proporcionales a un numero de vueltas del perno sin fin. Lo antes mencionado se muestra en la Fig. 5.

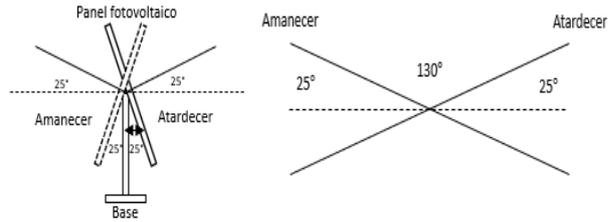


Figura 5: Rango de movimiento de seguidor solar [Los autores, 2023]

En la Fig. 6, observamos los valores de los lados “a y b”, donde “a” es la medida que forma el actuador lineal en su punto de máximo de estiramiento (o cuando el panel se encuentra a 25° de inclinación tal y como se muestra en la fig. 5). Por otra parte “b” es la distancia que hay desde el origen del perno sin fin (tomado como referencia) hasta donde se interceptan las estructuras de la base y la encargada de sostener el panel fotovoltaico. Finalmente, la distancia “c” es importante conocerla para la correcta instalación del segundo punto de apoyo del actuador lineal.

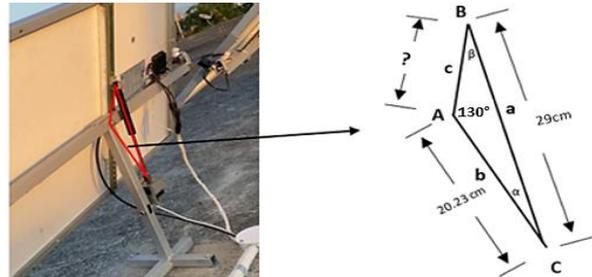


Figura 6: Representación de triángulo oblicuángulo formado por la base [Los autores, 2023]

Proponemos la solución a este problema mediante la ley del seno para triángulos oblicuángulos. Inicialmente no tenemos el ángulo “ α ”, con lo cual:

$$\frac{\sin(A)}{a} = \frac{\sin(\beta)}{b} \quad (3)$$

$$\frac{\sin(130^\circ)}{29cm} = \frac{\sin(\beta)}{20,2}$$

$$\beta = 32,20^\circ$$

Por lo tanto:

$$\alpha = 180^\circ - 130^\circ - 32,20^\circ \quad (4)$$

$$\alpha = 17,80^\circ$$

Entonces:

$$\frac{a}{\sin(A)} = \frac{c}{\sin(\alpha)} \quad (5)$$

$$c = 11,57cm$$

Por consiguiente, “c” debe tener una distancia de 11.57cm para que el panel fotovoltaico recorra los 130°.

Para encontrar la relación entre centímetros recorridos vs grados de inclinación se recurre a plantear el triángulo de la Fig. 7.

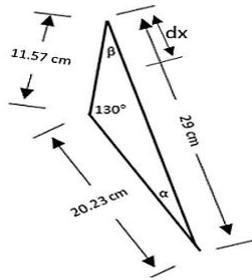


Figura 7: Representación de triángulo resultante [Los autores, 2023]

Mediante la ley de coseno buscamos la solución para este problema, entonces se resuelve se la siguiente forma:

$$a = \sqrt{b^2 + c^2 - 2bc * \cos A} \quad (6)$$

$$a = 28,94 \text{ cm}$$

$$dx = 29 - a \rightarrow dx = 0,06 \text{ cm}$$

Finalmente se determina que por cada 0,6mm de movimiento lineal, el panel aumenta o disminuye 1° en su inclinación. El paso del tornillo utilizado en el actuador lineal es de 1,5mm, entonces se concluye que por cada vuelta completa del motor eléctrico moverá 2,5° al panel fotovoltaico.

2.2 Diseño electrónico general de los seguidores solares y panel fijo.

Se utiliza principalmente un Arduino Mega 2560, el cual será el encargado de gestionar señales de E/S y ejecutar acciones para el correcto funcionamiento del sistema, también será quien administre la información de temperatura y potencia entregada por los seguidores solares, así como el panel que se encuentra en una posición fija. El diagrama de funcionamiento del sistema se muestra en la Fig. 8.

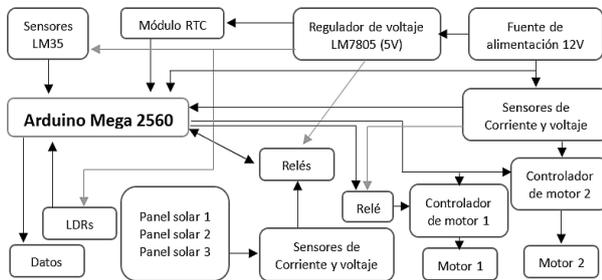


Figura 8: Diagrama de bloques del sistema general [Los autores, 2023]

Para obtener la potencia eléctrica que están entregando los paneles solares a lo largo del día, se optó por el uso de relevadores, quienes conmutaran los

sensores mediante un pulso proveniente del Arduino durante un tiempo determinado (9,5 Seg.), colocando en CC y CA cada panel para conseguir los parámetros de “V_{oc} y I_{cc}”, luego mediante la programación en Arduino se obtiene la potencia, esto se detalla en la Fig. 9.

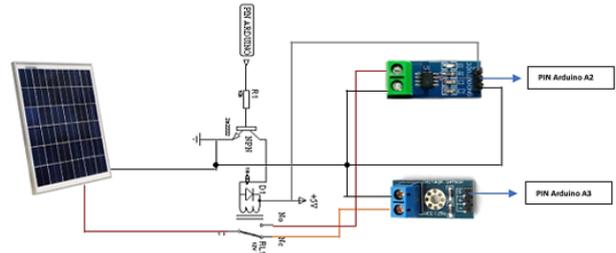


Figura 9: Circuito de conmutación [Los autores, 2023]

Para el funcionamiento de los sensores y demás componentes, se necesita un voltaje estable de +5V, por lo que, se implementó un regulador de voltaje LM7805 en conjunto con un transistor de potencia, el cual maneja la corriente que circule por el circuito y así evitar la quema del regulador debido al bajo amperaje que este puede manejar (500mA). A continuación, se muestra en la Fig. 10

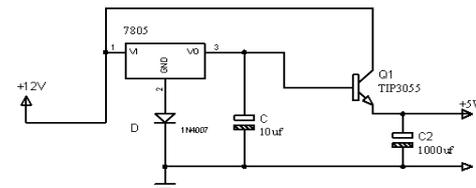


Figura 10: Regulador de voltaje 5V-10A [Los autores, 2023]

El motor eléctrico para los dos tipos de seguidores actuará con dirección de giro y número de vueltas, aumentando o disminuyendo la longitud del actuador lineal. Cuando el panel llegue a los límites en cada extremo “0° y 130°”, el circuito parará la secuencia debido al accionamiento de los finales de carrera y luego de esto invertirá el giro del motor, tal y como se muestra en la Fig. 11.

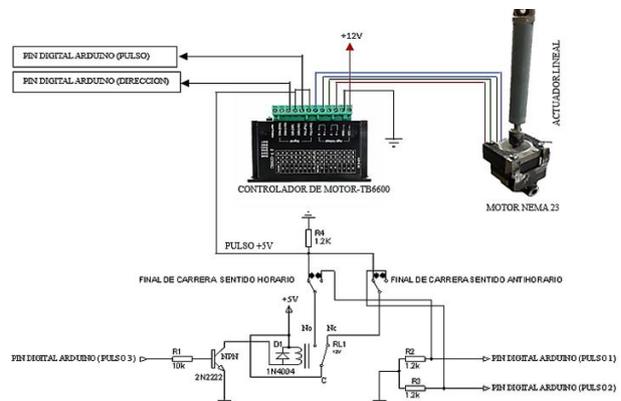


Figura 11: Conexión de motor y finales de carrera [Los autores, 2023]

2.3 Diseño de seguidor solar por sensores LDR.

El circuito seguidor por punto luminoso tiene que detectar el desequilibrio de luz entre las dos fotorresistencias que controlan la posición del panel. Se detalla el dispositivo de censado en la Fig.12

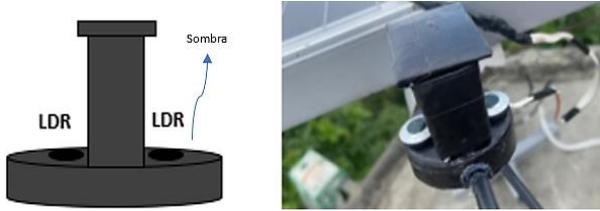


Figura 12: Sensores de luz [Los autores, 2023]

Cuando las señales provenientes de estos sensores determinen que el panel no está orientado perpendicular al sol, el circuito realizara la acción de enviar una señal que activara el motor eléctrico encargado de posicionar el panel, esto se lo representa en la Fig. 13



Figura 13: Esquema de bloques de seguidor solar por LDR [Los autores, 2023]

La señal emitida por los sensores de luz es enviada a los pines analógicos del Arduino mega y este tendrá la tarea de leer el voltaje que viajará según la intensidad de la luz receptada por los LDRs, para después hacer la comparación entre ambos valores mediante el código de programación y así enviar la señal hacia los motores, tal y como se muestra en el diagrama de flujo de la Fig. 14

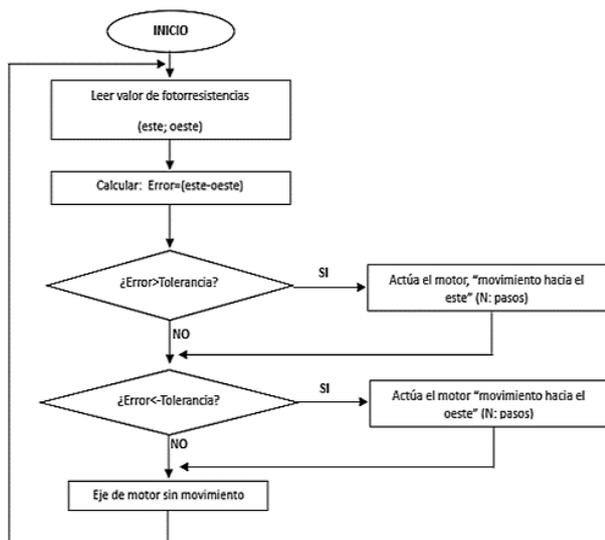


Figura 14: Diagrama de flujo de seguidor solar por sensores LDR [Los autores, 2023]

2.4 Diseño de seguidor solar por programación astronómica.

Para el desarrollo de este seguidor se utilizó la misma estructura que el seguidor por punto luminoso; la única diferencia es que este no requiere sensores de luz adicionales debido a que su funcionamiento se basa en cálculos predecibles.

Este seguidor solar utiliza una programación astronómica para determinar el ángulo de orientación del panel solar en función de la posición del sol en el cielo por lo que es importante conocer datos como hora del día, fecha, latitud y longitud para calcular la posición exacta del sol en el cielo en un momento dado. Entonces el diagrama de flujo el cual representa la secuencia de toma de decisiones para el seguidor solar por programación astronómica se lo aprecia en la Fig.15

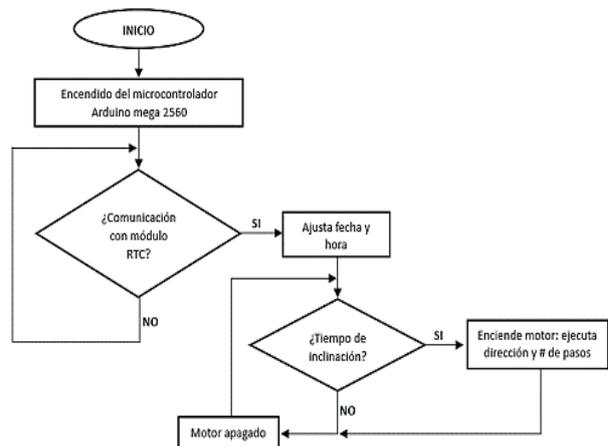


Figura 15: Diagrama de flujo de seguidor solar por programación astronómica [Los autores, 2023]

Para determinar el número de pasos del perno sin fin vs la inclinación (en grados) del panel se usa la aplicación de Android “El camino del sol”. Esta aplicación muestra la posición y la trayectoria del sol sobre la localidad donde se encuentra instalado el panel fotovoltaico (en este caso Manta-Ecuador) [10]. Con esta información podemos establecer un rango de 12 horas, que va desde las 6:00h AM hasta las 18:00H PM de las diferentes estaciones del año, esto se lo observa en la Fig. 16

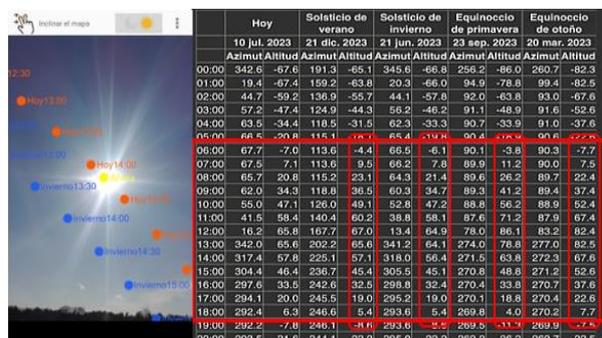


Figura 16: Trayectoria del sol App “El camino del sol” [Los autores, 2023]



Como se aprecia en la Tabla 2 con la información de la Fig. 15, se realizó un promedio de los ángulos de inclinación pertenecientes a las diferentes estaciones del año en función de las horas seleccionadas. Considerando que la inclinación inicial y final del panel es de 25° se establece el rango de funcionamiento desde las 9:00h AM hasta las 17:00h PM.

Tabla 2: Ángulo promedio de altitud del sol de diferentes épocas del año en Manta

| Hora | Inclinación en grados (°) de las diferentes estaciones del año | | | | Ángulo de inclinación promedio (°) |
|-------|--|-----------------------|-------------------------|---------------------|------------------------------------|
| | Solsticio de verano | Solsticio de invierno | Equinoccio de primavera | Equinoccio de otoño | |
| 6:00 | -4,40 | -6,10 | -3,80 | -7,70 | -5,50 |
| 7:00 | 9,50 | 7,80 | 11,20 | 7,50 | 9,0 |
| 8:00 | 23,10 | 21,40 | 26,20 | 22,40 | 23,30 |
| 9:00 | 36,50 | 34,70 | 41,20 | 37,40 | 37,50 |
| 10:00 | 49,10 | 47,20 | 56,20 | 52,40 | 51,20 |
| 11:00 | 60,20 | 58,10 | 71,20 | 67,40 | 64,20 |
| 12:00 | 67 | 64,90 | 86,10 | 82,40 | 75,10 |
| 13:00 | 65,60 | 64,10 | 78,80 | 82,50 | 72,80 |
| 14:00 | 57,10 | 56,40 | 63,80 | 67,40 | 61,20 |
| 15:00 | 45,40 | 45,10 | 48,80 | 52,60 | 48,0 |
| 16:00 | 32,50 | 32,40 | 33,80 | 37,60 | 34,10 |
| 17:00 | 19 | 19 | 18,80 | 22,60 | 19,90 |
| 18:00 | 5,40 | 5,40 | 4 | 7,70 | 5,60 |

En el controlador del motor (TB6600) se elige una configuración de 3200 pasos por vuelta completa del eje del motor, ya que se necesita un movimiento suave, fuerte y preciso. También se configura la corriente que se va a entregar al motor para su funcionamiento, esto tomando en cuenta los datos del fabricante. Se puede observar en la Fig. 17



Figura 17: Configuración de controlador de motor (TB6600)
[Los autores, 2023]

Teniendo esta información (2,5° por vuelta; 3200 pasos por vuelta), utilizando una regla de tres podemos

determinar el número de pasos necesarios para corregir la inclinación del panel según las horas del día como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Movimiento del motor Nema23

| Hora | Posición en grados (°) | Grados (°) de movimiento | N: vueltas para ejecutar θ_R | N: pasos para ejecutar Rv |
|------------------|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| | $\theta_a \rightarrow \theta_b$ | $\theta_R = \theta_a - \theta_b $ | $Rv = \theta_R / 2,5$ | $P = Rv * 3200$ |
| 9:00 | 25→37,50 | 12,50 | 5 | 16 000 |
| 10:00 | 37,50→51,20 | 13,70 | 5,48 | 17 536 |
| 11:00 | 51,20→64,20 | 13 | 5,20 | 16 640 |
| 12:00 | 64,20→75,10 | 10,90 | 4,36 | 13 952 |
| 12:30 | 75,10→90 | 14,90 | 5,96 | 19 072 |
| 13:00 | 90→72,80 | 17,20 | 6,88 | 22 016 |
| 14:00 | 72,80→61,20 | 11,60 | 4,64 | 14 848 |
| 15:00 | 61,20→48 | 13,20 | 5,28 | 16 896 |
| 16:00 | 48→34,10 | 13,90 | 5,56 | 17 792 |
| 17:00 | 34,10→25 | 9,10 | 3,64 | 11 648 |
| Movimiento total | | 130 | | |

2.5 Diseño de panel fijo.

El ángulo de inclinación óptimo de un panel solar fijo es generalmente igual a la latitud local [11]. Dado que la latitud del Ecuador es aproximadamente 0 grados, se recomienda un ángulo de inclinación de alrededor de 0 grados. Esto significa que el panel solar fijo se debe instalar de manera horizontal, paralelo al suelo.

El panel fotovoltaico reposara sobre una estructura fija con una inclinación de 5 grados, esto para evitar la acumulación de lodo, producto de la mezcla del polvo y agua, considerando los criterios antes mencionados. Dicho panel estará conectado a los sensores de corriente, voltaje y temperatura, que a su vez hacen conjunto con la etapa de conmutación para el proceso de lectura de datos realizado por el Arduino mega, tal y como se lo realizo en los sistemas de movimiento, esto se lo aprecia en la Fig. 18

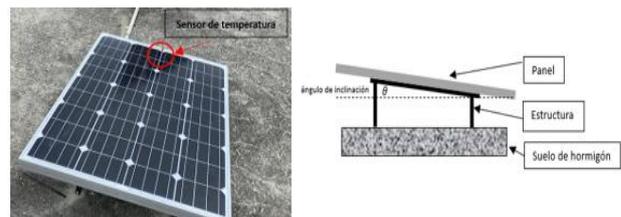


Figura 18: Estructura de panel FV fijo [Los autores, 2023]

3. EVALUACION DE LOS RESULTADOS

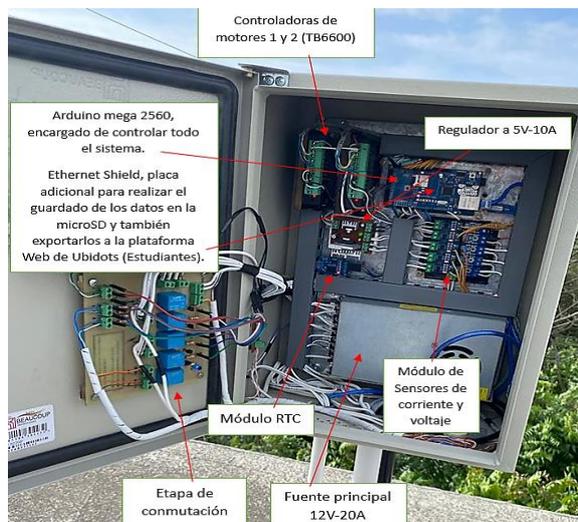
En los predios de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM) se encuentra instalada una estación meteorológica automática que permite monitorear la dirección y velocidad del viento, así como la los datos de radiación de la zona. Los datos se exportaron en intervalos de 2 minutos a la plataforma Web (IoT) de Ubidots, esto mediante la incorporación de una Ethernet shield con la finalidad poder visualizar los valores de potencia y temperatura en tiempo real. En la MicroSD los datos se guardaron después de realizar el producto de mediciones promedio de los paneles FV “Icc y Voc” (cada 20 segundos), de igual forma la potencia consumida por los sistemas de movimiento en un eje medida por sensores independientes, esto con la finalidad de tener una mayor precisión en el estudio. En la Fig. 19, se observa que ambos sistemas fueron colocados a pocos metros de la estación meteorológica.



(a)

Figura 19: Sistema FV y estación meteorológica instalados en la ULEAM. Tablero general de conexiones del hardware de los sistemas fotovoltaicos [Los autores, 2023]

El análisis de rendimiento de producción se lo realizo diariamente, a partir desde el momento de la instalación (durante 16 días).



(b)

La Tabla 4 muestra los datos de radiación solar de la zona durante el tiempo de estudio, también de la energía extraída de cada sistema solar como lo son: el sistema de seguimiento por programación astronómica (SFV1), sistema de seguimiento por punto luminoso o sensores LDR (SFV2) y sistema solar fijo (SFV3). Desde el SFV1 la producción de energía eléctrica total en los días de estudio fue de 9,46 kWh respectivamente. Por consiguiente, desde el SFV2 la producción de energía eléctrica fue de 9,96 kWh respectivamente. Por su parte, desde el SFV3 la producción de energía eléctrica fue de 7,19 kWh respectivamente. La fig. 20 muestra la comparación de las curvas características de energía eléctrica de cada sistema FV y también la radiación de la zona. Esto demuestra que sistema estuvo liderando la producción en comparativa al sistema FV fijo.

Tabla 4: Análisis de rendimiento de los sistemas FV instalados en la ULEAM

| Rendimiento energético de los sistemas Fv | | | | |
|---|-----------------------|-----------|-----------|-----------|
| Días de estudio " desde (06:00AM- 18:00PM)" | Radiación Solar Wh/m2 | SFV1 (Wh) | SFV2 (Wh) | SFV3 (Wh) |
| 19-jun | 3826,64 | 397,08 | 458,57 | 371,31 |
| 20-jun | 3500,01 | 510,15 | 535,08 | 380,24 |
| 21-jun | 4077,14 | 667,82 | 695,27 | 501,46 |
| 22-jun (Mayor) | 5523,03 | 1038,34 | 1064,25 | 713,53 |
| 23-jun | 4253,94 | 688,13 | 724,07 | 56,42 |
| 24-jun | 3197,88 | 448,39 | 479,08 | 342,69 |
| 25-jun | 3064,91 | 360,24 | 394,07 | 316,24 |
| 26-jun | 4327,52 | 965,42 | 1002,40 | 681,24 |
| 27-jun | 3132,33 | 480,12 | 505,81 | 347,86 |
| 28-jun (Promedio) | 3142,84 | 559,47 | 587,72 | 495,18 |
| 29-jun | 2711,52 | 264,50 | 297,76 | 261,19 |
| 30-jun | 3801,56 | 509,76 | 531,28 | 432,45 |
| 1-jul | 3740,82 | 552,05 | 586,59 | 381,98 |
| 2-jul (Menor) | 1907,45 | 191,81 | 211,28 | 152,77 |
| 3-jul | 4260,42 | 834,87 | 862,62 | 586,56 |
| 4-jul | 4632,28 | 992,11 | 1022,37 | 666,16 |
| TOTAL (*k) | 59,10 | 9,46 | 9,96 | 7,19 |

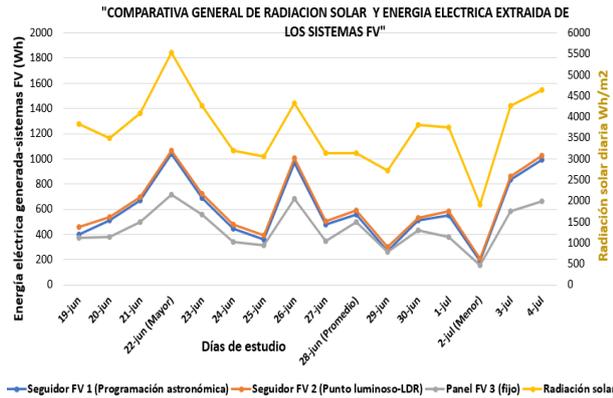


Figura 20: Comparativa general de las curvas características de radiación solar y energía extraída de los sistemas fotovoltaicos por día [Los autores, 2023]

La Tabla 5 muestra los valores de temperatura promedio alcanzados por los paneles de cada sistema FV, testeados por los sensores de temperatura (LM35) que fueron colocados sobre el panel. También se encuentran los valores del consumo de los motores eléctricos NEMA23 durante las horas de funcionamiento en el trayecto de los días de estudio, colocados en los SFV1 y SFV2. La fig. 21 muestra la comparativa de las curvas características de temperatura promedio por día de cada panel que conforman los diferentes sistemas FV.

Tabla 5: Datos de temperatura y consumo de energía eléctrica por los motores de los SFV1 y SFV2

| Temperatura promedio de los sistemas FV y consumo de motores | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|
| Días de estudio " desde (06:00AM-18:00PM)" | SFV1 (°C) | SFV2 (°C) | SFV3 (°C) | M1 SFV1 (Wh) | M2 SFV2 (Wh) |
| 19-jun | 28,4 | 30,1 | 27,5 | 3,63 | 37,68 |
| 20-jun | 34,04 | 34,38 | 32,89 | 4,02 | 36,45 |
| 21-jun | 32,38 | 32,25 | 28,49 | 3,72 | 44,23 |
| 22-jun (Mayor) | 36,11 | 36,20 | 31,12 | 3,66 | 41,54 |
| 23-jun | 30,59 | 31,03 | 30,70 | 3,46 | 37,77 |
| 24-jun | 30,71 | 31,00 | 27,57 | 3,19 | 37,74 |
| 25-jun | 29,36 | 30,17 | 27,29 | 3,46 | 37,24 |
| 26-jun | 32,81 | 32,88 | 29,48 | 3,26 | 39,37 |
| 27-jun | 30,18 | 30,80 | 28,50 | 2,84 | 35,42 |
| 28-jun (Promedio) | 31,15 | 32,00 | 31,17 | 3,26 | 37,45 |
| 29-jun | 27,21 | 27,94 | 25,61 | 3,17 | 36,34 |
| 30-jun | 31,54 | 32,87 | 28,98 | 3,09 | 35,95 |

| | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|------|-------|
| 1-jul | 30,87 | 31,77 | 28,52 | 3,01 | 35,43 |
| 2-jul (Menor) | 27,39 | 28,30 | 26,42 | 3,32 | 35,04 |
| 3-jul | 32,83 | 33,97 | 31,40 | 3,21 | 35,97 |
| 4-jul | 33,62 | 33,13 | 31,75 | 3,05 | 35,28 |
| TOTAL (*k) | | | | 0,05 | 0,60 |

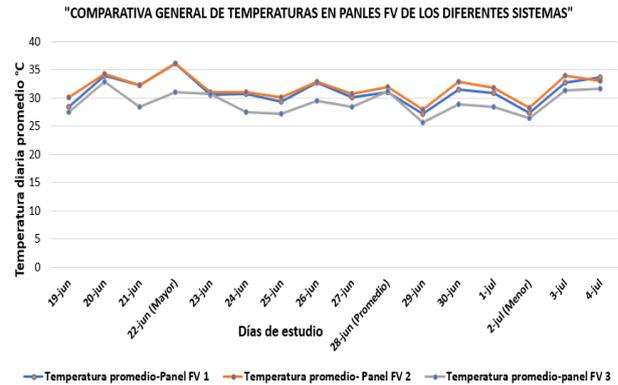


Figura 21: Comparativa general de las curvas características de temperaturas en paneles FV [Los autores, 2023]

La Tabla 6 muestra el consumo promedio de los componentes electrónicos que conforman el sistema, determinado por su "datasheet" y horas de uso, consumo que se suma al consumo de los motores para el análisis.

Tabla 6: Consumo de energía por componentes que conforman el sistema FV general y costos.

| Consumo en (W) | Horas de uso | Wh diarios | Valor por sistema con motor y panel FV \$ | |
|------------------------------|--------------|------------|---|-----|
| Arduino + RTC | 1,2 | 24 | SFV1 | 210 |
| Sistema de (relé y sensores) | 2,4 | 12 | SFV2 | 260 |
| LDR | 0,1 | 12 | SFVfijo | 120 |
| Total | | 58,8 | Estructura | 12 |

La Tabla 7 muestra los datos del estudio global de los sistemas fotovoltaicos, en donde se analiza la producción de los seguidores solares (SFV1 y SFV2) respecto al panel fijo, contemplando las pérdidas que tiene cada uno por el movimiento realizado para corregir la posición del panel para mantenerlo perpendicular al sol. Se propuso dos escenarios para el análisis, con el sistema de medición de potencia (circuito de conmutación) incorporado para la investigación y sin este. Por consiguiente, el SFV1 obtuvo una producción energética total de 9,46 kWh, superior en un 31,63% (2,27 kWh extra) a la producción del panel fijo quien tuvo una producción energética total de 7,19 kWh. De esos 2.27



kWh, el SFV1 pierde alrededor del 20,80% al corregir la posición del panel FV, aprovechando netamente 1,8 kWh, equivalentes a 25% (este análisis sin el sistema de medición) y con el sistema de medición pierde alrededor del 43,26% quedando con un rendimiento adicional neto de 1,29 kWh, equivalentes a un 18%.

Por consiguiente, el SFV2 obtuvo una producción energética total de 9,96 kWh, superior en un 38,55% (2,77 kWh extra) a la producción del panel fijo quien tuvo una producción energética total de 7,19 kWh. De esos 2,77 kWh, el SFV2 pierde alrededor del 38,50% al corregir la posición del panel FV, aprovechando netamente 1,7 kWh, equivalentes a 24% (este análisis sin el sistema de medición) y con el sistema de medición pierde alrededor del 55,23% quedando con un rendimiento adicional neto de 1,24 kWh, equivalentes a un 17%.

Tabla 7: Datos de producción y consumo durante las pruebas.

| % de potencial extraíble y consumible de sistemas FV | | Equivalente en kWh | | |
|---|---------|--------------------|---------------------------|-------------|
| panel fijo | 100 | 7,19 | | |
| SFV1 | 100 | 9,46 | | |
| SFV2 | 100 | 9,96 | | |
| Consumo de motor-SFV1 | 100 | 0,05 | | |
| consumo de motor-SFV2 | 100 | 0,60 | | |
| Incremento % de Energía E. de SFV | | Equivalente en kWh | | |
| SFV1 vs panel fijo | 31,63 | 2,27 | | |
| SFV2 vs panel fijo | 38,55 | 2,77 | | |
| SFV2 vs SFV1 | 5,26 | 0,50 | | |
| Diferencia % de consumo entre motores | | Equivalente en kWh | | |
| SFV2 vs SFV1 | 1022,68 | 0,55 | | |
| Consumo en (kWh) por movimiento sin sistema de medición | | % kWh útil | % Perdidas por movimiento | (kWh) Netos |
| Arduino + motor de SFV1 | 0,47 | 79,20 | 20,80 | 1,80 |
| Arduino + LDR+ motor SFV 2 | 1,07 | 61,50 | 38,50% | 1,70 |
| Consumo en (kWh) por movimiento con sistema de medición | | % kWh útil | % Perdidas por movimiento | (kWh) Netos |
| SFV1 | 0,98 | 56,74 | 43,26 | 1,29 |
| SFV2 | 1,53 | 44,77 | 55,23 | 1,24 |

4. CONCLUSIONES

Una vez finalizada la presente investigación se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Mediante el uso de los seguidores solares se obtiene un incremento en la captación de energía solar de un 31,63% para el SFV1 y 38,55% para el SFV2 lo que representa un 2,27 y 2,77 kWh superior al rendimiento del panel solar fijo durante los días de estudio según la tabla 7.
- Debido a la capacidad de ajustar su posición en función del ángulo óptimo de incidencia solar a lo largo del día, los seguidores FV en un eje presentan una mayor eficiencia en la captación de energía solar en comparativa con el sistema solar fijo, siendo hasta 25% más eficiente el SFV1 y 24% el SFV2 (considerando las pérdidas de energía en ambos casos) tal y como se lo muestra en la Tabla 7. Esto es muy importante ya que el sistema SFV2 tiene un costo superior al SFV1 según la Tabla 6, por lo tanto, resulta más conveniente el SFV1 por obtener casi los mismos valores porcentuales de extracción energética.
- Mientras que el seguidor solar por sensores LDR es quién más porcentaje de producción adicional consigue, también es quién más energía pierde en el movimiento ya que su motor siempre está activo y el SFV1 solo ejecuta movimientos en las horas programadas, quedando así con un porcentaje de energía levemente superior. Como se muestra en la Tabla 4, el sistema de rastreo justifica su uso en lugares donde existe un índice continuo de buena radiación solar, tal y como se lo demostró en el día 22 de junio, mientras que en lugares donde el índice de radiación es bajo y escaso no se justifica el uso de estos sistemas, ya que la diferencia de producción es despreciable según se observa en el día 2 de julio.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] I. Pazmiño, D. Ochoa, E. P. Minaya, and H. P. Mera, "Use of Battery Energy Storage Systems to Enhance the Frequency Stability of an Islanded Microgrid Based on Hybrid Photovoltaic-Diesel Generation.," Energy and City. CSECity 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 379, 2022.

[2] S. Gochhait, R. Asodiya, T. Hasarmani, V. Patin and O. Maslova, "Application of IoT: A Study on Automated Solar Panel Cleaning System," 4th International Conference on Electrical, Control and Instrumentation Engineering (ICECIE), Kuala Lumpur, Malaysia, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICECIE55199.2022.10000375, 2022



- [3] A. Barman, M. Islam, M. Mannan and M. B. H. Bhuian, "Energy Payback Analysis of Building Integrated Photovoltaic of High-rise Buildings in Urban Areas," International Conference on Energy and Power Engineering (ICEPE), Dhaka, Bangladesh, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICEPE56629.2022.10044909, 2022.
- [4] C. A. Belhadj, A. M. Ba-Abbad and R. Ben-Mansour, "An Integrated Thermal and Electrical Model for PV Panel Performance," 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Yasmine Hammamet, Tunisia, 2018, pp. 769-772, doi: 10.1109/SSD.2018.8570608, 2018.
- [5] M. H. Bin Ishak, N. Burham, M. Masrie, Z. Janin and R. Sam, "Automatic Dual-Axis Solar Tracking System for Enhancing the Performance of a Solar Photovoltaic Panel," IEEE 9th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA), Kuala Lumpur, Malaysia, 2023, pp. 279-283, doi: 10.1109/ICSIMA59853.2023.10373430, 2023.
- [6] C. M. Alarcón Aguirre and C. D. Lopéz Estévez, "Desarrollo e Implementación del Control de un Seguidor Solar en un eje con Estrategias de Posicionamiento Para Paneles Fotovoltaicos en la Ciudad de Quito," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2019.
- [7] V. Kher, S. Sharma, S. H. M, M. N, Y. O. M and N. A. Bhinge, "Scheduled single axis solar tracker system for improvisation of energy efficiency," 4th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT), Tirunelveli, India, 2022, pp. 787-791, doi: 10.1109/ICSSIT53264.2022.9716418, 2022
- [8] R. Z. Suárez and H. F. V. Flores, "Comparación tecno-económica de la implementación de algoritmo de retroceso en sistemas fotovoltaicos sobre terreno con seguidores solares de un eje en Honduras.," ENERLAC. Revista de energía de Latinoamérica y el Caribe, vol. 5, pp. 72–90, 2021.
- [9] Á. Rey-Baltar de la Rica, "Diseño y análisis de un actuador lineal electromecánico anti bloqueante.," Escuela de Ingeniería de Bilbao, Bilbao, 2023.
- [10] M. Gutiérrez Chávez, "Seguidor Solar con Plataforma Stewart (Solar Tracker with Stewart Platform)," Universidad de Cantabria, 2022.
- [11] "IEEE Draft Recommended Practice for Testing the Performance of Stand-Alone Photovoltaic Systems," in IEEE P1526/D7, August 2020 , vol., no., pp.1-31, 3 Sept. 2020.



Anghelo A. Moreira Espinoza. - Nació en Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador en 1999. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí en 2023.



Juan Carlos Intriago. - Nació en Manabí en 1992. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí en 2023.



Iván P. Pazmiño Ordoñez.—Ingeniero Eléctrico, Escuela Politécnica Nacional, 2015. M.Sc. Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Madrid, 2019. MBA mención Operaciones de Sectores Estratégicos, Escuela Politécnica Nacional, 2023.

Actualmente se desempeña como Docente en la Carrera de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.



Marcos A. Ponce-Jara.—Ingeniero Técnico en Telecomunicaciones, especialidad en Sistemas Electrónicos, Universidad Politécnica de Cataluña, España (UPC), 2008. Doctor en Tecnologías Industriales, Universidad Nacional de Educación

a Distancia de España (UNED), 2019. Actualmente se desempeña como Docente en la Carrera de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.



Milton E. Moreano Alvarado.—Ingeniero Eléctrico, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM) (2009), Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética, Universidad de Zaragoza, España (2014).

Actualmente es Docente en la carrera de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.