

# **Diseño e implementación de un seguidor solar de un eje para la optimización de un sistema fotovoltaico de 100 W aplicando cálculos matemáticos y automatización industrial**



*Design and implementation of a single axis solar tracker for the optimization of a 100 W photovoltaic system applying mathematical calculations and industrial automation*

Mayra Alejandra Pacheco Cunduri.<sup>1</sup>, Isidoro Enrique Tapia Segarra.<sup>2</sup> & Esteban Augusto Guevara Cabezas.<sup>3</sup>

Recibido: 23-04-2020 / Revisado: 14-05-2020 / Aceptado: 24-06-2020 / Publicado: 03-07-2020

## **Abstract.**

**DOI:** <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v4i3.1359>

This work focuses on the design of a single-axis solar tracker, which will allow the optimization of energy capture from a 100-watt photovoltaic solar system implemented in the city of Riobamba, province of Chimborazo. Initially, mathematical calculations are carried out on environmental and physical parameters important in the selection of the optimal materials for the mechanical structure of the solar tracking system and its construction, also important for the proper selection of the electronic and automatic control elements necessary for the single-axis solar tracker. The designed system is composed of electronic sensors of current, voltage, irradiance and HDR's, which make it possible to calculate the nominal power generated by the solar tracker, the total irradiance captured by the solar panel over time during the day, solar elevation angle (altitude) and solar azimuth angle; values from which and using mathematical methods, programming and automatic control techniques, have allowed in this work to design and program 2 solar tracking algorithms: solar tracking by astronomical programming and solar tracking by light point, guaranteeing with them an incidence perpendicular to the sun on the system during the day

---

<sup>1</sup> Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. mayra.pacheco@esPOCH.edu.ec

<sup>2</sup> Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. itapia@esPOCH.edu.ec

<sup>3</sup> Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. esteban.guevara@esPOCH.edu.ec

and thus achieving the objective of maximum energy capture and maximum production of the photovoltaic system. In the system, the information obtained from the census variables and the calculated values is stored on a microSD memory card and through an ethernet connection the user can view them in real time through a graphic interface (HMI). Finally, once the monitoring algorithms have been implemented and the system is in operation, using as a reference a 100 W photovoltaic system with fixed positioning installed in the city of Riobamba under the same conditions as the single axis solar monitoring system, it is carried out a comparison between this and the photovoltaic system for solar tracking of a horizontal axis, counteracting the values of the surveyed variables and the calculated values of nominal power, irradiance, solar elevation angle (altitude) and solar azimuth angle measured for each one systems. From which it is concluded that the one-axis solar tracking system exceeds the fixed photovoltaic system in efficiency in values between 8.51% to 35.46%.

**Keywords:** single-axis solar tracker, alternative energies, energy efficiency, solar panels, energy captation.

### **Resumen.**

El presente trabajo se enfoca en el diseño de un seguidor solar de un eje, el cual permitirá la optimización de captación de energía de un sistema solar fotovoltaico de 100 vatios implementado en la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo. Inicialmente se realizan cálculos matemáticos sobre parámetros ambientales y físicos importantes en la selección de los materiales óptimos para la estructura mecánica del sistema de seguimiento solar y su construcción, además importantes también para la selección apropiada de los elementos electrónicos y de control automático necesarios para el seguidor solar de un eje. El sistema diseñado, está compuesto por sensores electrónicos de corriente, voltaje, irradiancia y HDR's, los cuales hacen posible el cálculo de la potencia nominal generada por el seguidor solar, irradiancia total captada por el panel en el transcurso del tiempo durante el día, ángulo de elevación solar (altitud) y ángulo de azimut solar; Valores a partir de los cuales y utilizando métodos matemáticos, de programación y técnicas de control automático, han permitido en este trabajo diseñar y programar 2 algoritmos de seguimiento solar: seguimiento solar por programación astronómica y seguimiento solar por punto luminoso, garantizando con ellos una incidencia perpendicular del sol sobre el sistema durante el día y consiguiendo así el objetivo de máxima captación de energía y máxima producción del sistema fotovoltaico. En el sistema, la información obtenida de las variables censadas y los valores calculados, se almacena en una tarjeta de memoria microSD y mediante una conexión ethernet el usuario puede visualizarlas en tiempo real mediante una interfaz gráfica (HMI). Finalmente, una vez implementados los algoritmos de seguimiento y estando el sistema en funcionamiento, utilizando como referencia un sistema fotovoltaico de posicionamiento fijo de 100 W instalado en la ciudad de Riobamba bajo las mismas condiciones que el sistema de seguimientos solar de un eje, se realiza una comparación entre este y el sistema fotovoltaico de seguimiento solar de un eje horizontal planteado, contrarrestando los valores de las

variables censadas y los valores calculados de potencia nominal , irradiancia, ángulo de elevación solar (altitud) y ángulo de azimut solar medidos para cada uno de los sistemas. A partir de lo cual se concluye que el sistema de seguimiento solar de un eje supera en eficiencia al sistema fotovoltaico fijo en valores entre 8,51% al 35,46%.

**Palabras claves:** energías alternativas, eficiencia energética, paneles solares, captación energética, seguidor solar de eje horizontal.

### **Introducción.**

En la actualidad los combustibles fósiles son utilizados en su mayoría como fuentes primarias de energía para a través de su conversión producir energía térmica y energía eléctrica. Pero el inconveniente del uso de ellos es que los procesos de combustión, extracción, conversión y el transporte de estos combustibles fósiles genera una consecuencia directa en el daño al medio ambiente por efecto invernadero. Aproximadamente un 80% de las emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial provienen del consumo y de la transformación de los combustibles fósiles en diferentes formas de energía.( Alonso Montes et al., 2007)

A partir de estudios realizados e información obtenida por la corporación para la investigación energética C.I.E., “La ubicación geográfica del Ecuador, lo convierte en un país privilegiado en lo que a recurso solar se refiere. Esto se debe a que el ángulo de incidencia de la luz solar es perpendicular a nuestra superficie durante todo el año, situación que no ocurre en otros sitios del planeta, en donde el ángulo de incidencia de la luz solar varía acorde a las estaciones del año”. ( Alonso Montes et al., 2007)

Esta condición nos pone como ecuatorianos en una condición que puede ser una gran oportunidad para la incursión en el campo de la Energía solar y esta puede llegar a ser una de las grandes potencias en generación de energía eléctrica en el país. Ya que, debido a nuestra ubicación privilegiada (Zona Ecuatorial) poseemos horas de sol aproximadamente 12 h constantes durante el día. Existen varias tecnologías utilizadas en sistemas de captación: seguidores solares fijos, seguidores solares de un eje y seguidores solares de 2 ejes (Miranda Armas, 2015). La tecnología más apropiada para el seguimiento solar en el Ecuador por sus condiciones es la que usa un eje horizontal la cual puede ser aplicada a grandes centrales fotovoltaicas ubicada en la zona ecuatorial. (García Reyes & Peñate Santos, 2016)

Los paneles fotovoltaicos son elementos encargados de realizar la captación de la radiación solar directa e indirecta para transformarla en corriente eléctrica a una potencia nominal propia de cada panel solar, estos paneles pueden llegar a alcanzar su punto de máxima potencia cuando la radiación solar incide de manera perpendicular a los rayos solares, es decir logrando que a lo largo del día el panel y los rayos solares se encuentren de forma perpendicular (Bhuvaneswari et al., 2013). Para conseguir este objetivo se han creado los sistemas de seguimiento solar los cuales tienen como objetivo intentar reproducir el comportamiento de los girasoles, el cual hace que el panel permanezca todo el tiempo de

manera perpendicular al sol lo que maximiza la captación de radiación solar como se ha mencionado. (Rana, 2013)

Para el presente estudio se han utilizado datos provenientes de un sistema fotovoltaico de 100 W instalado en la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo en el cual se utilizan los paneles solares de forma fija. Este sistema está compuesto por una estructura metálica empotrada y fija, pero al tener esta condición de rigidez el sistema no presenta un máximo rendimiento de captación solar. Debido a lo expuesto el presente estudio plantea la necesidad de implemente un sistema de seguimiento solar de un eje horizontal el cual funcione con un mecanismo automatizado para la operación óptima del sistema fotovoltaico de 100 W en la ciudad de Riobamba provincia de Chimborazo, el cual realiza su movimiento en un grado de libertad siguiendo el movimiento del sol en la dirección de Este a Oeste; captando de esta manera el panel solar la máxima radiación solar incidente.

Se realiza una comparación de los datos energéticos obtenidos por el sistema de captación solar fijo, y el sistema fotovoltaico de seguimiento solar implementado, con el fin de definir cuál de los dos sistemas presenta mejores eficiencias en captación y transformación de la energía solar. Bajo las condiciones de operación planteadas para los mismo. Buscando de esta manera demostrar que el seguidor solar de un eje permite un máximo aprovechamiento de la energía solar.

La implementación de este sistema de seguimiento solar de un eje permite el máximo aprovechamiento de la energía solar y la producción optima de energía del Sistema fotovoltaico de 100 W, Siendo una ventaja para los equipos a los cuales abastece el sistema, ya que les permite contar con energía óptima y continua disponible para su funcionamiento durante todo el día. Además, la implementación de este seguidor solar de un eje sirve de mucha utilidad para la comunidad Politécnica, y resulta de gran aporte a los Centros de Investigación existentes en la ESPOCH y la Facultad Informática, los cuales realizan constantemente investigación en el área de las energías renovables también llamadas energías limpias, beneficiando de igual manera al personal docente y estudiantil, permitiéndoles poner en práctica los conocimientos adquiridos durante la carrera.

### **Metodología.**

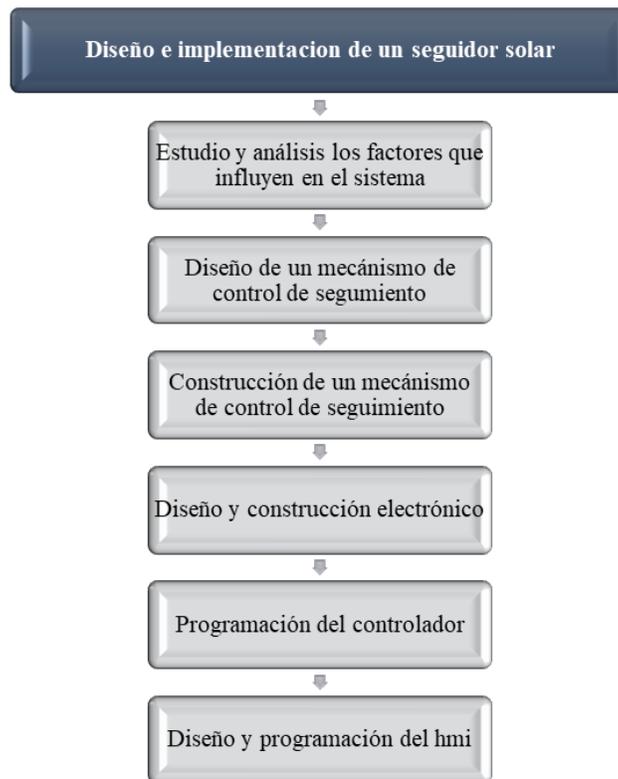
El Sistema seguidor solar de un eje, se ha instalado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Alimentando a los equipos de la estación meteorológica ubicada en las cercanías de la facultad de ciencias. El seguimiento solar se realiza en un eje, siguiendo el movimiento del sol el cual durante el día va de Este a Oeste desde el amanecer hasta el atardecer. De este modo se logra la máxima captación de radiación solar incidente y permitiendo además visualizar los parámetros del sistema como: potencia nominal generada, corriente nominal, voltaje, ángulo azimutal y ángulo de elevación solar en un sistema HMI instalado en conjunto con el sistema.

Para la implementación del sistema planteado se ha implementado la metodología planteada en la figura 1, la cual detalla los pasos a seguir para diseño y construcción del sistema de

seguimiento solar de un eje. Inicialmente se parte desde el estudio y el análisis de los factores y variables que influyen en el funcionamiento del sistema fotovoltaico.

Es decir, que se realiza un análisis de las condiciones climáticas bajo las cuales el sistema debe operar (Velocidades de viento, presión del aire sobre el sistema físico, etc) considerando que el sistema debe operar dicho sistema en las peores condiciones climáticas sin fallar. Una vez realizado el análisis en la primera etapa, se realiza el diseño de un mecanismo de control automático para el seguimiento solar utilizando los diferentes métodos o algoritmos de seguimiento conocidos. Como siguiente paso la metodología plantea la construcción del mecanismo de control de seguimiento solar, seguido de la realización del diseño y construcción del sistema electrónico para luego continuar con la programación del controlador (PLC) y finalmente concluir con el diseño y programación del HMI (Interfaz Hombre Máquina) la cual permitirá al usuario del sistema poder lograr una lectura de las variables arrojadas por el sistema y un control mucho más sencillo del mismo.

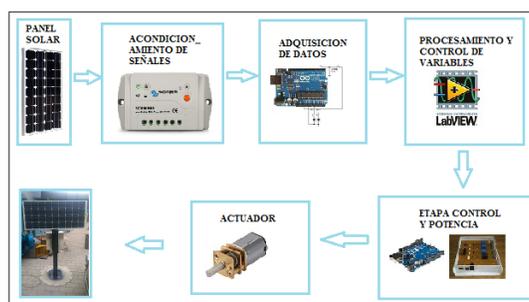
**Figura 1.** Metodología y fases para Implementación de un Seguidor Solar de un eje



**Fuente:** Elaboración propia.

El sistema de seguimiento solar de un eje, está formado por una estructura metálica móvil, que permitirá sostener la parrilla que soporta al panel solar de 100 W. La figura 3 muestra un diagrama de bloques de la estructura del sistema con cada uno de los elementos que lo componen de forma detallada con cada una de las fases previamente explicadas en la metodología.

**Figura 2.** Diagrama de Bloques del Sistema Seguidor Solar



**Fuente:** Elaboración propia.

### **Diseño de la estructura metálica del sistema de seguimiento solar.**

Inicialmente se realiza un análisis matemático de los factores ambientales que inciden en el lugar en donde se ha montado el sistema de seguimiento.

Estos factores mencionados son los que se han considerado para la selección de los materiales de construcción de la estructura del sistema seguidor solar y son: velocidad y dirección de viento, densidad del aire, temperatura ambiente, etc.

Una vez considerada la incidencia de los factores ambientales previamente mencionados y al hacer cálculos matemáticos y análisis de la resistencia de la estructura.

Se propone para este sistema de seguimiento solar de un eje una estructura auto portante, constituida de: una base estática (pedestal) de metal de acero y pintado con pintura anticorrosiva y una parrilla que sujeta al panel fotovoltaico de 100 W cuya estructura es de aluminio categoría 6 de perfil tubo cuadrado.

La estructura diseñada soporta el peso de todos y cada uno de los elementos que la componen y es resistente a los esfuerzos mecánicos que pudieran existir por la acción de los factores climáticos que inciden en el lugar.

El pedestal se ha elaborado en metal de acero al carbono en un porcentaje del 0,35% de este material, utilizando de esta manera tubo estructurado de 4 pulgadas el cual se ha seleccionado por sus propiedades mecánicas ligereza y poca corrosión, adaptándose con estas características mejor a los cambios climáticos que se tiene en la sierra ecuatoriana, específicamente en la ciudad de Riobamba.

Sin embargo, a pesar de la resistencia del material por sí mismo a la corrosión, se coloca una capa protectora de pintura contra la corrosión, evitando de esta manera que la estructura sea propensa al óxido que es perjudicial para este tipo de metal.

La construcción de la parrilla que sujeta al panel solar de 100 W utiliza aluminio de uno y medio de pulgada la cual está recubierta también de una capa de pintura resistente a la corrosión.

**Tabla 1.** Factores de constitución y ambientales influyentes, calculados para el diseño de la estructura del sistema fotovoltaico

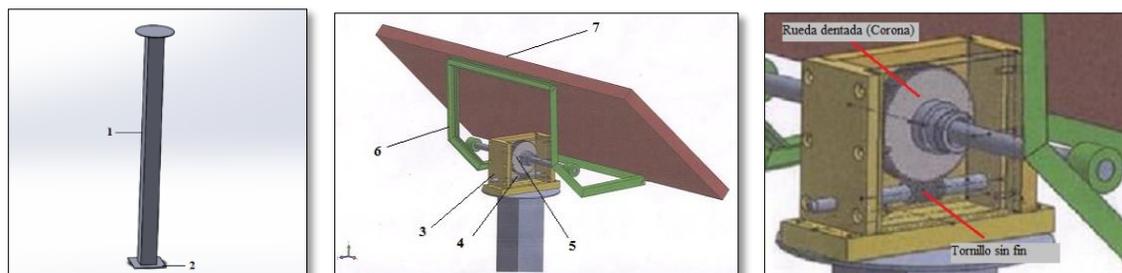
<b>Factores físicos y ambientales influyentes sobre la estructura</b>	<b>Valor</b>
Mt (masa total)	12kg
Wt (peso total)	117,36 n
Vvmax(velocidad de viento maxima)	13,26 m/s
S (superficie del panel)	0,64 m2
<b>Factores dependientes influyentes sobre la estructura</b>	<b>Valor</b>
Fvmax (fuerza del viento max ejercida)	13,212 kgf
Tt (torque total)	-17,6 n.m
Pmin (potencia minima del motor)	0,00128 watts
Velocidad angular mínima	0,04 rad/s
Motorreductor alemán buhler de 12 voltios dc, de 60 kg.cm y de 100 vatios.	

**Fuente:** Elaboración propia.

Una vez determinados y conocidos los factores indicados en la tabla 1 y variables que influyen en el sistema, se procede a realizar el diseño del sistema mecánico utilizando el software de simulación CAD SolidWorks 2017 como muestra la figura 3.

El sistema se detalla con los siguientes elementos: pedestal para el soporte de la estructura giratoria (1), placa de empotramiento que une con otra placa que es fundida en la superficie con el hormigo mediante pernos y tornillos (2), Caja de engranajes, la cual sostiene a la rueda dentada y tornillo sin fin (3), Tornillo sin fin (4), rueda dentada o corona (5), parrilla o catasta (6), panel solar de 100 vatios (7)

**Figura 3.** Diseño de la estructura de seguimiento solar utilizando el software de simulación CAD SolidWorks 2017



**Fuente:** Elaboración propia.

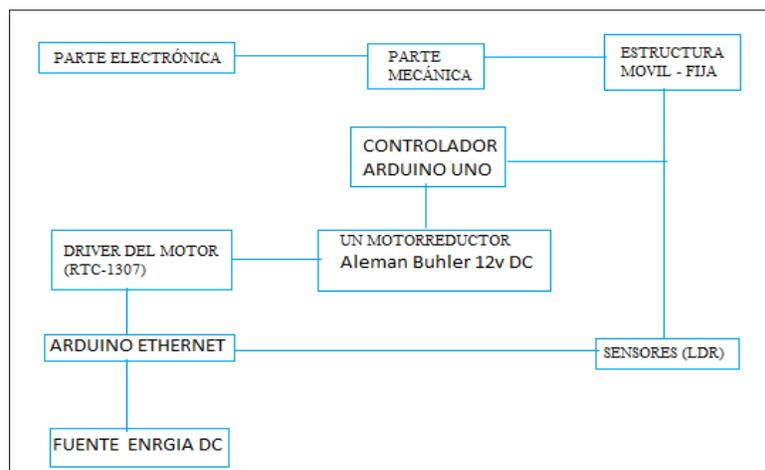
El sistema utiliza un motor reductor DC, debido a sus altos niveles de eficiencia y alto uso en sistemas de seguimiento solar ya implementados (Arrieta Morelo & Puello Bravo, 2018), dado que cumple con las especificaciones simulado en SolidWorks 2017.

Además, el sistema de transmisión mecánica utilizado es un mecanismo de un conjunto de elementos encargados de transmitir el movimiento desde el eje del motor hasta la rueda dentada motor acoplada con mediante el uso de un tornillo sin fin (Caja Reductora).

La caja reductora es muy importante en el diseño y construcción de un sistema de transmisión, ya que, a través de una relación matemática permite disminuir la velocidad del motor y aumentar el torque del motor DC (Sánchez, 2016); un torque alto es importante en la transmisión suave y exacta de movimiento, con su configuración correcta se evita que el sistema provoque un movimiento no deseado por causas de factores externos (físicos, ambientales, etc). El tornillo sin fin se acopla al motor reductor y se mueve a la misma velocidad que el eje del motor reductor, por medio de la caja reductora se consigue disminuir las revoluciones con la que gira el motor y aumentar el torque del sistema.

### Diseño y Construcción del sistema de Control Automático.

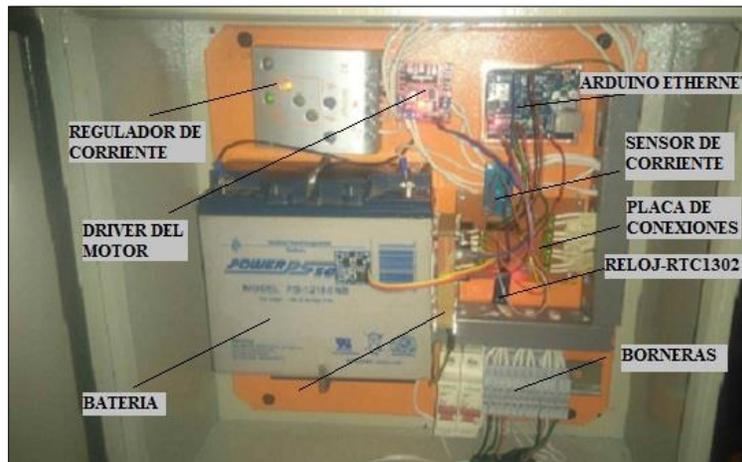
**Figura 4.** Diagrama de bloques del sistema de control automático del seguidor solar de un eje



**Fuente:** Elaboración propia.

Como unidad de control para el diseño del sistema de control automático se ha utilizado un Arduino uno, dando las órdenes a todos los componentes del circuito en base a la salida del comparador, control a su vez el motor reductor Aleman Buhler 12v DC. Esta unidad de control acciona el motor reductor de engranajes DC y genera un giro del eje del motor en sentido antihorario u horario, lo hace detenerse o avanzar. Cada uno de esos movimientos se ejecutan en función de las necesidades del sistema al momento de colocar y mantener el panel solar apuntando siempre de forma perpendicular a los rayos solares incidentes.

**Figura 5.** Tablero de control del sistema seguidor solar de un eje



**Fuente:** Elaboración propia.

Para el seguimiento solar del sistema el algoritmo de programación utilizado es un algoritmo de programación astronómica el cual es también conocido como algoritmo de programación cronológica (Tejada & Motoche, 2012).

Este algoritmo fue programado para que su funcionamiento sea continuo durante 12 horas diarias desde que el sol sale hasta que el sol se oculta. Para manejar estos algoritmos se manejan los conceptos en los cuales se conoce que, el movimiento de traslación del planeta tierra ocurre en  $360^\circ$  cada 24 horas, por lo tanto, se estable que  $360^\circ/24 \text{ h} = 15^\circ/\text{h}$ . (Bahrami et al., 2016)

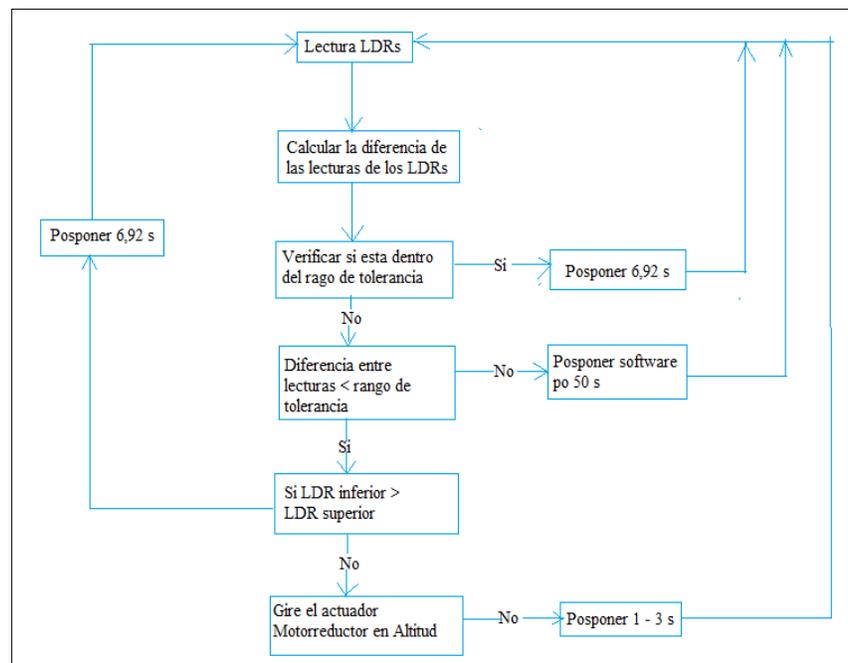
De acuerdo con nuestro algoritmo de programación astronómica, cada 6,92 minutos aproximadamente el controlador Arduino uno, envía la señal de encendido al circuito de control para que este gire  $1,7^\circ$ , este proceso lo realiza continuamente hasta alcanzar los  $180^\circ$  grados de movimiento, ángulo que alcanzaría cuando el sol está por ocultarse al atardecer. El sistema de seguidor solar permanece en esa posición durante un tiempo determinado para aprovechar la radiación solar y finalmente el controlador envía una señal de reloj al sensor final de carrera para que la estructura regrese a la posición inicial de  $0^\circ$  listo para comenzar la ejecución del algoritmo de seguimiento nuevamente el siguiente día; al no haber energía solar durante la noche, el sistema de seguimiento solar permanece en pausa ya en esta posición de  $0^\circ$ .

El controlador Arduino uno maneja además una segunda alternativa de algoritmo de seguimiento por punto luminoso, el cual consiste en seguir el movimiento del sol por medio de la configuración de cuatro fotorresistencias (LDR) colocados en puntos estratégicos del panel solar que realiza el movimiento, estos sensores toman el punto más luminoso medido en cada uno de los sensores y estos valores censados y enviados a un circuito de comparación entre sí (Seme et al., 2016), comparación que es realizada y el resultado es enviado al controlador (Arduino uno) el cual la analiza y en función del valor censado envía una orden

al motor reductor, el cual se mueve hacia al lado en el que se ha medido una mayor luminosidad permitiendo así realizar un seguimiento estratégico del sol y de esta manera lograr la máxima captación de radiación solar incidente.

Durante este movimiento el control analiza cuando los rayos solares están incidiendo aproximadamente de forma perpendicular al panel solar, una señal de detener o a pagar el motor es enviada por el controlador hacia el actuador, por otro lado cuando los rayos no están incidiendo de forma perpendicular al panel solar o en su defecto existe un desbalance en la estructura mecánica con respecto al punto luminoso medido en el panel, una señal de activación es enviada por el controlador hacia el motor reductor el cual debe corregir el ángulo de error medido.

**Figura 6.** Diagrama de flujo de la programación del controlador por seguimiento punto luminoso



**Fuente:** Elaboración propia.

El algoritmo de programación del seguimiento solar por punto luminoso consiste en, cuando el cielo o la atmósfera esta despejada sin nubosidad e irrupciones al paso de los rayos solares, los sensores reciben una señal en función de la luz incidente en sus celdas la cual es enviada al circuito de comparación y de control para que realice el proceso de movimiento del panel solar hacia la posición requerida según la posición del sol manteniendo siempre el sistema ubicado de forma perpendicular a los rayos solares (Llangarí Yaguachi, 2015). La irradiación solar medida por los sensores es transformada en voltaje, este nivel de voltaje sirve como retroalimentación para el sistema de control y hace que este envíe la señal deseada al sistema, bajo esa retroalimentación el sistema de seguimiento solar de un eje ubica al panel solar en

la posición requerida para maximizar la captación de energía solar del sistema, permitiéndole así obtener valores considerablemente mayores de parámetros energéticos en comparación con un sistema solar fotovoltaico fijo.

Uno de los inconvenientes de la programación del sistema de control automático por seguimiento de punto luminoso es que se puede ver afectado por factores externos que afecten a la luminosidad incidente sobre los sensores (Radiación difusa). Estos factores pueden ser por ejemplo la existencia de nubosidad; con la presencia de este agente natural que no se puede controlar, el sistema no puede leer correctamente los puntos de luz y así el panel no puede ubicarse en el ángulo y posición óptima (perpendicular a los rayos solares) para lograr la captación máxima de la irradiación solar (Volkov et al., 2016).

El sistema queda entonces desbalanceado con respecto a la radiación solar incidente disminuyendo de esta manera la cantidad de energía captada por el panel solar y resultando aquello en una menor cantidad de energía eléctrica obtenida a la salida del sistema. Debido a estos inconvenientes, el algoritmo implementado en el sistema es el algoritmo de programación astronómica, el cual está basado en ecuaciones matemáticas para el movimiento lo cual lo hace más robusto y le añade un ligero grado de complejidad a la programación del controlador.

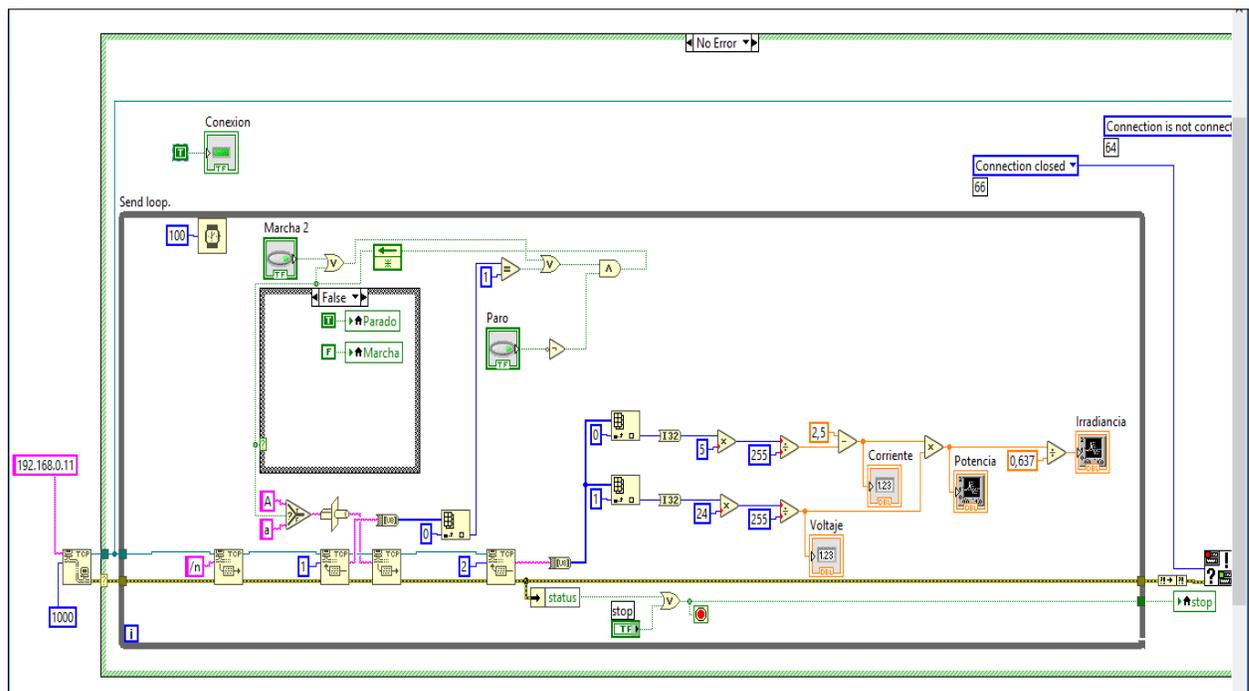
### **Desarrollo de la Interfaz Humano Máquina (HMI)**

La interfaz Humano Máquina (HMI) está conformada por un panel gráfico, el cual le permite al usuario visualizar variables y señales de los parámetros energéticos medidos en el sistema de seguimiento solar de un eje durante las 12 horas de aprovechamiento solar y otros indicadores adicionales. Los elementos del panel de la interface HMI se detallan a continuación:

- Botón de Marcha: Le habilita al usuario la posibilidad de poner en ejecución o en funcionamiento el sistema seguidor solar de un eje
- Indicador de Corriente: Permite visualizar los indicadores de corriente del panel solar a lo largo del día de forma en tiempo real, es una variable medida en amperios teniendo un valor máximo de 11,66 amperios aproximadamente, valor que es considerado aproximadamente la corriente nominal del panel de 100 W.
- Indicador de Voltaje: Permite visualizar el voltaje que llega al terminal de salida del panel solar, esta medida varía a lo largo del día y su unidad de medida es en Voltios, teniendo un valor máximo de 12 voltios aproximadamente debido a que es el voltaje nominal del panel solar en el punto de máxima captación de potencia.
- Botón de Paro: Permite detener el funcionamiento del sistema dejándolo sin ejecución.
- Botón Stop Programa: Permite poner una pausa al programa que se está ejecutando en el controlador.

- Indicador de Conexión. Permite identificar si el sistema se encuentra conectado o desconectado mediante una luz. Si la luz está encendida se entiende que el sistema se encuentra operando, mientras que si la luz está apagada se entiende que el sistema está apagado.
- Grafica de Potencia medida en panel solar: Permite visualizar de manera gráfica los datos procesados en tiempo real de la potencia entregada por el panel solar, dándole al usuario una herramienta para interpretar como va cambiando la variable de potencia en función de los valores de corriente y de voltaje medidos en el panel solar.
- Irradiancia: Permite observar el valor de la irradiancia incidente sobre el panel solar durante el día en tiempo real, mostrando este valor de forma gráfica.
- Angulo azimutal: Permite observar el ángulo de desviación entre la línea del punto cardinal norte y el panel.
- Angulo de elevación: Permite observar el ángulo que cambiara durante el día de 0 a 180° aproximadamente.

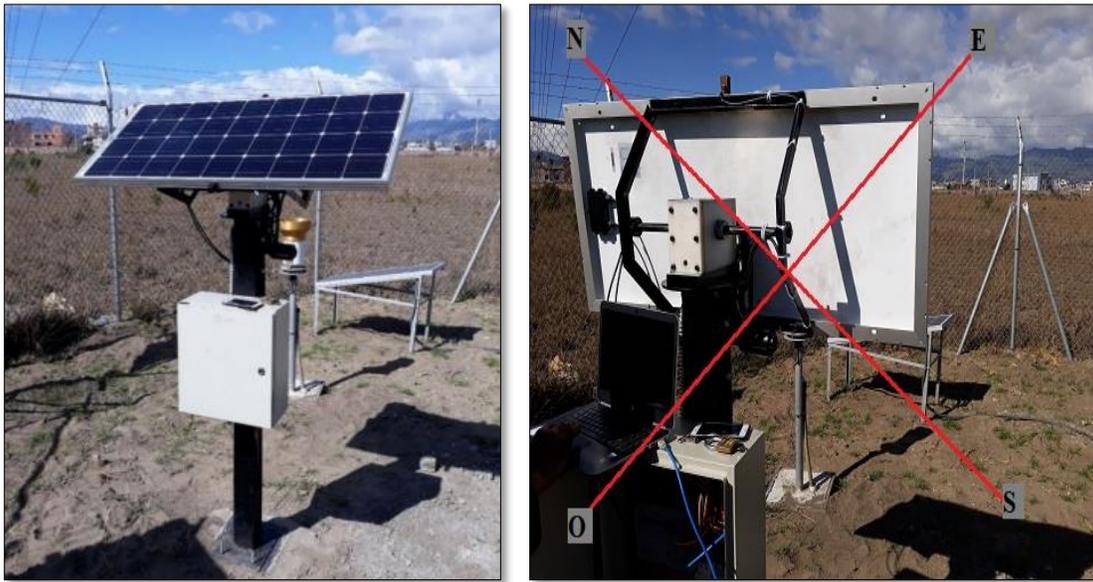
**Figura 7.** Diagrama de bloque de la interfaz Humano Máquina HMI



**Fuente:** Elaboración propia.

## Resultados.

En primera instancia, una vez concluido el diseño, construcción del sistema se seguidor solar de un eje, se procede a realizar la instalación y situ como muestra la figura 8.

**Figura 8.** Sistema de seguimiento solar instalado in situ

**Fuente:** Elaboración propia.

Una vez instalado el sistema in situ se procede a poner en funcionamiento el sistema de seguimiento solar y realizar las pruebas respectivas.

En una primera fase de pruebas, se procede a poner en funcionamiento del sistema solar fijo con un ángulo de inclinación  $30^\circ$  apuntando hacia el norte, con el fin de monitorear los parámetros energéticos obtenidos de este sistema, es decir los valores de cada una de las variables correspondientes al comportamiento de un sistema de posicionamiento fijo.

El sistema fotovoltaico fijo fue monitoreado durante semanas, tomando datos durante horas, días y también en semanas de las variables de voltaje, corriente, potencia generada por el panel solar e irradiación.

En conjunto, y una vez puesto en marcha el sistema fijo, inmediatamente se pone en marcha el sistema de seguimiento solar de un eje implementado y al igual que con el sistema fijo se procede a monitorear durante semanas, tomando datos durante horas, días y también en semanas de las variables de voltaje, corriente, potencia generada por el panel solar e irradiación.

Una vez monitoreados los valores de cada uno de los sistemas, se realiza un análisis de comparativo de las variables medidas y analizadas en cada uno de ellos con el fin de medir la eficiencia de captación y producción de energía del sistema de posicionamiento fijo versus el sistema de seguimiento solar de un eje.

**Resultados sistema de posicionamiento fijo vs sistema de seguimiento solar de un eje analizado durante un día tipo.**

**Tabla 2.** Eficiencia medida en el Sistema de posicionamiento fijo en horas

<b>Sistema solar fijo medido en horas - 03/07/2018</b>						
<b>Puntos de lectura</b>	<b>Hora</b>	<b>Corriente [a]</b>	<b>Voltaje [v]</b>	<b>Irradiancia [w/m<sup>2</sup>.h]</b>	<b>Potencia [w]</b>	<b>Eficiencia</b>
Punto inicio	6:00:38	3,06	11,67	357,49	35,69	35,69%
Pico máximo	11:00:38	8,56	12,40	1062,95	106,13	106,13%
Punto finalización	18:00:38	2,82	7,04	199,74	19,85	19,85%

**Fuente:** Elaboración propia.

Las variables mostradas en la Tabla 2 han sido monitorizadas en el sistema solar fijo, durante las 12 horas diarias útiles para el sistema desde que el sol sale en la mañana aproximadamente a las 6:00 am, hasta que el sol se oculta en el atardecer aproximadamente a las 18:00 pm. Los datos tomados y analizados corresponden a tres diferentes horas durante el día, las cuales han sido consideradas más relevantes para el análisis e interpretación de los datos.

De los valores obtenidos, el valor máximo de potencia se registró a las 11:00:38 del 03 de julio del 2018 con un valor porcentual de 106,13% y valor más bajo se registró en la misma fecha en el punto de finalización a las 18:00:38 con un valor porcentual de 19,85%.

**Tabla 3.** Eficiencia medida en el Sistema de seguimiento solar de un eje en horas

<b>Sistema de seguimiento solar de un eje en horas 03/08/2018</b>							
<b>Puntos lectura</b>	<b>Horas</b>	<b>Corriente [a]</b>	<b>Voltaje [v]</b>	<b>Irradiancia [w/m<sup>2</sup>.h]</b>	<b>Potencia [w]</b>	<b>Eficiencia</b>	<b>Aumento energía</b>
<b>Punto inicio</b>	6:00:38	4,95	9,61	476,66	47,59	47,59%	11,90%
<b>Pico máximo</b>	14:00:38	11,28	12,55	1418,12	141,59	141,59%	35,46%
<b>Punto finalización</b>	18:00:38	3,14	9,04	284,01	28,36	28,36%	8,51%
Valor promedio de la eficiencia de captación de energía medida horariamente con el seguidor solar de un eje							18,62%

**Fuente:** Elaboración propia.

Las variables mostradas en la Tabla 3 han sido monitorizadas en el sistema de seguimiento solar de un eje, durante las 12 horas diarias útiles para el sistema desde que el sol sale en la mañana aproximadamente a las 6:00 am, hasta que el sol se oculta en el atardecer aproximadamente a las 18:00 pm.

Los datos tomados y analizados corresponden a tres diferentes horas durante el día, las cuales han sido consideradas más relevantes para el análisis e interpretación de los datos.

De los valores obtenidos, el valor máximo de potencia se registró a las 14:00:38 del 03 de agosto del 2018 con un valor porcentual de 106,13% y valor más bajo se registró en la misma fecha a las 18:00:38 con un valor porcentual de 28,36%.

### Resultados sistema de posicionamiento fijo y sistema de seguimiento solar de un eje analizado durante una semana tipo.

**Tabla 4. Eficiencia medida con el sistema de posicionamiento fijo en días**

Sistema solar fijo en días						
Puntos lectura	Fecha	Corriente [a]	Voltaje [v]	Potencia [w]	Irradiancia [w/m <sup>2</sup> .h]	Efeciencia
Punto inicio	02/07/2018	6,81	11,87	80,87	810,00	80,87%
Valor mínimo	07/07/2018	4,92	11,99	59,05	591,45	59,05%
Pico máximo	09/07/2018	7,56	12,01	90,82	909,66	90,82%

**Fuente:** Elaboración propia.

Los datos tomados y analizados corresponden a tres diferentes días en las fechas marcadas en la tabla 4, las cuales han sido consideradas más relevantes para el análisis e interpretación de los datos, además son graficadas más adelante. De los valores obtenidos, el valor máximo de potencia se registró el día 09 de julio de 2018 que es de 90,82%, y valor más bajo se registró el 07 de julio de 2018 con un valor porcentual de 59,05%.

**Tabla 5. Eficiencia medida en el Sistema de seguimiento solar de un eje en días**

Sistema de seguimiento solar de un eje en días							
Puntos lectura	Fecha	Corriente [a]	Voltaje [v]	Potencia [w]	Irradiancia [w/m <sup>2</sup> .h]	Efeciencia	Aumento energía
Punto inicio	02/08/2018	8,23	11,35	93,41	935,59	93,41%	12,54%
Valor mínimo	07/08/2018	6,63	12,35	81,90	820,31	81,90%	22,85%

Pico máximo	09/08/2018	9,84	11,81	116,16	1163,42	116,16%	25,34%
<b>Valor promedio de la eficiencia de captación de energía medida diariamente con el seguidor solar de un eje</b>							20,24%

**Fuente:** Elaboración propia.

Los datos tomados y analizados corresponden a tres diferentes días en las fechas marcadas en la tabla 5, las cuales han sido consideradas más relevantes para el análisis e interpretación de los datos, además son graficadas mas adelante. De los valores obtenidos, el valor máximo de potencia se registró el día 09/08/2018 con un valor porcentual de 106,16% y valor más bajo se registró el día 02 de agosto de 2018 con un valore porcentual de 93,41%.

### Conclusiones.

- Efectuando una comparación de la eficiencia de captación de energía entre los datos obtenidos entre el sistema de posicionamiento solar fijo analizado en horas, se obtienen los valores mostrados en la columna 8 de la tabla 3, valores en los cuales se evidencia un aumento de eficiencia de captación del sistema fotovoltaico al utilizar el sistema de seguimiento solar de un eje en comparación al sistema fijo con un valor promedio de aumento de eficiencia de 18,62 % durante el día.
- Efectuando una comparación de la eficiencia de captación de energía entre los datos obtenidos entre el sistema de posicionamiento solar fijo analizado durante días, se obtienen los valores mostrados en la columna 8 de la tabla 5, valores en los cuales se evidencia un aumento de eficiencia de captación del sistema fotovoltaico al utilizar el sistema de seguimiento solar de un eje en comparación al sistema fijo con un valor promedio de aumento de eficiencia de 20,24 % medida en los diferentes días analizados.
- Haciendo un análisis, se concluye que el sistema más eficiente en la captación y producción de energía es el sistema de seguidor solar de un eje, ya que tiene una eficiencia de captación que va desde el 12,54% al 22,85% de eficiencia en comparación con el sistema de posicionamiento fijo estos datos son tomados en días durante una semana, la eficiencia de captación variara dependiendo del día y los factores climáticos. El aumento de eficiencia promedio es del 20,24 % respecto al rendimiento de un sistema fotovoltaico de posicionamiento fijo, logrando de esta forma con el uso de este la optimización del sistema solar fotovoltaico.

### Referencias bibliográficas.

Miranda Armas, L. R. (2015). Diseño e implementación de un sistema automatizado de seguimiento del sol para el concentrador solar de la UTE. [Trabajo de grado, Ingeniería Mecatrónica, Universidad Tecnológica Equinoccial. Facultad: ciencias de

- la ingeniería]. Repositorio Institucional- Universidad Tecnológica Equinoccial. <http://repositorio.ute.edu.ec/handle/123456789/5796>
- Bhuvaneswari, C., Rajeswari, R., & Kalaiarasan, C. (2013). Analysis of solar energy based street light with auto tracking system. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2(7), 3422-3428.
- García Reyes, P. D., & Peñate Santos, R. A. (2016). Implementación de un seguidor solar en eje horizontal controlado con hardware y software. [Trabajo de grado, Ingeniería Eléctrica]. Universidad del el Salvador].
- 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.[Trabajo de grado, Ingeniería Mecánica, Universidad de Córdoba]. Repositorio Institucional- Universidad de Córdoba. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/700>
- Bahrami, A., Okoye, C. O., & Atikol, U. (2016). The effect of latitude on the performance of different solar trackers in Europe and Africa. *Applied energy*, 177, 896-906. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.103>.
- Seme, S., Štumberger, B., & Hadžiselimović, M. (2016). A novel prediction algorithm for solar angles using second derivative of the energy for photovoltaic sun tracking purposes. *Solar Energy*, 137, 201-211. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.001>
- Alonso Montes, J. I., Fernández Durán, A., Jiménez Suárez, C., Lecuona Ribot, A., Mellado García, F., Plaza Fernández, J. F., ... & Sala Pano, G. (2007). *Energía Solar Fotovoltaica*. Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación. <http://www.coit.es%0A>.
- Rana, S. (2013). A study on automatic dual axis solar tracker system using 555 timer. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 1(4), 77-85.
- SÁNCHEZ, A. (Director). (2016). *Estructuras Para Módulos Fotovoltaicos*. [Video] Centro de investigación en Energía, UNAM
- Volkov, S. N., Samokhvalov, I. V., Du Cheong, H., & Kim, D. (2016). Optical model and calibration of a sun tracker. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 180, 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.04.020>
- Tejada Duque, C. A., & Motoche Rivera, L. C. (2012). Posicionamiento de paneles solares usando lógica difusa para prácticas de laboratorio de control automático. [Trabajo de grado, Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional- Universidad Politécnica Salesiana. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/3278>
-

Llangarí Yaguachi, F. A. (2015). Diseño y desarrollo de un sistema de posicionamiento automático seguidor de la luz solar de un eje, controlado por medio de un microcontrolador y un motor paso a paso como actuador, empleando un control con lógica difusa. [Trabajo de grado, Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional- Universidad Politécnica Salesiana. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/9146>

**PARA CITAR EL ARTÍCULO INDEXADO.**

Pacheco Cunduri, M. A., Tapia Segarra, I. E., & Guevara Cabezas, E. A. (2020). Diseño e implementación de un seguidor solar de un eje para la optimización de un sistema fotovoltaico de 100 W aplicando cálculos matemáticos y automatización industrial. *Ciencia Digital*, 4(3), 336-354. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v4i3.1359>



El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Ciencia Digital**.

El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Ciencia Digital**.

