

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA LA OPTIMIZACIÓN EN EL
PROCESO DE ORIENTACIÓN DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS**

BRAYAN ALFONSO BORNACHERA FLOREZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECATRÓNICA

BARRANQUILLA

2020

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA LA OPTIMIZACIÓN EN EL
PROCESO DE ORIENTACIÓN DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS**

BRAYAN ALFONSO BORNACHERA FLOREZ

Proyecto para optar por el título de Ingeniero Mecatrónico

Asesor Temático

Msc, ING. KELVIN BELEÑO SAENZ

Asesor Metodológico

Msc, ING. SAUL PEREZ PEREZ

Asesor Disciplinar

Msc, ING. CARLOS DIAZ SAENZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECATRÓNICA

BARRANQUILLA

2020

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Barranquilla, 29 de mayo de 2020

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darnos fuerza para continuar en este proceso de formación y obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí. Ha sido el orgullo y el privilegio de ser su hijo, son los mejores padres.

A mis hermanos (a) por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo sentimental, que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios principalmente por guiarme a lo largo de mi vida, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

Gracias a mis padres Delmiro Alfonso Bornachera y Nubia Esther Florez, por ser mi motor y ejemplo para seguir adelante, por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que nos han inculcado.

Agradezco a los profesores de la Facultad de Ingeniería de Universidad Autónoma del Caribe y en especial a los profesores que hacen parte del programa de ingeniería mecatrónica, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de mi profesión.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	13
1.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	13
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	16
2 OBJETIVOS.....	17
2.1 OBJETIVO GENERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3 JUSTIFICACIÓN.....	18
4 MARCO DE REFERENCIA	20
4.1 ESTADO DEL ARTE.....	20
4.2 MARCO TEÓRICO	21
4.2.1 Motores de Paso	21
4.2.2 Sensor fotoeléctrico (LDR)	22
4.2.3 Arduino.....	23
4.2.4 Radiación Solar	24
4.2.5 Geometría Solar	27
4.2.6 Coordenadas Celestes horarias	28
4.2.7 Recorrido de la radiación solar.....	29
4.2.8 Horas de sol pico (H.S.P.).....	30
5 PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.....	31
5.1 Fase Previa: revisión bibliográfica	32
5.2 Fase 1 Desarrollo de la estructura	32

5.2.1	Mástil.....	33
5.2.2	Base superior con módulos LDR.....	34
5.2.3	Motor.....	35
5.2.4	Base inferior.....	35
5.3	Fase 2 Diseño del sistema de control.....	36
5.4	Fase 3 Diseño de interfaz o plataforma para el análisis estadístico de los datos.....	38
5.5	Fase 4 Validación de la herramienta.....	40
5.6	Presupuesto.....	50
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	50
	BIBLIOGRAFIA.....	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 motor paso a paso [23]	22
Figura 2 Modulo LDR [15].....	23
Figura 3 Arduino Mega [16].....	23
Figura 4 Esquema de distribución de radiación [27].	24
Figura 5 Mapa de Irradiación solar de Latinoamérica y el caribe [28].....	25
Figura 6 Mapa de irradiación en Colombia [2].	26
Figura 7 Geometría Solar [29].....	27
Figura 8 Coordenadas celestes horarias[29].	28
Figura 9 Valores referenciales de Aire-Masa en función de la altura solar [29]	29
Figura 10 Concepto de Horas Sol Pico [28].	30
Figura 11 Partes de la herramienta fuente: Elaboración propia	33
Figura 12 Ensamble final fuente: Elaboración propia.....	33
Figura 13 Mástil fuente: Elaboración Propia	34
Figura 14 Plataforma superior con LDR fuente: Elaboración propia	34
Figura 15 Motor de paso fuente: Elaboración propia	35
Figura 16 Base herramienta fuente: Elaboración propia	36
Figura 17 Diagrama de Flujo para el control de la herramienta fuente: Elaboración propia.....	37
Figura 18 Datos obtenidos por sensores escritos de forma manual en Excel fuente: Elaboración propia	39
Figura 19 Programa PLX-DAQ para adquisición de datos con su hoja de cálculos fuente: Elaboración propia	40
Figura 20 Datos obtenidos del módulo de forma digital Fuente: Elaboración propia	41
Figura 21 Módulos Ldr análogo sin calibrar Fuente: Elaboración propia	42
Figura 22 Muestra sensores calibrados día un poco nublado Fuente: Elaboración propia.....	42
Figura 23 Datos estadístico trayectoria del sol al inicio de las pruebas fuente: Elaboración propia	44

Figura 24 Coordenadas Acimutales fuente: Elaboración propia	45
Figura 25 Inclinación del módulo fotovoltaico con respecto a la superficie del terreno fuente: Elaboración propia	45
Figura 26 Inclinación de la tierra con respecto al eje de giro fuente: www.astronomia.net [32].....	46
Figura 27 Datos obtenidos en la validación de la herramienta en horas de mayor radiación solar fuente: Elaboración propia	47
Figura 28 Datos estadísticos de la validación de la herramienta fuente: Elaboración propia.....	47
Figura 29 Curva característica de una LDR fuente: La electrónica [25].....	48
Figura 30 Evidencia del lugar donde se realizaron las Pruebas hora: 9:40 am Fuente: Elaboración propia	48
Figura 31 Evidencia del lugar donde se realizaron las Pruebas, hora: 9:40 am Fuente: Elaboración Propia.....	49
Figura 32 Evidencia del lugar donde se realizaron las Pruebas, hora: 9:40 am Fuente: Elaboración Propia.....	49

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Resumen de fases fuente: Elaboración propia	31
Tabla 2 Valores medidos con la herramienta posición, hora tablas estadísticas Fuente: Elaboración propia	43
Tabla 3 Latitud y longitud de la ciudad de Barranquilla fuente: www.geodatos.net [30].....	46

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Modelo matemático para calcular la masa de aire en función de la altura [29].....	29
Ecuación 2 Modelo matemático para el cálculo de la inclinación de un panel solar fuente: Skeiker, Kamal [30].....	46

INTRODUCCIÓN

Los diversos episodios que pasan a nivel mundial, tales como la contaminación excesiva, el calentamiento global, escasos recursos no renovables, el aumento progresivo de demanda energética, o aquellos países o lugares que no poseen energía eléctrica, por razones geográficas o por el aumentado costo de instalaciones, motivan a miles de personas y entidades empresariales a realizar una búsqueda de alternativas energéticas, limpias y eficientes tales como la energía solar [1].

En Colombia, y en nuestro caso de estudio el Departamento del Atlántico específicamente la ciudad de Barranquilla, gracias a su posición geográfica tiene una gran capacidad de aprovechamiento de este tipo de energía (irradiación media de hasta 5.5 kW/m²/día según el atlas de radiación solar global sobre una superficie plana proporcionado por el IDEAM [2]), la cual podría ser utilizado para la generación de energía eléctrica a partir de la energía solar y de este modo distribuirla los sectores rurales y urbanos, donde los costos de la generación de energía eléctrica son elevados, esto se debe a que son originados principalmente por el valor económico de los combustibles. Los costos de mantenimiento y operación para muchas actividades básicas como industriales en zonas rurales y urbanas de la costa atlántica hacen que la generación de energía eléctrica por medio del sol sea más económica y confiable a largo plazo[3].

La energía solar es obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética que proviene del sol, esta es transformada en electricidad a través de sistemas fotovoltaicos [4]. Esta es una fuente de energía que tiene grandes ventajas sobre otras, puesto que siempre vamos a disponer del sol en nuestro presente y futuro [5], Sin embargo, también existen desventajas para el aprovechamiento de ese tipo de energía, tales como: su naturaleza variable a lo largo del tiempo (los niveles de radiación varían de acuerdo a las condiciones meteorológicas y épocas del año) y la alta inversión que se debe hacer en primera instancia para el montaje de un sistema fotovoltaico.

La eficiencia de un sistema fotovoltaico está sujeta al rendimiento y calidad individual de cada uno de los elementos utilizados en el sistema (paneles, banco de almacenamiento de energía, inversores). Los componentes más críticos en un sistema fotovoltaico son los paneles solares, pues presentan una eficiencia muy baja, entre un 15-20% y que a su vez, esta es afectada por las condiciones en las que opera [6].

El funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos posee desempeños variados, dado que la potencia y la radiación solar varía según el época del año, hora, condiciones atmosféricas y latitud del lugar donde se encuentra instalado el sistema [7]. Para lograr el mayor rendimiento posible en un sistema fotovoltaico es necesario implementar cambios en la orientación de los panel solar, de manera que se aproveche la mayor cantidad de horas de captación de radiación solar directa, tal como lo plantearon Jason & Vásquez (2012), afirmando que es posible aumentar el rendimiento de los paneles garantizando una perpendicularidad de los rayos incidentes en la superficie del mismo [8], esto se pudo lograr con la instalación de mecanismos de seguimiento solar, una tendencia que se preserva en los nuevos desarrollos donde se ha obtenido en laboratorio una eficiencia de 42.8% [9].

El análisis de los sistemas solares fotovoltaicos nos lleva a hallar vacíos relacionados con la ubicación de los equipos de captación, tal como una orientación errónea, lo cual logra afectar de manera significativa la autonomía y rendimiento de los sistemas al momento de recibir la mayor cantidad de luz solar.

Bajo la anterior premisa, y de acuerdo con testimonios de una persona con experiencia en el ámbito de la generación de electricidad a partir de la energía solar, se comprobó que, si los sistemas solares fotovoltaicos no son instalados de forma correcta y la orientados al lugar donde mayor radiación solar, se obtendrán pérdidas en cuanto a la recepción de luz, el cual se verá reflejada en una disminución del rendimiento del sistema solar fotovoltaico. Teniendo en cuenta que para la instalación de estos sistemas solares fotovoltaicos fijos se tiene muy presente el ángulo con el cual debe ser instalado el panel para que los rayos solares incidan

directamente sobre él, tratando de aprovechar la mayor cantidad de horas solares posibles.

El presente trabajo trata sobre el desarrollo de una herramienta permitirá optimizar el proceso de orientación de los sistemas solares fotovoltaicos puesto que se presentan pérdidas energéticas e inversión de tiempo si el sistema no se orienta de forma correcta. Además, el sistema no obtendría un rendimiento adecuado porque se desperdiciará una gran cantidad de horas de captación de luz solar las cuales son muy importante en los sistemas solares fotovoltaicos.

1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

En los años 1970 las fuentes renovables de energía comenzaban a tomar fuerza tanto así que llegaron a considerarse una alternativa a las energías tradicionales [10], debido a la gran disponibilidad de esta para el presente y el futuro (a diferencia de los combustibles fósiles que toman mucho tiempo en formarse y que con el pasar del tiempo las reservas disminuyen) como por su menor impacto ambiental aplicado al caso de energías limpias, por esta simple y llana razón se les dio el nombre de energías alternativas.

El efecto fotovoltaico fue descubierto por Alexandre Edmond Becquerel en el año 1838 [11], este consiste en la transformación directa de la luz en electricidad por medio de un semiconductor, en 1877 el inglés William Grylls Adams junto con su alumno Richard Evans Day, crearon la primera célula fotovoltaica de selenio [12]. Toda aplicación práctica de estos descubrimientos quedaba descartada debido a que la cantidad de electricidad que se obtenía era poca. Un siglo más tarde Gerald Pearson logró patentar la primera célula fotovoltaica en el año 1953 [13], mientras experimentaba con el silicio por accidente logro crear una célula fotovoltaica la cual resultaba mucho más eficiente que las echas de selenio. Desde entonces los

científicos Daryl Chaplin y Calvin Fuller Perfeccionaron este hallazgo accidental y produjeron células solares de silicio capaces de ofrecer suficiente energía eléctrica como para poder realizar aplicaciones prácticas de ella [13]. Con el transcurrir del tiempo el uso de placas fotovoltaicas para proveer energía aumentaba. A partir de ahí la eficiencia de las células no ha dejado de crecer y el campo de aplicaciones ha aumentado enormemente. La modularidad de los paneles fotovoltaicos es una característica esencial para la versatilidad de este tipo de energía, muy adecuado para los países con un bajo nivel económico que no cuentan con redes de transporte de electricidad [14].

Este tipo de energía es una tecnología que genera corriente continua, que es medida en vatios o kilovatios, por medio de unos semiconductores que son iluminados por un haz de fotones. Mientras la luz llegue o incida sobre una célula solar se generará potencia eléctrica; cuando la luz se extingue la electricidad desaparece.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sistemas solares fotovoltaicos son una gran ayuda tanto para la sociedad como para el medio ambiente, pues este permite contrarrestar el uso de combustibles fósiles como medio de generación de energía eléctrica. Si bien es claro la quema de combustibles fósiles para generar energía produce residuos tóxicos los cuales no son amigables tanto para las personas como para el medio ambiente, por lo tanto, se opta por el uso de sistemas solares con el fin de obtener energías limpias. Sin embargo, al momento de realizar las instalaciones de estos sistemas no va a ser tan simple como se ve o como aparenta ser, porque se deben tener muchos factores en cuenta para que este funcione con gran efectividad.

En el momento en el que se realiza respectiva instalación de los sistemas fotovoltaicos solares se verifica el lugar en que irán posicionados, teniendo en cuenta la trayectoria del sol durante todo el día.

Para la instalación de un sistema fotovoltaico existe un problema, el cual consiste en saber cuál es la posición y ángulo correcto en el cual debe ser instalado el

sistema sin importar en que región, ciudad o país se desee realizar este trabajo, para que un sistema fotovoltaico trabaje de manera eficiente debe absorber la mayor cantidad de luz que incide directamente sobre las células foto-voltaicas entre mayor sea el número de horas en que se obtenga esta incidencia directa de luz sobre el panel es mejor para el sistema ya que aumenta el rendimiento y eficiencia del sistema, dicho esto sabremos entonces cuán importante es escoger el lugar y ángulo correcto donde debe ir nuestro sistema. Si los sistemas solares fotovoltaicos son fijos deben estar en un ángulo correcto, de no ser así estos van a obtener pérdidas en cuanto a la captación de luz solares diarias desaprovechando el máximo rendimiento que se puede obtener si se colocan en el ángulo correcto.

Observando este problema, además de que resalta lo importante que es aportar al desarrollo de los países y promover el uso de energías limpias se vio la necesidad de desarrollar una herramienta que permita optimizar el proceso de orientación de sistemas solares fotovoltaicos, este sistema consta de 2 bases, una que es la base fija con la cual la herramienta podrá aferrarse a los lugares o terrenos donde se desea realizar el trabajo y otra que sería la base giratoria, esta base podrá realizar movimientos de 360° gracias al anclaje que tendrá con un servomotor este último brinda la información en cuanto a la posición o trayectoria que lleva el sol, el servomotor no va realizar movimientos, si no hasta recibir una señal que vendrá de un Arduino que a su vez recibirá señal de una serie de sensores LDR que estarán en la parte superior de la base giratoria. En conclusión la herramienta funciona de la siguiente forma: En la parte superior de la herramienta vamos a encontrar un mástil que va a proyectar sombra sobre un lugar específico en la base y los sensores LDR [15], un motor en la parte inferior dará giro a toda la base realizando un barrido inicial con la ayuda de los sensores se podrá detectar la mayor cantidad de ausencia de luz producida por el mástil, en ese momento tendremos la posición inicial de la trayectoria del sol, a medida que pasa el tiempo el servomotor debe realizar movimientos en sentido derecha izquierda hasta que los sensores LDR detecten la mayor sombra, este proceso es repetitivo, todo esto se logra gracias a la programación que se realizara por medio de Arduino [16], este recibirá las señales

de los LDR y enviará órdenes a nuestro servo para realizar movimientos, así mismo los datos de las posiciones que da el servo serán enviados a la plataforma Excel para que sean estadísticamente analizados.

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Es posible desarrollar una herramienta que permita optimizar el proceso de orientación de sistemas solares fotovoltaicos?

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una herramienta para la optimización en el proceso de orientación de sistemas solares fotovoltaicos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Desarrollar una estructura para la medición de variables relacionadas con la irradiación solar (hora, posición, intensidad de luz) para identificar la posición con los picos de radiación más altos según el momento del día.
2. Diseñar el sistema de control aplicado a la estructura para la identificación de la orientación optima de paneles solares fotovoltaicos.
3. Diseñar una interfaz o plataforma para el análisis estadístico de los datos obtenidos tales como hora, posición e intensidad de luz, basados en la proyección anual de irradiación solar.
4. Validar el funcionamiento del prototipo.

3 JUSTIFICACIÓN

La energía solar fotovoltaica actualmente es la segunda fuente de energía renovable más utilizada o implementada en el mundo, después de la Eólica. Esto se debe a que brinda soluciones a un sin número de problemáticas en este sector [17].

Los beneficios de esta fuente energética son muchos. Sin embargo, se busca generar un mayor consumo de energía solar, ya que se cree traería consigo una reducción del uso de las otras fuentes de energía además de una menor demanda de la red [18], pero para poder obtener el beneficio de esta fuente energética eficientemente se deben realizar instalaciones de sistemas solares fotovoltaico de manera correcta, esto implica que se deben tener en cuenta las diferentes variables (trayectoria solar, lugar de instalación) que afecten al rendimiento del sistemas al momento de ser instalado.

Al momento de instalar sistemas fotovoltaicos fijos se presentan inconvenientes esto se debe a que no se logra identificar la trayectoria solar de manera inmediata, y una mala instalación conlleva gastos innecesarios y que el sistema opere de manera ineficiente desaprovechando el recurso solar para la operación correcta del sistema. Debido a estos problemas se propone el desarrollo una herramienta que permita optimizar el proceso de orientación de los sistemas solares fotovoltaicos esto permite aumentar el número de horas de captación solar aumentando la eficiencia del sistema, este proyecto resuelve varias problemáticas que se presentan en los sistemas solares fotovoltaicos fijos, es importante destacar que para que un sistema fotovoltaico fijo funcione de manera eficiente la radiación debe incidir directamente sobre el panel, a esto se le conoce como radiación directa si esto se logra el otro objetivo del sistema es captar esa radiación la mayor cantidad de horas posibles y para ello se debe tener en cuenta el ángulo en que debe ir instalado el panel del sistema.

Algunos de los inconvenientes que se presentan en los sistemas solares fotovoltaicos fijos se les logrará dar solución mediante el desarrollo de este proyecto, esta herramienta cuenta con una serie de sensores LDR ubicados estratégicamente

en una plataforma giratoria, dicha plataforma poseerá un mástil en la parte central que produce sombra, con ayuda de los módulos LDR se obtendrá la posición del sol y la trayectoria que este llevará, el movimiento de la plataforma que gira lo dará un motor de paso que además de dar giro, ofrece información de la posición, dicha información es obtenida gracias a datos tabulados mediante las pruebas realizadas. Todo esto se logra gracias a los componentes internos del motor, en este caso se analiza la variación que presenta el potenciómetro que está ubicado internamente en el servo y que mediante la variación podemos determinar la posición del sol. Todos los datos obtenidos irán a una plataforma para luego ser visualizada de forma estadística.

4 MARCO DE REFERENCIA

4.1 ESTADO DEL ARTE

En el ámbito de implementar, desarrollar o diseñar herramientas u dispositivos para optimizar el proceso de orientación de sistemas solares fotovoltaicos es un tema con bastante afluencia en todo el mundo por el gran auge que ha tenido el uso de energías limpias, y esto se debe al gran deterioro que presenta el planeta por la contaminación.

Revisando la bibliografía se observa que existen muchos proyectos enfocados a la parte de adquisición de energía solar y a la optimización de dispositivos, máquinas y herramientas con el fin de conseguir una mejor eficiencia al momento de recolectar esta fuente de energía proveniente del sol, sin embargo, a este proyecto tiene un valor agregado y es la portabilidad puesto que es una herramienta que se puede llevar a cualquier lugar y funcionar si inconveniente alguno.

Al notar pérdidas en la eficiencia de sistemas fotovoltaicos fijos se vio la necesidad de crear nuevas estructuras para tratar de aprovechar mejor la luz solar. Kelvin Beleño, Aldo Pardo e Ivaldo Torres (2012) lograron el diseño y control de una estructura que posiciona de forma automática las celdas o módulos fotovoltaicos con un ángulo de incidencia de 90° permitiéndoles obtener un mejor rendimiento [19].

De la misma forma Maissa F, Oscar B, Jose R, Eladio D y Jose A. decidieron realizar el diseño y la implementación de un sistema de control estable basado en lógica Borrosa teniendo como finalidad optimizar el rendimiento de un sistema de Generación fotovoltaico[20].

En la universidad de Pereira Andrés Escobar, Mauricio L. y Juan Osorio realizaron también el un Diseño e implementación de un seguidor solar con el mismo objetivo el cual es optimizar un sistema fotovoltaico [21].

En la bibliografía también un Taller modelo para la representación de la trayectoria solar sobre el globo terrestre por Ilce Lara M. y Julieta Fierro [22]. Este fue un taller bastante útil para el desarrollo de este proyecto.

4.2 MARCO TEÓRICO

4.2.1 Motores de Paso

Estos motores también son conocidos como “de movimiento indexado”, constituyen un caso especial de esta clase de motores, estando diseñados para girar un determinado ángulo en función de las señales eléctricas que se les apliquen a sus terminales de control [23].

La magnitud o resolución de los pasos que puede ejecutar un motor dependerá de sus características constructivas, comprendiendo ángulos de 1° hasta 15°, o más según el modelo [24].

Este tipo de motores se emplean constantemente en sistemas de control digital, en los que el motor recibe órdenes de lazo abierto en forma de un tren de pulsos para hacer rotar su eje en un ángulo perfectamente definido.

Para el desarrollo de la herramienta se optó por usar un motor de paso con el fin darle giro a la plataforma donde están ubicados los módulos LDR los cuales deben posicionarse en el Angulo correcto para la obtención de información.

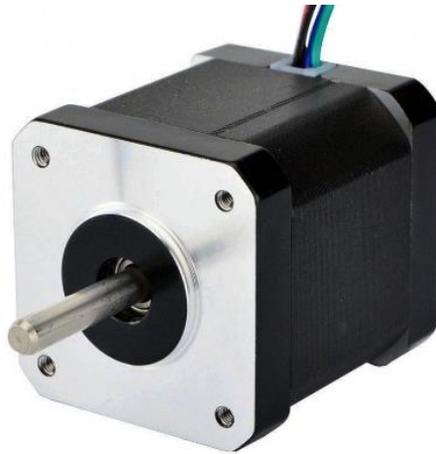


Figura 1 motor paso a paso [23]

4.2.2 Sensor fotoeléctrico (LDR)

El LDR, resistencia dependiente de la luz, es un dispositivo semiconductor electrónico que tiene dos terminales y la característica de tener una cierta resistencia de acuerdo con la cantidad de luz que incide sobre él de una manera casi lineal, además de ser un elemento no polarizado, lo que hace que La corriente puede circular en ambas direcciones [25].

Su funcionamiento se explica por el efecto fotoeléctrico. Asumiendo que los elementos conductores (naturaleza electrostática) tienen una diferencia de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción casi cero (sin ofrecer obstáculos al flujo de corriente) y que los materiales aislantes se comportan de manera inversa (diferencia de energía muy grande); Los semiconductores, a su vez, tienen la diferencia de energía entre el valor de los conductores y los aislantes y necesitan cierta fuerza externa, como el brillo y la temperatura, para conducir la corriente eléctrica.



Figura 2 Modulo LDR [15]

4.2.3 Arduino

Es una plataforma electrónica open-source basada en uso fácil de hardware y software. Las tarjetas Arduino son capaces de leer entradas digitales y análogas y controlar salidas digitales y salidas PWM, además de esto, Arduino facilita la comunicación entre dispositivos por medio de protocolos I2C y SPI, permitiendo el uso de gran variedad de sensores y actuadores. Arduino es usado en muchos proyectos ya sean de nivel escolar como de nivel profesional [16].

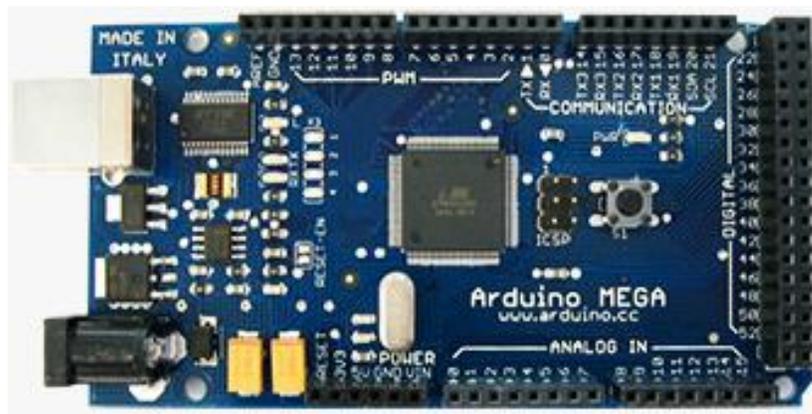


Figura 3 Arduino Mega [16]

4.2.4 Radiación Solar

La radiación solar absorbida por la atmósfera terrestre no es aprovechada al 100% [26]. en términos generales, el 24% de la radiación llega directamente, el 21% de la radiación no llega directamente. Mientras que el 29% se pierde en el espacio.

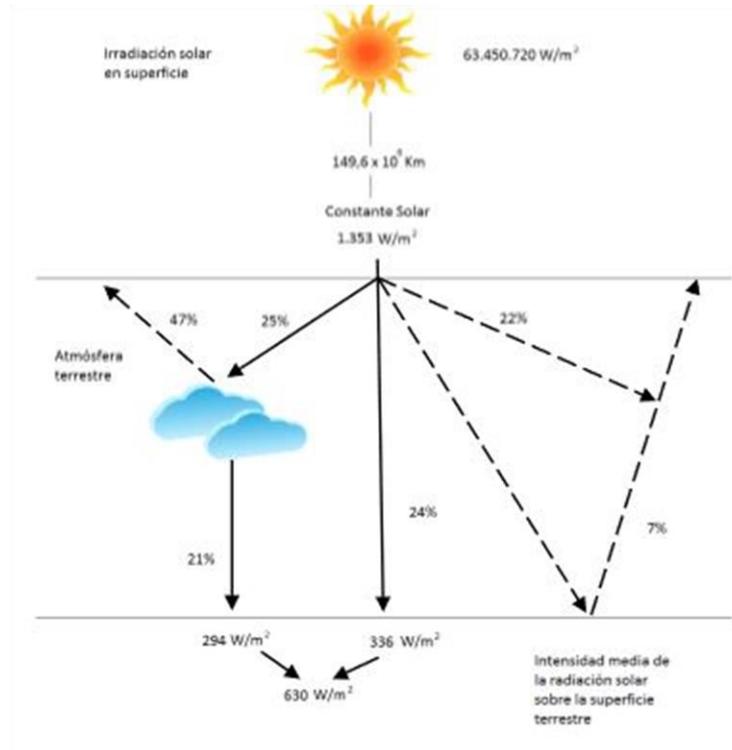


Figura 4 Esquema de distribución de radiación [27].

Existen tres componentes de la radiación solar:

- Directa: Es la que proviene del sol, sin desviar su paso por la atmósfera.
- Difusa: Sufre cambios debidos a la reflexión difusión en la atmósfera.
- Albedo: Es la que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies próximas, puede ser directa o difusa.

La radiación directa es la mayor y la más importante en el diseño de un sistema fotovoltaico.

Colombia es uno de los países que cuenta con una gran radiación solar en el mundo, por ello cuenta con un gran potencial de desarrollo en el sector de energía

fotovoltaica. Dentro de la región, solo Chile y Brasil lo supera. Esto se puede observar en la Figura 5.



Figura 5 Mapa de Irradiación solar de Latinoamérica y el Caribe [28].

En el país los departamentos con más irradiación solar son: la guajira, el cesar, el magdalena y el atlántico como se observa en la figura 6.

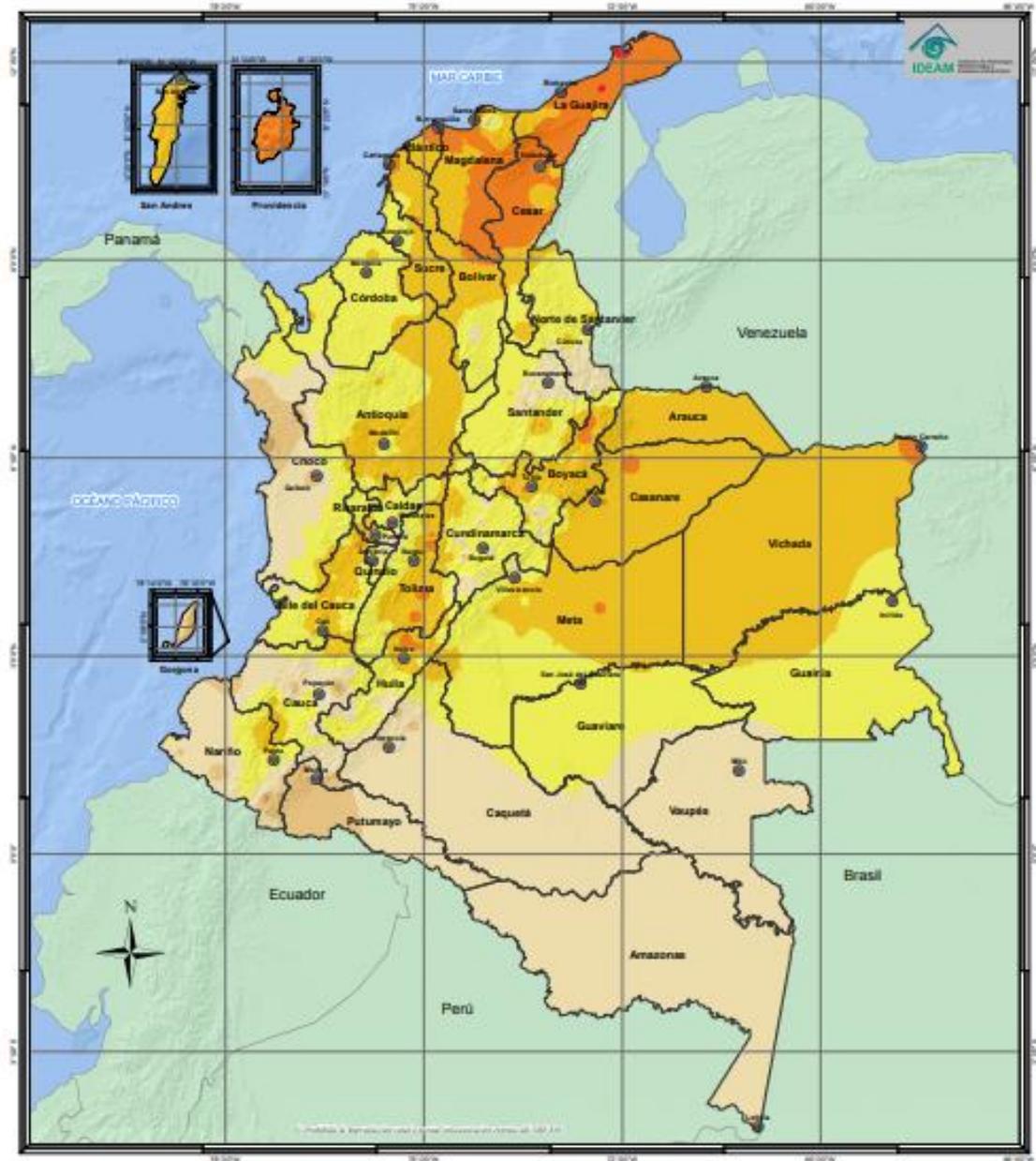


Figura 6 Mapa de irradiación en Colombia [2].

4.2.5 Geometría Solar

Conocer la geometría solar es fundamental para poder estimar la cantidad de energía que se pueda aprovechar por un panel fotovoltaico y la disposición óptima del mismo.

La orientación se define mediante el ángulo Azimut (Ψ), como se observa en la figura 7, el Azimut se define como el ángulo que forma la dirección sur con el objeto. (Positivo hacia el oeste)

La altura del sol (α) varía de acuerdo a las estaciones, este parámetro es importante, ya que aporta en la creación de sombras y en la irradiación recibida por el módulo. Se mide a partir del horizonte, con un valor de 0° y es positivo en el cenit como se observa en la figura 7.

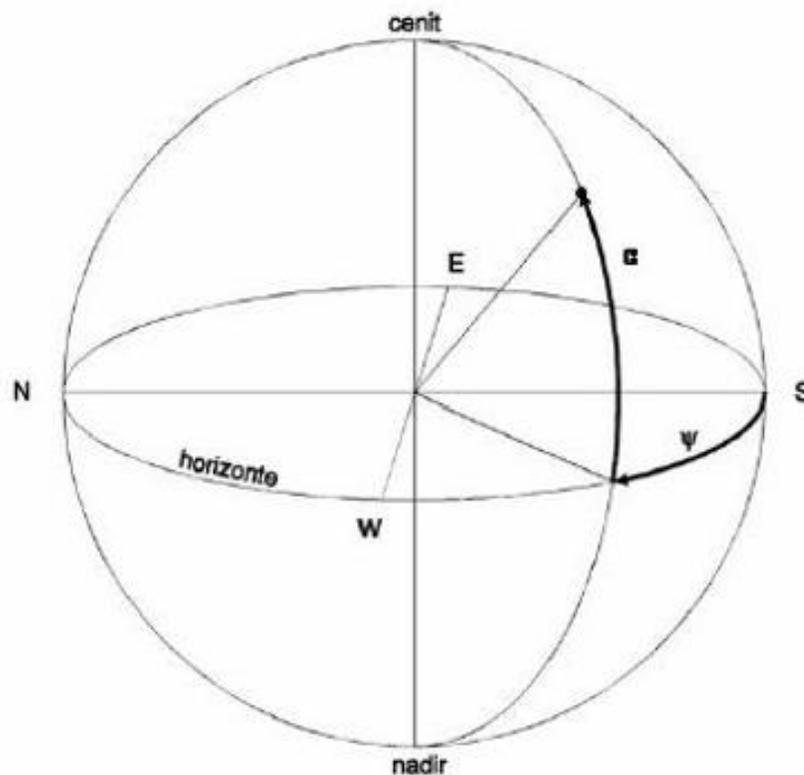


Figura 7 Geometría Solar [29].

4.2.6 Coordenadas Celestes horarias

Debido a los movimientos de rotación y traslación de la Tierra, se debe dar un seguimiento al sol a lo largo de los días, ya que su posición relativa varía.

- Ángulo horario, ω , se mide sobre el ecuador a partir del punto de intersección entre el meridiano superior del lugar y aquel, de 0° a $\pm 180^\circ$, positivamente hacia el oeste.
- Declinación, δ , es el arco del círculo horario que pasa por el sol, comprendido entre el ecuador y éste. Se cuenta a partir del ecuador de 0° a $\pm 90^\circ$, positivamente hacia el polo Norte y negativamente hacia el polo Sur como se observa en la figura 8.

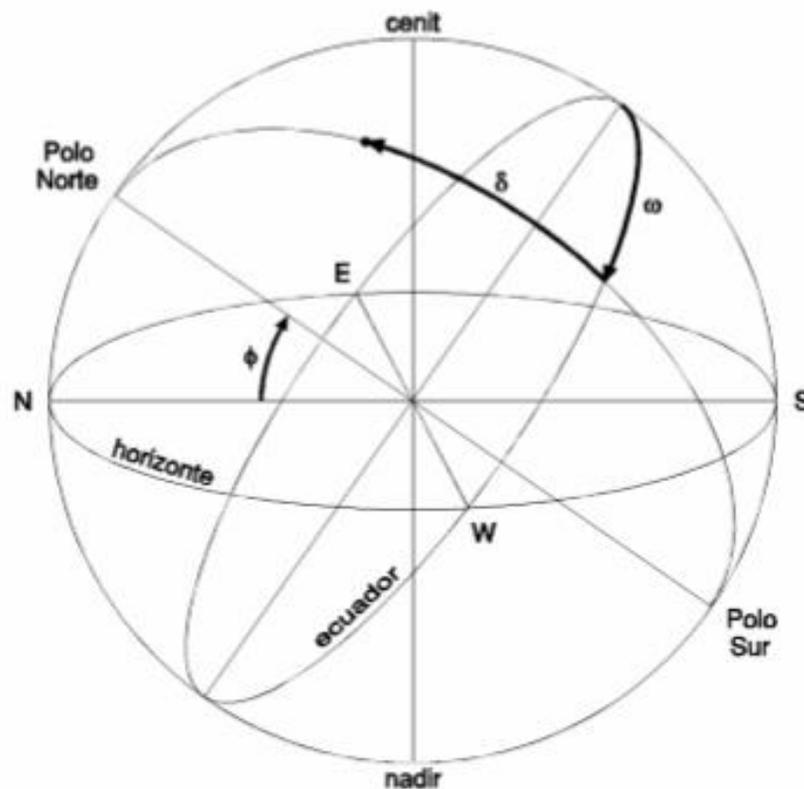


Figura 8 Coordenadas celestes horarias[29].

4.2.7 Recorrido de la radiación solar

Es evidente que mientras menor sea la distancia del sol, mayor será la radiación solar. Esto ocurre cuando el sol se encuentra más cerca de la Tierra, es decir, $\alpha = 90^\circ$.

Es necesario definir el concepto de masa de aire (AM), es una medida de la distancia que recorre la radiación al atravesar la atmósfera como se observa en la figura 9.

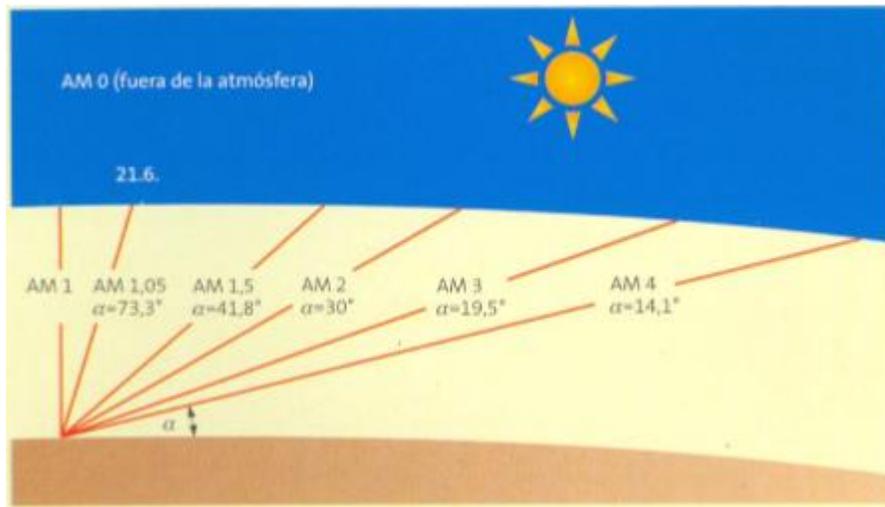


Figura 9 Valores referenciales de Aire-Masa en función de la altura solar [29]

La masa de aire se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$AM = \frac{1}{\cos 90^\circ - \alpha}$$

Ecuación 1 Modelo matemático para calcular la masa de aire en función de la altura [29]

4.2.8 Horas de sol pico (H.S.P.)

Las horas de sol pico son las horas se definen como el número de horas al día con una irradiancia hipotética de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ que sumen la misma irradiación total que la real ese día.

Se puede notar que cuando la irradiancia se expresa en $\text{kW} - \text{h}/\text{m}^2$ es numéricamente similar a las H.S.P. Este concepto es importante, ya que junto con un factor de pérdidas ayuda a estimar la potencia producida por los paneles fotovoltaicos. La distribución de la radiación a lo largo del día y el concepto de horas pico de sol en gran parte de los países de Latinoamérica se muestran en la figura 10.

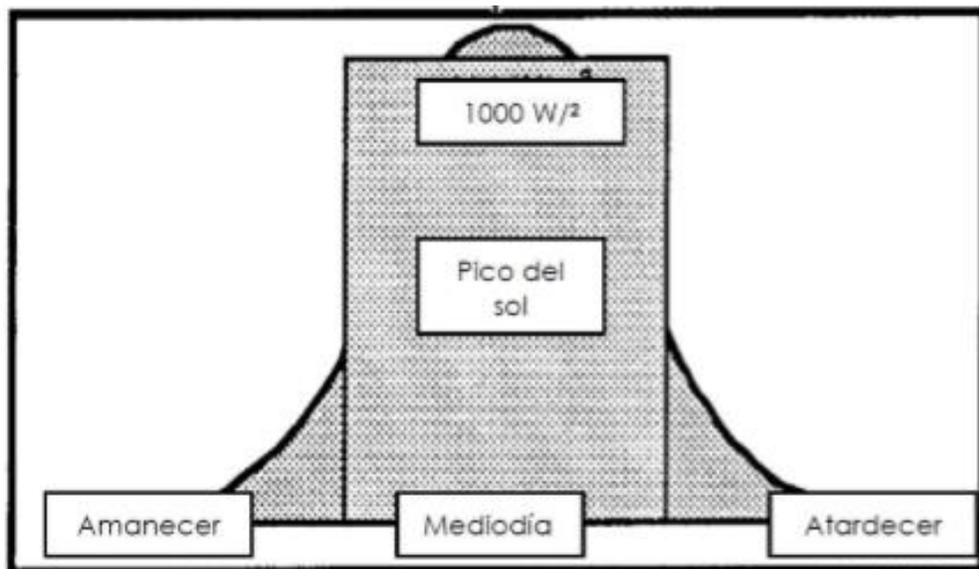


Figura 10 Concepto de Horas Sol Pico [28].

5 PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

Para la elaboración de esta propuesta de trabajo y cumplir con todos los objetivos trazados se procederá a seguir cuatro fases: La primera está enfocada a la revisión de la bibliografía, al diseño de la estructura, a realizar cotizaciones de los materiales para construir el presupuesto, la segunda está dirigida al diseño del sistema de control para la estructura mencionada anteriormente, la tercera fase es la creación de la plataforma y organización de datos para que sean visualizado de manera correcta la última fase realizar las respectivas pruebas y verificar el perfecto funcionamiento de la herramienta.

El tipo de metodología que se utilizará para la realización de este proyecto es de teórica/practica debido a que se aplicaran teorías de sistemas fotovoltaicos, geometría solar, programación entre otras. además, se utilizarán técnicas para la construcción y ensamble de la herramienta.

NOMBRE	ACTIVIDADES	FASES
Desarrollo de la estructura de la herramienta	Selección de materiales para la estructura de la herramienta	FASE I
	Simulación del diseño en softwares CAD	
	Construcción de la estructura	
Diseño del sistema de control aplicado a la estructura	Programación y conexión	FASE II
	Evaluación del sistema de control y detección de errores	
Diseño de la plataforma para la visualización de datos.	Recopilación de datos y características para la base de la plataforma	FASE III
	Clasificación de la información obtenida	
	Visualización de datos de forma estadística.	
Análisis de desempeño de la herramienta	Ensamblaje del prototipo	FASE IV
	Pruebas del prototipo	

Tabla 1 Resumen de fases fuente: Elaboración propia

5.1 FASE PREVIA: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Esta fase es de gran relevancia en la presente investigación, que se fundamenta en la recopilación de información técnica relacionada con el problema planteado, y que aporte al cumplimiento de los objetivos propuestos.

Esta fase tiene una larga duración debido a la actualización constante de la información según los avances tecnológicos y sus tendencias.

5.2 FASE 1 DESARROLLO DE LA ESTRUCTURA

El primer paso para la elaboración de la herramienta es el desarrollo de la estructura, para ello es necesario partir de un boceto, al cual se le realiza un análisis de movimientos rotatorios sobre un eje sin que presente problema alguno, posteriormente de diferentes ilustraciones y conceptos se elige el mejor y más conveniente para la consecución del objetivo principal, con base a los análisis previos, se realiza la elección y estudio de los materiales y finalmente se hace una simulación en software CAD del diseño estructural de la herramienta.

Utilizando la herramienta CAD SolidWorks se realiza el boceto de la estructura, la cual consiste en un tipo de plato o base rotatoria con módulos LDR en la parte superior, en la parte inferior está ubicado el motor el cual permite por medio de su función darle giro a la plataforma donde están los sensores, el motor reposa sobre una base de acrílico para darle mayor estabilidad a la herramienta.

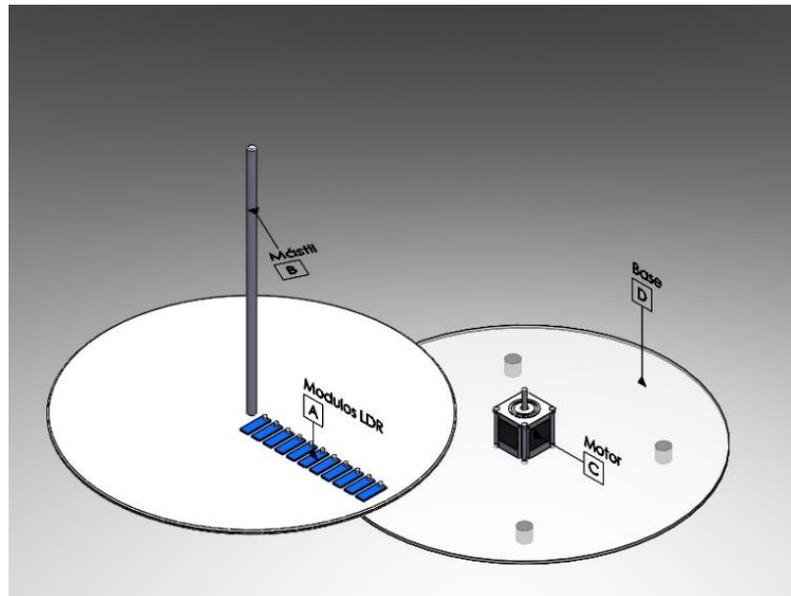


Figura 11 Partes de la herramienta fuente: Elaboración propia

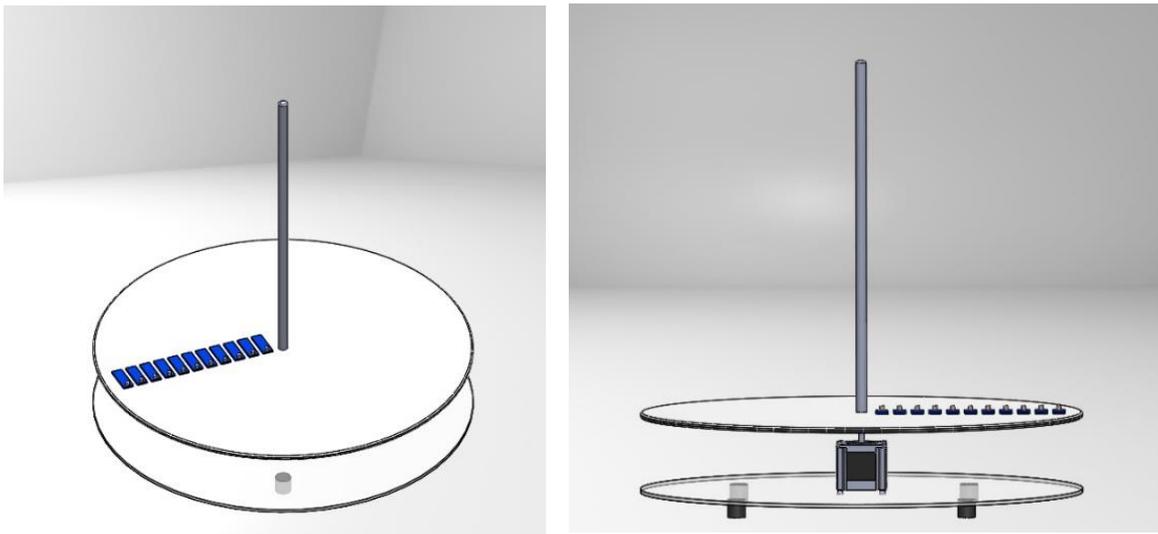


Figura 12 Ensamble final fuente: Elaboración propia

5.2.1 Mástil

El mástil es un elemento que hace parte de nuestra herramienta es el que proporciona la estela de sombra que deben incidir sobre los módulos LDR, el mástil usado en la herramienta es de acero y tiene una longitud de 40cm con un diámetro de 6.35mm.



Figura 13 Mástil fuente: Elaboración Propia

5.2.2 Base superior con módulos LDR

La base superior nos sirve como soporte para los módulos LDR, pero así mismo posee movimientos rotatorios que son provocados por un motor, ayudando a que los módulos siempre estén en ángulo de rotación correcto para detectar la capa de sombra producida por el mástil.

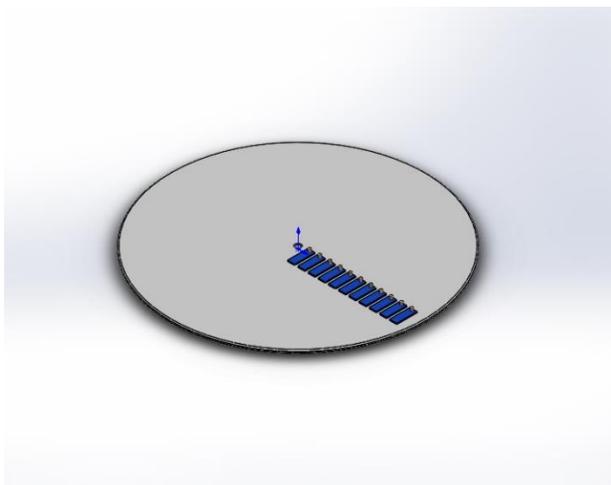


Figura 14 Plataforma superior con LDR fuente: Elaboración propia

5.2.3 Motor

El motor es un componente esencial en la herramienta, es el que permite posicionar en el ángulo correcto el plato superior donde están instalados los módulos LDR si estos no están en posición correcta los datos de medición serán errados.

Este motor tiene gran precisión debido a que sus movimientos son por paso, donde cada paso equivale a 1.8° de rotación.

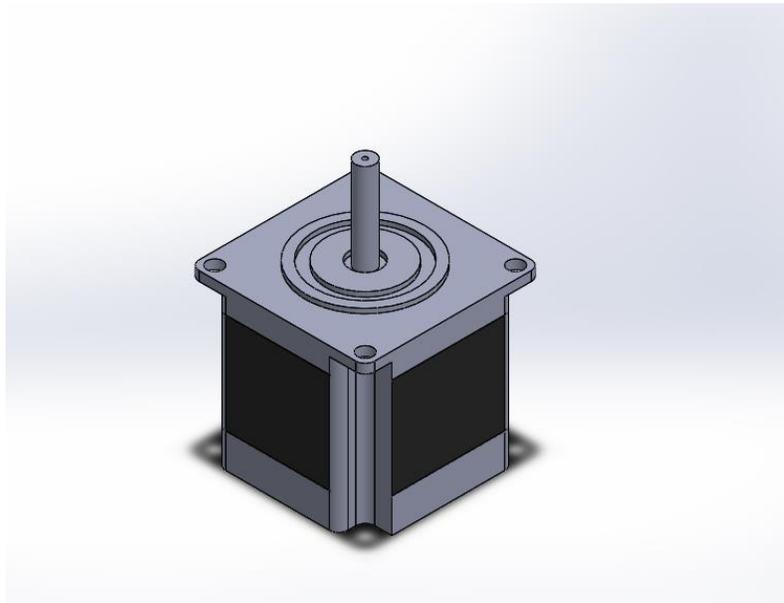


Figura 15 Motor de paso fuente: Elaboración propia

5.2.4 Base inferior

En este componente de la herramienta es donde reposa el motor es similar a la plataforma superior en cuanto a su aspecto, y material la diferencia es que solo tiene 4 perforaciones que son las que sujetan el motor a la base. Esta base se realizó con el fin de darle estabilidad a la herramienta.

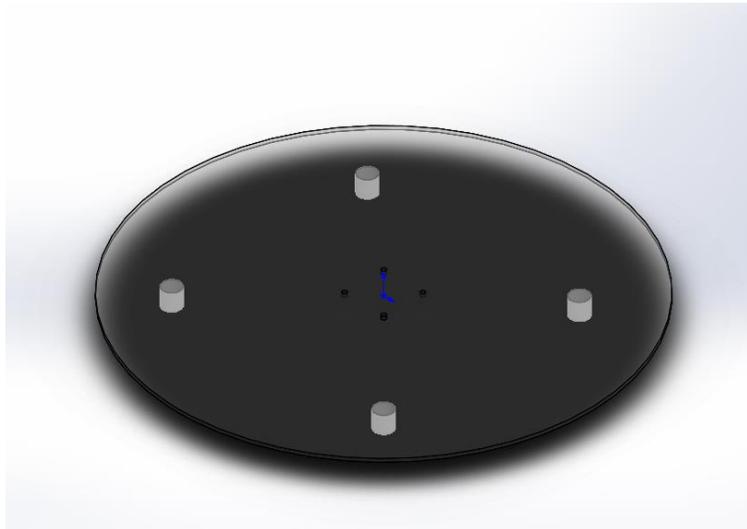


Figura 16 Base herramienta fuente: Elaboración propia

5.3 FASE 2 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

En primera instancia, es necesario un proceso de selección del lenguaje programación que mejor se adapte las necesidades y exigencias de la investigación, luego, elegir el motor y las LDR adecuadas según las condiciones de trabajo.

En esta fase, se decide la implementación del entorno de trabajo Arduino debido a que el entorno de programación es simple y directo, otras razones que contribuyeron al uso de Arduino es por su flexibilidad ya que fácilmente se le puede añadir extensiones modulares, teniendo en cuenta que para el desarrollo de este proyecto se optó por usar módulos LDR entonces se facilitaría el trabajo, para concluir el uso de Arduino es bastante asequible ya que el valor de un Arduino rodea los 45mil pesos.

Teniendo en cuenta todos los factores mencionados anteriormente se procedió a realizar un Diagrama de flujo con los movimientos y obtención de datos de la herramienta para luego avanzar a la programación en el software open-source de Arduino.

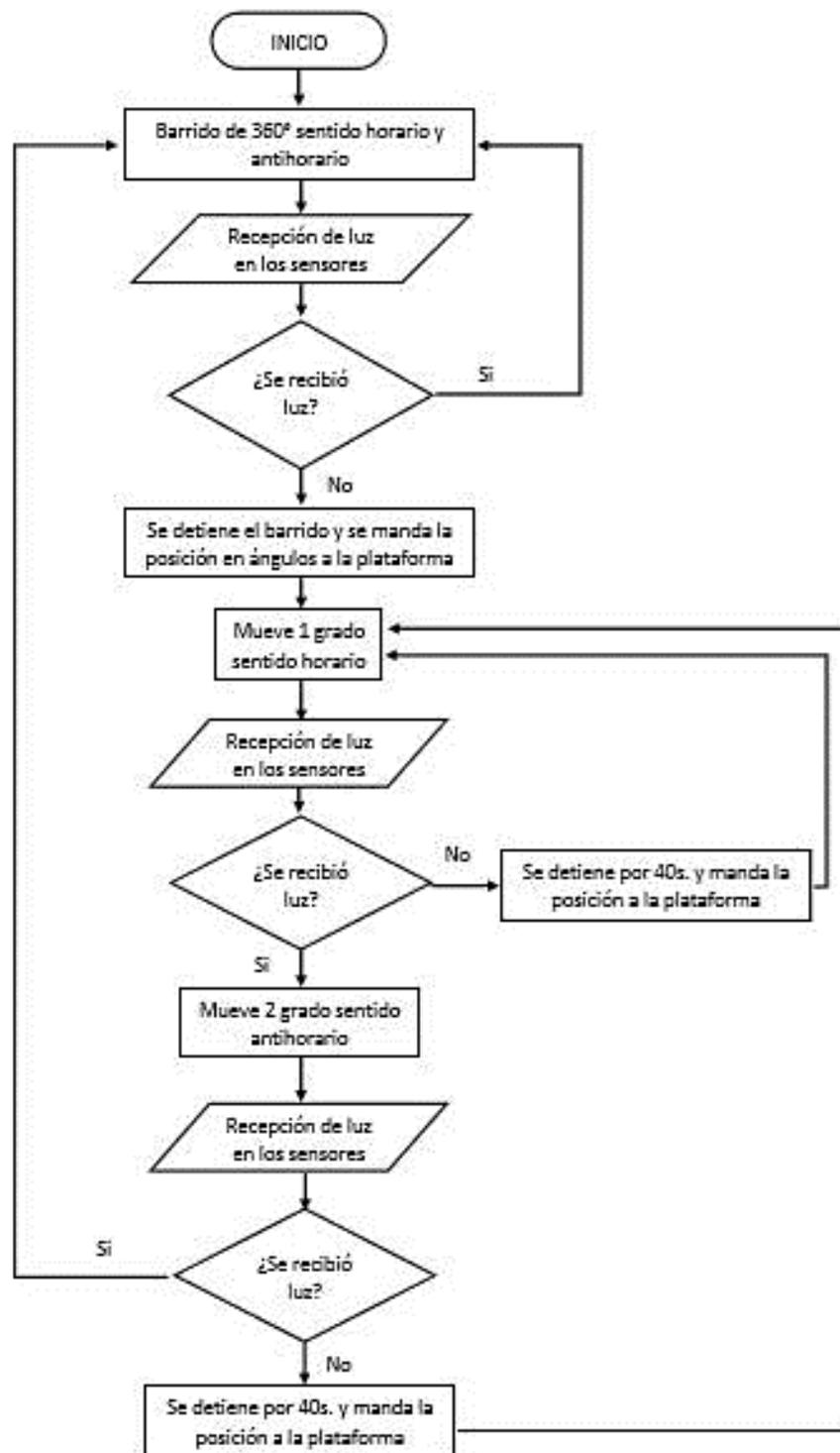


Figura 17 Diagrama de Flujo para el control de la herramienta fuente: Elaboración propia

Con ayuda del diagrama de flujo Fig.17 se realizó el sistema de control para la estructura de la herramienta.

5.4 FASE 3 DISEÑO DE INTERFAZ O PLATAFORMA PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS.

Inicialmente para realizar el diseño de la interfaz o la plataforma fue necesario analizar qué datos relevantes se obtuvieron de la herramienta para que luego visualizarlos de manera estadística si así se desease, luego de pruebas se llegó a la conclusión que los datos más relevantes obtenidos fueron: la posición del motor, medición de los sensores y la hora a la cual fue realizada la medición, teniendo en cuenta la información anterior la cual fue muy importante se procedió a realizar a la segunda parte de esta fase la cual consistió en buscar donde digitar, almacenar, organizar y hasta quizás visualizar tablas o diagramas de estos datos que se estaban obteniendo, fue así como se recurrió a usar el programa informático conocido como “Excel” se optó por usar este programa ya que cuenta con cálculos, herramientas gráficas, tablas, posee un lenguaje de programación macro llamado Visual Basic para Aplicaciones además, es de fácil uso y se encuentran muchas ayudas para el uso básico como para niveles más avanzados.

	DIA 1 hora 6 pm luz celular																
	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8									
3	188	193	202	148	183	56	253	171	172	129	190	198	810	485	226	191	
4	167	158	193	119	181	43	249	193	195	170	135	197	809	464	239	190	
5	169	160	155	146	151	59	256	193	172	163	187	166	806	495	192	178	
6	248	157	122	160	155	64	270	203	197	157	151	151	795	486	150	142	
7	198	191	171	190	145	54	259	216	210	179	152	156	797	480	197	134	
8	184	159	150	142	160	49	266	207	269	147	135	150	773	478	200	118	
9	195	197	183	165	128	55	294	183	247	211	173	86	826	485	173	130	
10	222	218	161	162	137	42	307	184	229	156	145	112	813	471	196	136	
11	222	187	163	180	121	60	293	187	185	175	180	107	769	494	186	169	
12	233	236	168	156	112	70	288	183	195	179	169	92	805	456	183	177	
13	214	223	160	125	112	50	246	211	139	169	190	112	821	466	206	189	
14	209	188	170	183	95	75	217	158	183	197	192	82	819	471	259	188	
15	184	174	163	121	95	77	192	190	176	198	191	96	819	476	267	183	
16	196	122	170	128	131	92	222	154	131	168	192	58	819	443	183	228	
17	187	155	182	126	128	78	232	164	186	226	215	117	834	448	208	179	
18	203	134	178	138	132	74	201	162	197	180	168	145	830	429	219	144	
19	201,1875	178,25	168,1875	149,3125	135,375	62,375	252,8125	184,9375	192,6875	175,25	172,8125	126,5625	809,0625	470,4375	205,25	167,125	
21	Sensores con sol pero posicionados en la sombra del mastil																
22	con luz solar directa en los sensores.																

Figura 18 Datos obtenidos por sensores escritos de forma manual en Excel fuente: Elaboración propia

Era el programa ideal para almacenar los datos, el problema que se presentó fue que los datos tenían que registrarse de forma manual lo cual sería muy engorroso, no era lo que se necesitaba, fue cuando se surgió la idea de pasar esos datos obtenidos y procesados por el Arduino a Excel de forma directa o con ayuda de algún programa.

Consultando la bibliografía encontramos un programa de adquisición de datos de Arduino a Excel llamado PLX-DAQ este programa nos facilitaría el trabajo de mandar esos datos de forma casi que instantánea a Excel.

Se optó por usar excel para darle un mejor manejo a los datos recolectados y almacenamiento de los mismos puesto que son muchos datos que se recolectarán en un día de prueba, además, cabe resaltar que la plataforma de arduino tiene memoria volátil, lo que significa que cuando se ocupe todo el almacenamiento disponible, el cual es limitado, se sobrescribirán los datos, y que además, en caso

de cortes de energía el sistema se reiniciará perdiendo los datos recolectados hasta el momento del corte.

Con Excel podremos filtrar los datos obtenidos después de un día de pruebas y con ello, determinar en qué posiciones o entre qué horas fue donde se registró la mayor cantidad radiación solar. Además, teniendo las bases de datos almacenadas se le puede dar un mejor manejo al análisis de la información captada durante el día de medición.

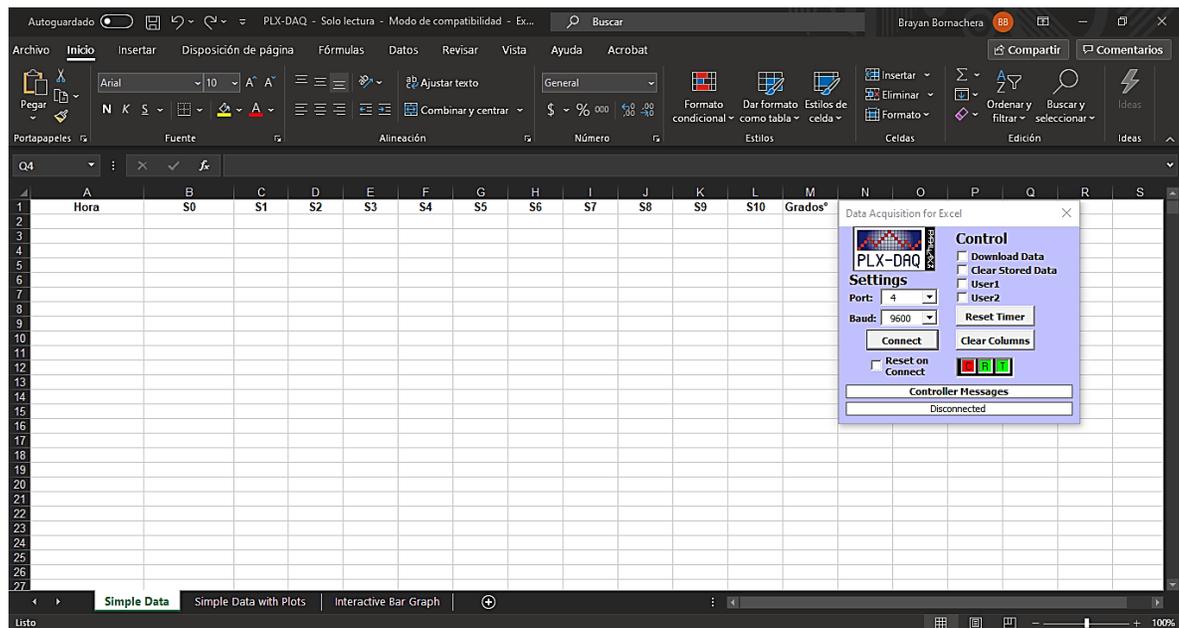


Figura 19 Programa PLX-DAQ para adquisición de datos con su hoja de cálculos fuente: Elaboración propia

5.5 FASE 4 VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA

En esta fase se inicia con el ensamblaje de la herramienta, acoplando el componente mecánico (estructura que gira y soporta el mástil) con los componentes electrónicos y de control (módulos LDR, Arduino) una vez construida la herramienta se procede a la realización de pruebas en ambiente real, contando con el apoyo de herramientas profesionales para la geolocalización, mapa de radiación colombiano solar obtenido en la página del ideam, herramientas en internet para determinar humedad y factores que pueden alterar la medición de los módulos, todo esto se tuvo en cuenta para realizar la validación del dispositivo.

Dia 2 LDR Analogo sin calibrar													
Sensor 1	Sensor 2		Sensor 3		Sensor 4		Sensor 5		Sensor 6		Sensor 7		
81	83	0	24	43	14	84	82	88	35	90	54	132	40
75	19	47	11	62	34	103	68	93	31	80	54	120	30
81	54	46	8	51	22	98	40	101	45	76	48	111	25
72	54	33	32	48	16	83	60	96	41	96	54	90	20
92	34	6	0	49	24	92	44	75	31	105	43	88	14
101	36	45	7	60	22	100	45	85	38	90	55	103	26
120	30	42	28	47	5	102	52	95	41	80	53	98	30
118	47	40	64	42	40	85	46	91	33	96	20	101	32
133	54	39	64	42	45	88	54	93	53	99	35	75	20
107	64	0	27	36	18	85	54	79	38	90	31	69	36
123	54	44	27	37	27	98	48	99	51	88	45	78	25
156	78	67	30	44	23	137	54	50	97	87	41	99	40
129	63	72	46	24	15	113	43	62	42	60	31	80	30
132	44	94	27	49	4	115	55	77	42	96	38	78	25
150	38	72	52	51	17	105	53	66	36	109	41	90	30
111,33333	50,13333	43,13333333	29,8	45,66666667	21,733333	99,2	53,2	83,333333	43,6	89,466667	42,866667	94,133333	28,2

Figura 21 Módulos Ldr análogo sin calibrar Fuente: Elaboración propia

Luego de esta muestra obtenida y comparada con la muestra de forma digital observamos que los datos estaban invertidos los módulos en luz directa (Color amarillo) los resultados eran mayor a los módulos posicionados en la sombra por lo cual se procedió a calibrar los sensores y realizar más muestras obteniendo lo siguientes datos que se muestran en la Fig. 22.

Muestra día 3 un poco nublado																										
Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9	Sensor 10	Sensor 11																
188	193	202	148	183	56	253	171	172	123	190	198	810	485	226	191	136	129	372	137	187	134					
167	158	193	119	181	43	249	193	195	170	135	197	809	464	239	190	124	148	258	115	221	118					
169	160	155	146	151	53	256	193	172	163	187	166	806	495	192	176	126	127	279	114	197	131					
248	157	122	160	195	64	270	203	197	157	151	151	795	496	150	142	128	89	273	124	223	145					
198	191	171	190	145	54	259	216	210	179	152	150	797	480	197	134	148	67	261	89	185	149					
184	153	150	142	160	43	266	207	269	147	135	150	773	478	200	118	135	68	269	116	229	143					
195	197	183	185	128	55	294	183	247	211	173	86	826	485	173	130	151	42	237	133	216	125					
222	218	161	162	137	42	307	184	229	158	145	112	813	471	196	136	146	79	268	99	244	122					
222	187	163	180	121	60	293	187	185	175	180	107	769	494	186	163	126	75	239	126	213	107					
233	236	168	156	112	70	288	183	195	179	169	92	805	456	183	177	137	80	208	122	190	123					
214	223	160	125	112	50	246	211	139	169	190	112	821	466	206	189	138	68	230	88	157	103					
209	188	170	183	95	75	217	158	183	197	192	82	819	471	259	188	133	69	256	79	166	81					
184	174	163	121	95	77	192	190	176	198	191	96	819	476	267	183	140	114	253	108	153	98					
196	122	170	128	131	92	222	154	131	168	192	58	819	449	183	228	105	153	262	93	148	109					
187	155	182	126	128	78	232	164	186	226	215	117	834	448	208	179	194	149	253	130	173	95					
203	134	178	138	132	74	201	162	197	180	168	145	830	429	219	144	190	172	326	111	171	165					
201,1875	178,25	168,1875	149,3125	135,375	62,375	252,8125	184,9375	192,6875	175,25	172,8125	126,5625	809,0625	470,4375	205,25	167,125	141,0625	101,8125	265,25	111,5	192,0625	121,375					
Sensores con sol pero posicionados en la sombra del mastil																										
con luz solar directa en los sensores.																										

Figura 22 Muestra sensores calibrados día un poco nublado Fuente: Elaboración propia

Con las muestras anterior se procedió a la siguiente fase la cual era promediar los datos de los sensores en la sombra y en la luz directa para sacar un rango de ambos datos con esto el Arduino procesa los datos y le da ordenes al motor de moverse con el fin de posicionarse en el lugar correcto luego esto el Arduino calcula el ángulo

(°) desde el punto de inicio para determinar la posición y la hora en la cual fueron tomados estos datos. los cuales se muestran en la Tabla 2.

Fecha y Hora	Posición (°)	Medición
7:32:00 a. m.	82	346
7:33:00 a. m.	83	346
7:34:00 a. m.	83	345
7:35:00 a. m.	83	346
7:36:00 a. m.	83	346
7:37:00 a. m.	83	360
7:38:00 a. m.	83	345
7:39:00 a. m.	83	344
7:40:00 a. m.	83	345
7:41:00 a. m.	83	344
7:42:00 a. m.	83	344
7:43:00 a. m.	83	344
7:44:00 a. m.	83	344
7:45:00 a. m.	83	345
7:46:00 a. m.	83	343
7:47:00 a. m.	83	370
7:48:00 a. m.	84	338
7:49:00 a. m.	84	338
7:50:00 a. m.	84	350
7:51:00 a. m.	84	342
7:52:00 a. m.	84	343
7:53:00 a. m.	84	343
7:54:00 a. m.	84	341
7:55:00 a. m.	84	342

Tabla 2 Valores medidos con la herramienta posición, hora tablas estadísticas Fuente: Elaboración propia

Estas muestras que se observan en la Tabla 2. se obtuvieron el día 10 del mes 03 de 2020 por las horas de la mañana cuando se realizaba pruebas de validación de la herramienta los ángulos que nos muestra la tabla son con respecto al punto de inicio de barrido de la herramienta y las mediciones son cuando están posicionados los sensores en la sombra del mástil, si los valores son mayores o iguales a 305 promediado por el total de los sensores esa será la posición en la que se encuentra

la sombra y el sol estará en la posición opuesta a este y dependiendo el promedio podemos determinar la posición del sol, puesto que si todos los módulos nos indican medidas por debajo de 285 y ninguno detecta sombra quiere decir que el sol está formando un ángulo de 90° con respecto a la plataforma de sensores de la herramienta informándonos que está cerca del ángulo del pico zenith, este ángulo es donde se obtiene la posición óptima a la cual debe inclinarse un panel para lograr obtener el mayor beneficio en un sistema fotovoltaico fijo, además, se tuvo en cuenta que los sensores cuando reciben luz directa el valor medido por ellos es menor a cuando no reciben luz.

En el diagrama estadístico que observamos en la Fig. 23 observamos la trayectoria que estaba teniendo el sol y la cantidad de luz que están recibiendo los módulos LDR con el transcurrir del tiempo.

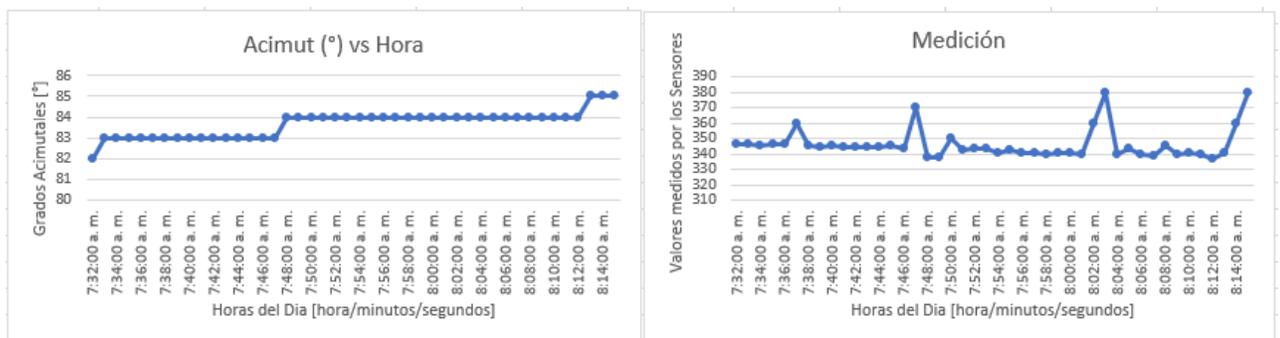


Figura 23 Datos estadístico trayectoria del sol al inicio de las pruebas fuente: Elaboración propia

Si observamos la Fig. 23 se puede notar que los datos están representados de forma estadística a través de gráficas, en la cual se relaciona la posición de orientación con el punto más álgido de radiación solar, y en la otra gráfica se relaciona los datos de luminosidad censados por el dispositivo respecto al tiempo, inicialmente la gráfica de posición nos muestra que con el transcurrir del tiempo la base superior gira ubicando los sensores en la posición opuesta al sol, esta información se procesa en el Arduino para luego brindarnos la posición correcta en la que se encuentra el sol y luego enviar este dato a la plataforma de visualización. En la representación gráfica de la medición observamos el promedio de valores medidos de todos los sensores a determinadas horas, ahí logramos observar que

los valores medidos están por encima de 300 indicando que la intensidad del sol no es tan fuerte. Además, observamos que hay momentos en los cuales estos valores disminuyen por debajo de 280 indicando que la intensidad del sol aumentó en ese momento.

Cumpliendo con el objetivo principal de la herramienta se obtuvo que el ángulo correcto para la instalación de un sistema solar fotovoltaico en el lugar de las pruebas como se logra observar en las Fig.30, Fig.31, Fig.32 es de 182° acimutales Fig. 24, el panel debe tener inclinación de 12.02° hacia el sur con respecto a la superficie horizontal del terreno tal como se logra observar en la Fig. 25.

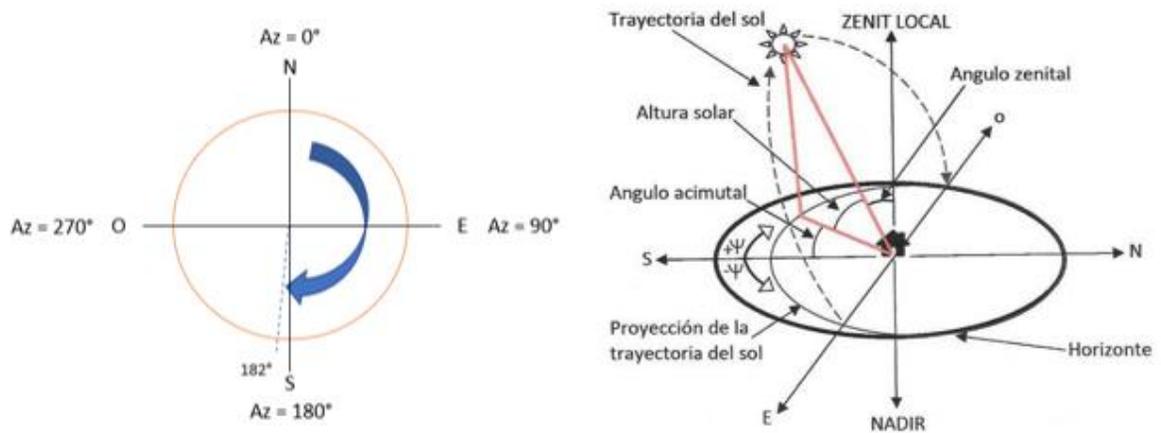


Figura 24 Coordenadas Acimutales fuente: Elaboración propia

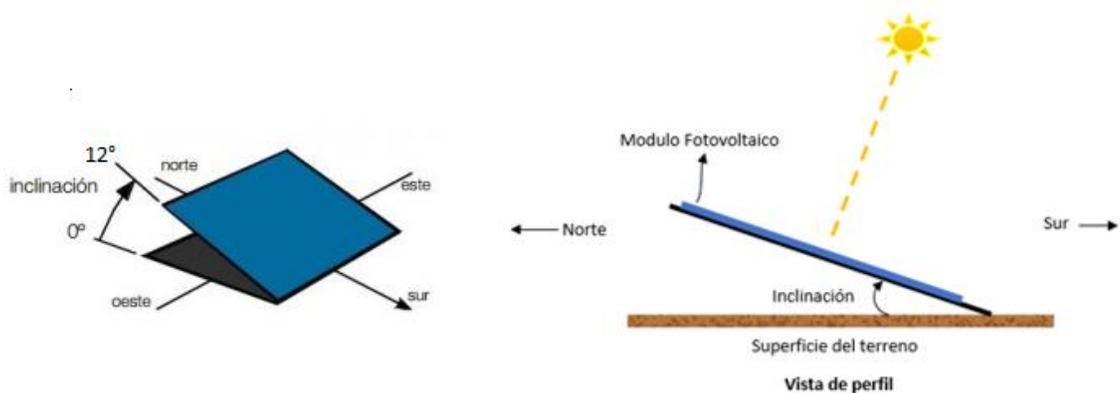


Figura 25 Inclinación del módulo fotovoltaico con respecto a la superficie del terreno fuente: Elaboración propia

Para determinar la posición y ángulos se tuvo en cuenta el lugar de instalación y la trayectoria acimutal que tendría el sol y trayectoria zenit, el cálculo de la inclinación del panel la obtuvimos con ayuda de los datos de la tabla para verificar el punto donde los sensores detectaron el punto de radiación más fuerte, datos sobre la latitud del lugar de las pruebas (10.98°) Tabla 3 y el ángulo aproximado de inclinación de la tierra (+/- 23°) Fig.26, con estos datos realizamos operaciones básicas de sumas y restas para obtener el resultado, el modelo matemático usado para obtener la inclinación del panel es el siguiente. Ecuación N°2.

$$\beta = |\theta - \alpha|$$

Ecuación 2 Modelo matemático para el cálculo de la inclinación de un panel solar fuente: Skeiker, Kamal [30]

Donde: β = inclinación del panel, θ = Angulo cenital, α = Altura del sol.

Latitud y longitud de Barranquilla

Sistema	Latitud	Longitud
Estándar decimal simple	109.685.402	-747.813.187
Grados decimales (GD)	10.9685° N	74.7813° O
Grados y minutos decimales (GMD)	10°58. 112' N	74°46.879' O
Grados, Minutos y Segundos (GMS)	10°58'6.7" N	74°46'52.7" O

Tabla 3 Latitud y longitud de la ciudad de Barranquilla fuente: www.geodatos.net [31]

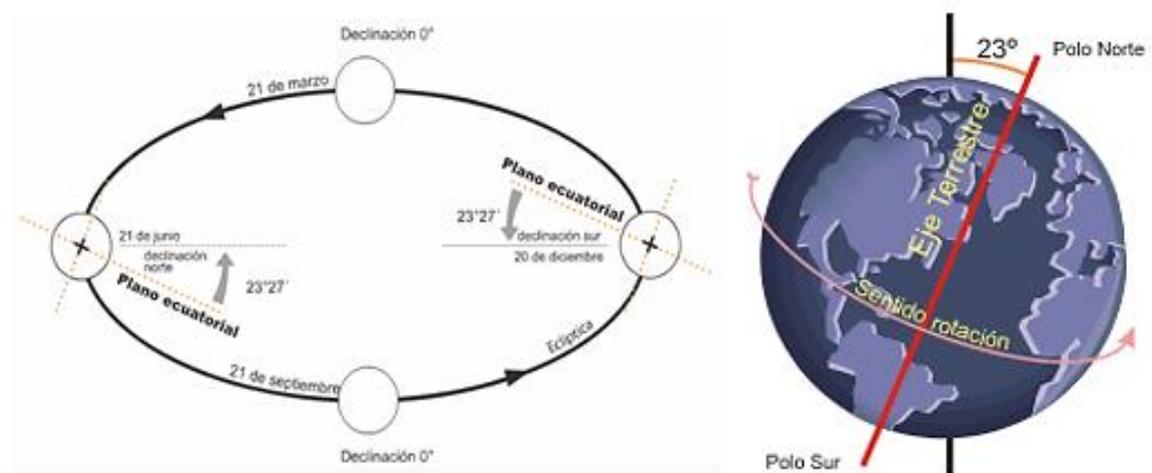


Figura 26 Inclinación de la tierra con respecto al eje de giro fuente: www.astronomia.net [32]

Analizando los datos, logramos observar que los módulos reciben radiación desde las 7:40 am hasta la 5:30pm y que además su intensidad aumenta espontáneamente entre las 11:00 am y las 3:00 pm, pasadas estas horas la intensidad va disminuyendo, los datos obtenidos durante la prueba y validación del dispositivo los podemos evidenciar en las Fig. 27. y en la Fig. 28.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Hora	Posición (°)	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9	Sensor 10	Sensor 11
2	7:30:00 a. m.	83	71	89	90	142	90	127	75	117	109	115	95
3	8:00:00 a. m.	84	68	86	86	134	86	112	67	105	90	106	88
4	8:30:00 a. m.	85	61	84	84	129	84	106	62	102	86	103	86
5	9:00:00 a. m.	86	58	83	82	120	83	103	60	97	86	95	83
6	9:30:00 a. m.	88	57	79	79	107	79	95	58	90	83	87	79
7	10:00:00 a. m.	89	57	76	76	103	76	87	57	86	79	87	78
8	10:30:00 a. m.	90	54	74	74	101	74	87	54	86	76	88	73
9	11:00:00 a. m.	92	52	71	71	93	71	88	52	83	71	82	61
10	11:30:00 a. m.	94	48	68	62	92	63	81	47	74	62	78	55
11	12:00:00 p. m.	98	28	36	45	73	28	57	28	58	45	60	28
12	12:30:00 p. m.	109	20	23	27	53	20	32	20	32	27	31	20
13	1:00:00 p. m.	177	13	15	16	20	16	20	14	22	19	21	16
14	1:30:00 p. m.	250	14	16	23	23	16	23	16	23	20	23	20
15	2:00:00 p. m.	261	18	18	32	31	19	32	20	33	24	32	25
16	2:30:00 p. m.	265	21	23	35	34	22	35	22	38	33	35	31
17	3:00:00 p. m.	267	30	30	41	46	30	41	30	50	37	41	35
18	3:30:00 p. m.	269	35	35	58	63	36	58	35	62	48	58	46
19	4:00:00 p. m.	270	40	40	64	68	46	64	46	69	61	64	62
20	4:30:00 p. m.	272	56	56	72	71	61	72	62	73	70	72	66
21	5:00:00 p. m.	273	63	63	74	75	67	73	67	79	79	74	78
22	5:30:00 p. m.	274	71	71	80	89	74	84	75	96	90	89	93

Figura 27 Datos obtenidos en la validación de la herramienta en horas de mayor radiación solar fuente: Elaboración propia.

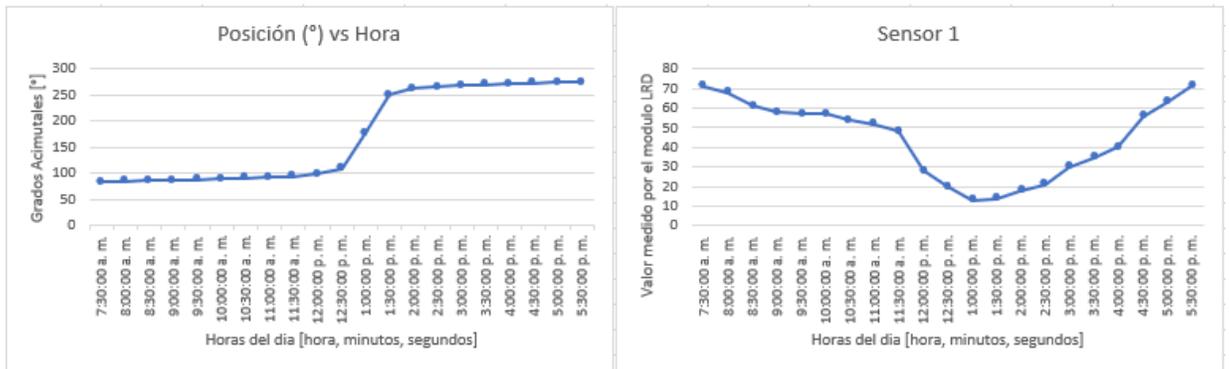


Figura 28 Datos estadísticos de la validación de la herramienta fuente: Elaboración propia

En la fig. 28 se evidencia la trayectoria acimutal que tuvo el sol durante el día de pruebas, también se observar el comportamiento que tubo uno de los sensores durante las horas de medición, en esa figura observamos que los valores medidos por el módulo tienden hacia 0 en las horas donde los niveles de radiación son más

fuertes esto se debe a la relación inversa que existe entre la resistencia del módulo LDR y la luz que este recibe tal como se observa en la Fig. 29.

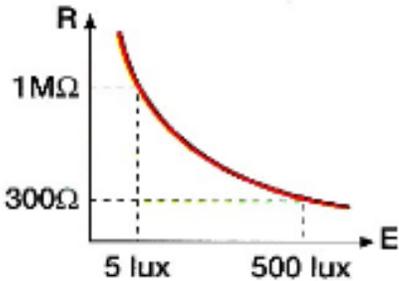


Figura 29 Curva característica de una LDR fuente: La electrónica [25]



Figura 30 Evidencia del lugar donde se realizaron las Pruebas hora: 9:40 am Fuente: Elaboración propia



Figura 31 Evidencia del lugar donde se realizaron las Pruebas, hora: 9:40 am Fuente: Elaboración Propia

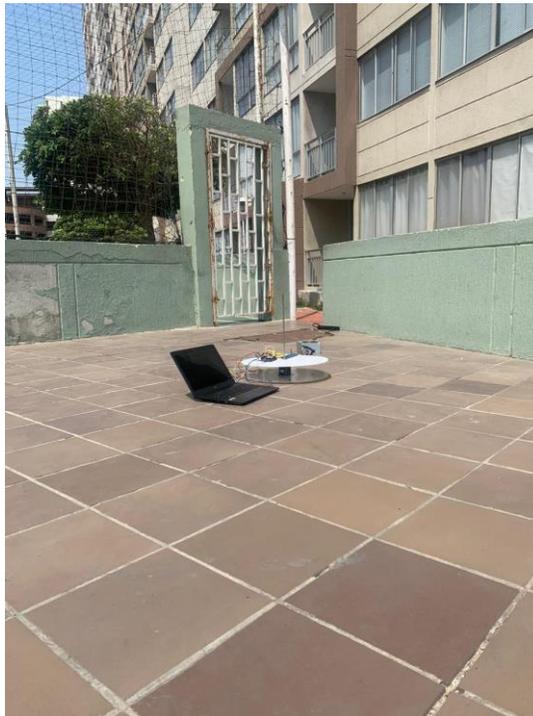


Figura 32 Evidencia del lugar donde se realizaron las Pruebas, hora: 9:40 am Fuente: Elaboración Propia

5.6 PRESUPUESTO

Componente	Valor Unitario	Valor total
Estructura	\$ 165.0000	\$ 165.000
Sensores	\$ 9.000	\$ 99.000
Arduino	\$ 45.000	\$ 45.000
Motor	\$ 95.000	\$ 95.000
Cables puente	\$ 3.500	\$ 35.000
Cable	\$ 1.500	\$ 9.000
Conectores	\$ 300	\$ 3.000
		\$ 451.000

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo investigativo se documentó el proceso metodológico llevado a cabo para consecución del desarrollo de la herramienta para optimización en el proceso de orientación de sistemas solares fotovoltaicos, haciendo uso de obtención de datos de luminosidad por medio de módulos LDR. El sistema está constituido por componentes mecánicos como lo es la estructura que soporta los módulos proyecta sombra y el motor que da giro a la base superior brindando ubicación a los sensores, y el sistema de control aplicado a la estructura y actuador.

Durante la fase de preparación para la obtención de datos fue necesario la medición durante varios días para calibrar los sensores y con ayuda de diferentes herramientas del clima encontradas en internet se pudo obtener medidas precisas a pesar de haber expuesto los sensores a diferentes factores.

Durante la fase de medición detección y toma de decisiones, se realizaron procesos de verificación de ángulos de incidencia con respeto a la hora y cantidad de LRD recibiendo señal por medio de los datos almacenados en Excel, posteriormente se

determina si hubo posibles fallos en la herramienta analizando los movimientos realizados y correspondientes a la hora.

Una vez obtenidos los datos correspondientes a un periodo específico de pruebas, se logró observar que existió una tolerancia entre $\pm 5^\circ$ por cada 30 - 45 mins, lo cual podría afectar el rendimiento de las instalaciones fijas en pasadas 4 o 5 horas. Por lo tanto, el dispositivo desarrollado puede implementarse en conjunto con sistemas de paneles con seguimiento solar.

De acuerdo con los análisis realizados a las diferentes muestras obtenidas durante la fase de pruebas, se concluye que la herramienta cumple con la función principal de determinar la posición del sol y mostrarnos cual la posición o el ángulo óptimo para la instalación de un sistema solar fotovoltaico.

Basados en las observaciones y consideraciones tomadas durante el proceso de validación de la herramienta se recomienda:

- Utilizar otra fuente de alimentación como una batería a 12v para que la herramienta sea portable en su totalidad.
- Utilizar ejes de acople de 4 tornillo del motor a la base para darle más estabilidad a la herramienta.
- Utilizar otro tipo de conectores del Arduino a los módulos con el fin de evitar una mala conexión y pérdida de datos.

Estas recomendaciones son proporcionadas con el fin lograr mejoras de rendimiento en la herramienta para un posible uso o estudio a futuro.

BIBLIOGRAFIA

- [1] F. R. Loayza, "Diseño E Implementación De Un Seguidor Solar Para El Control Electrónico De Un Reflector Scheffler," p. 60, 2012.
- [2] IDEAM, "Mapa Solar Colombiano," *Ideam*, p. 1, 2018, doi: 10.5194/osd-7-291-2010.
- [3] H. R. Murcia, "Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas Development of Solar Energy in Colombia and its Prospects," *Rev. Ing.*, vol. 28, no. 1, pp. 83–89, 2008, doi: ISSN. 0121-4993.
- [4] J. Recio Miñamo, "La energía solar," *Conversion termica a alta temperatura*, no. energía renovables. p. 1, 2010, doi: 10.1109/IEMBS.2011.6091687.
- [5] G. Sordo, D. Jesús, and L. Alvarez, "FUTURO Y VIABILIDAD DE LAS NUEVAS ENERGÍAS."
- [6] A. C. García Erazo and A. J. Troya Rodriguez, "Diseño y construcción de un sistema alternativo de termoterapia con energía solar concentrada para aplicaciones académicas, de investigación y servicio a la colectividad del laboratorio de Energías Renovables," SANGOLQUÍ/ESPE/2009, 2009.
- [7] T. Manuel, A. R. López, and V. Hugo, "La Energía Solar en la Edificación: La Energía solar Térmica y La Energía Solar Fotovoltaica," 2009.
- [8] D. J. Arrieta Morelo and S. Y. Puello Bravo, "Diseño y construcción de un seguidor solar para aumentar el rendimiento energético en paneles fotovoltaicos de un sistema de bombeo," 2018.
- [9] J. Beltrán, "Prototipo fotovoltaico con seguimiento del Sol para procesos electroquímicos," *Cent. Nac. Investig. y Desarro. Tecnológico*, 2007.
- [10] R. Caminada, "Energías renovables: el desarrollo de la energía eólica en el Perú," 2016.
- [11] "UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA," 2015. [Online]. Available: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/57464/Plan de Empresa de Importación%2C Comercialización e Instalación de Sistemas Fotovoltaicos a](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/57464/Plan%20de%20Empresa%20de%20Importación%20Comercialización%20e%20Instalación%20de%20Sistemas%20Fotovoltaicos%20a)

Guadalajara%2C Jalisco. México.pdf?sequence=1.

- [12] J. (Ingeteam E. Balda, “Energía Solar FV | Inversores,” *Energética XXI*, p. 46,47, 2011, [Online]. Available: <https://sites.google.com/a/idma.cl/energias-renovables/energia-solar-fv?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1>.
- [13] J. L. Oviedo-Salazar, M. Badii, A. Guillen, and O. Lugo-Serrato, “Historia y Uso de Energías Renovables,” *Int. J. Good Conscienc.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–18, 2015, doi: 10.1098/rspb.2009.2117.
- [14] A. Cepeda, Juan. Sierra, “Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones.” [Online]. Available: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/4196/cepedajuan2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [15] SUTAGAO, “Sensor LDR 02,” pp. 1–4.
- [16] A. Mega, “2560,” [http://www. Proj. com. br/arduinomega-2560-p19](http://www.Proj.com.br/arduinomega-2560-p19)>. *Acesso em*, vol. 20, pp. 5–14, 2016.
- [17] R. Ren21 and others, “Global status report,” *REN21 Secr. Paris*, vol. 2016, 2016.
- [18] J. Gómez Ramírez, J. D. Murcia Murcia, and I. Cabeza Rojas, “La energía solar fotovoltaica en Colombia: potenciales, antecedentes y perspectivas,” *Univ. St. Tomás*, p. 19, 2017, [Online]. Available: <http://repository.usta.edu.co/handle/11634/10312>.
- [19] R. Colombiana, “Recibido: 05 de agosto de 2012 Aceptado: 13 de octubre de 2012,” pp. 96–103, 2013.
- [20] M. Farhat, O. Barambones, J. A. Ramos, E. Duran, and J. M. Andujar, “Diseño e Implementación de un Sistema de Control estable basado en Lógica Borrosa para optimizar el rendimiento de un sistema de Generación Fotovoltaico,” *RIA/ - Rev. Iberoam. Autom. e Inform. Ind.*, vol. 12, no. 4, pp. 476–487, 2015, doi:

10.1016/j.riai.2015.07.006.

- [21] A. Escobar, M. Holguin, and J. C. Osorio, "Diseño E Implementación De Un Seguidor Solar Para La Optimización De Un Sistema Fotovoltaico.," *Sci. Tech.*, no. 44, pp. 245–250, 2010.
- [22] "Taller: Modelo para representar la trayectoria del sol sobre el globo terrestre Ilce Tlanezi Lara Montiel y Julieta Fierro."
- [23] "Vista de Motores paso a paso." http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/899/988 (accessed Mar. 10, 2020).
- [24] "Motores paso a paso. - Conti, Francisco - Google Libros." https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=6yiXDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=motores+paso+a+paso&ots=_XVtiZRbAt&sig=rcnUbOILL34cRGn3KYDHG-P94yY#v=onepage&q&f=false (accessed Mar. 10, 2020).
- [25] J. Jair, A. Mendes Júnior, and S. L. Stevan, "LDR E SENSORES DE LUZ AMBIENTE: FUNCIONAMENTO E APLICAÇÕES Development and application of sensors for industrial and biomedical purposes View project Development of sensors and control applications and monitoring of parameters for automotive purposes View project," 2013. Accessed: Mar. 10, 2020. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/287958715>.
- [26] J. M. Domínguez, "Calor y temperatura," *Act. para la enseñanza en el aula ciencias. Fundam. y Planif.*, pp. 119–165, 2007, [Online]. Available: http://servicios2.abc.gov.ar/lainstitucion/revistacomponents/revista/archivos/extos-escolares2007/CFS-ES4-1P/archivosparadescargar/CFS_ES4_1P_u8.pdf.
- [27] J. M. Méndez Muñiz, "Energía solar fotovoltaica/por Javier María Méndez Muñiz."
- [28] P. D. Valdiviezo Salas, "Diseño de un sistema fotovoltaico para el suministro

de energía eléctrica a 15 computadoras portátiles en la PUCP,” 2014.

- [29] V. Ruiz Hernández and M. Silva Pérez, “Radiación solar: Medidas y cálculos.” Sevilla, España, 2005.
- [30] K. Skeiker, “Optimum tilt angle and orientation for solar collectors in Syria,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 9, pp. 2439–2448, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.05.031>.
- [31] “Coordenadas geográficas de Barranquilla, Colombia - Latitud y longitud.” <https://www.geodatos.net/coordenadas/colombia/atlantico/barranquilla> (accessed May 14, 2020).
- [32] “La inclinación del eje de rotación terrestre y el fenómeno de las estaciones.” <http://astronomia.net/cosmologia/lec117.htm> (accessed May 14, 2020).