ISMMM
INSTITUTO SUPERIOR
MINERO METALÚRGICO DE MOA
Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ

Facultad: Metalurgia – Electromecánica

Departamento de Eléctrica

Trabajo de diploma
Para optar por el título de
Ingeniero Eléctrico

Construcción de un sistema de seguimiento fotovoltaico.

Autor: Adrián Gonzales Pérez.

Tutor: Ing. Daniel Mendiola Ellis.

Moa, 2018
"Año 60 de la Revolución"

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD.

En decisión conjunta, el autor Adrian González Pérez y el tutor Ing.Daniel Mendiola Elis, certificamos nuestra propiedad intelectual sobre este Trabajo de Diploma con título: “Construcción de un sistema de seguimiento fotovoltaico”. Somos los únicos autores de este Trabajo de Diploma, y autorizamos al Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, a hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

_____

Adrian Gonzáles Perez.

_____

Ing. Daniel Mendiola Ellis.

INTRODUCCIÓN GENERAL

La energía solar se presenta como alternativa importante ante el aumento del consumo energético del planeta, debido a que, la cantidad de energía del sol, que llega a la superficie de la tierra en un día es diez veces más que la energía consumida en nuestro planeta durante un año. A través del efecto fotovoltaico la energía contenida en la luz del sol puede ser convertida directamente en energía eléctrica.[1, 2]

En la actualidad la creciente demanda de energía eléctrica unido al encarecimiento de los hidrocarburos y las fuentes convencionales de generación han derivado en la necesidad de incrementar el uso de fuentes renovables, así como la optimización de las mismas para lograr un mayor aprovechamiento energético.

Cuba aspira a convertir su matriz energética, que en la actualidad es altamente dependiente del petróleo, y para 2030 tiene previsto alcanzar el 24 por ciento de generación eléctrica desde fuentes renovables, llegando a los 2.300MW. Actualmente las fuentes renovables aportan 87,5MW al Sistema Eléctrico Nacional y se espera alcanzar los 282 al finalizar 2018.[2]

En nuestro país la utilización de la energía solar fotovoltaica se encuentra en expansión con la construcción de parques fotovoltaicos y la instalación de sistemas autónomos en lugares de difícil acceso. La mayor parte de los paneles fotovoltaicos son instalados en posición fija lo cual limita la cantidad de radiación captada por los mismos y en consecuencia la cantidad de energía eléctrica convertida.

El método más utilizado a nivel internacional para solucionar este problema es acoplar los paneles a un sistema de seguimiento. Este es un dispositivo electro mecánico capaz de orientar los paneles solares de forma que éstos permanezcan aproximadamente perpendiculares a los rayos solares. Cuando esto ocurre, la radiación solar captada es máxima incrementando la energía convertida si se compara con una instalación fija.[3]

1.2TRABAJOS PRECEDENTES

En la confección de este trabajo se realizó un estudio de obras referentes al diseño de seguidores solares. El sistema propuesto por [4]utiliza un micro controlador PIC14F84, una tarjeta de adquisición de datos y un driver L293 para el control de un motor de posicionamiento angular. El prototipo propuesto solo posee un eje por lo cual el seguimiento no es completo limitando la eficiencia. Además, utiliza una tarjeta de adquisición de datos lo cual lo hace más costoso.

[5]Propone un seguidor solar para fines académicos lo cual se presenta como una buena iniciativa. Pero realmente se hace necesario construir o proponer sistemas de seguimiento orientados a incrementar la eficiencia de generadores fotovoltaicos. Este sistema utiliza pulsadores para indicar el fin del recorrido angular, en su lugar el sistema propuesto en este trabajo reestablece su posición inicial mediante un ajuste en la programación con lo cual a cierto nivel de iluminación determina que el día acabó y retorna al punto de partida. Utilizó un micro controlador PIC18F4550 potente, rápido y económico. Cuenta con conexión USB con lo cual es más fácil de programar. Pero la construcción de su prototipo solo se llevó a cabo a nivel de laboratorio.

Situación Problémica

La radiación solar incidente sobre una superficie fija varía debido al movimiento que realiza el sol diariamente y el movimiento gradual que describe durante todo el año. Para incrementar la captación de radiación en intervalos dados de tiempo, se han diseñado sistemas de seguimiento fotovoltaico.

Problema Científico

¿Cómo construir un sistema de seguimiento fotovoltaico?

Objetivo General

Construir un sistema de seguimiento capaz de orientar los paneles solares en el punto de máxima radiación en distintos intervalos de tiempo.

Hipótesis

Con el uso del Software Proteus, el compilador Arduino y teniendo en cuenta variables ambientales es posible construir y evaluar un sistema de seguimiento fotovoltaico.

Objeto de estudio

Sistemas de seguimiento fotovoltaico.

Campo de acción

Diseño electromecánico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar y definir la arquitectura del seguidor solar sobre el cual se realizará el diseño.
- Elaborar un diseño teniendo en cuenta las variables ambientales y los materiales a emplear.
- Realizar valoración económica y análisis del impacto social vinculado con el sistema de seguimiento fotovoltaico propuesto en la investigación.

Tareas

- Determinación de las principales tendencias a nivel mundial en la comercialización de seguidores solares.
- Diseño, del seguidor solar utilizando el software Proteus® y el compilador Arduino®.
- Construcción del seguidor, ensamblaje de la estructura metálica, partes mecánicas, motores, componentes eléctricos e instalación del firmware en la placa controladora.
- Realizar pruebas para determinar si el funcionamiento del seguidor cumple con las expectativas deseadas.

CAPÍTULO I SISTEMAS DE SEGUIMIENTO FOTOVOLTAICO.

Para incrementar la radiación captada por los paneles solares en intervalos dados de tiempo, se han diseñado sistemas de seguimiento solar, debido al movimiento que realiza el sol diariamente y el movimiento gradual que describe durante todo el año. Todos los seguidores solares incluyen mecanismos para orientar una placa colectora de forma que permanezca lo más perpendicular posible a los rayos solares.[6]

La incidencia de los rayos solares sobre el plano de los paneles solares fotovoltaicos difiere de la perpendicularidad a lo largo del día y por lo tanto se ve reducida la eficiencia de los paneles solares. Es posible corregir esta situación utilizando un seguidor solar que oriente los paneles a la posición del Sol.

Los seguidores solares son dispositivos electro-mecánicos que hacen que el panel o el colector, siga la trayectoria del sol durante el día y al final de este se reposicione para continuar con este movimiento al siguiente. En resumen este dispositivo simula la propiedad que tienen los girasoles de realizar un moviendo de orientación hacia la luz del sol. Los paneles fotovoltaicos con seguimiento siguen el movimiento del sol, obteniendo un mayor rendimiento en comparación con los sistemas fotovoltaicos con paneles fijos, entre un 30 y un 34% más [7]

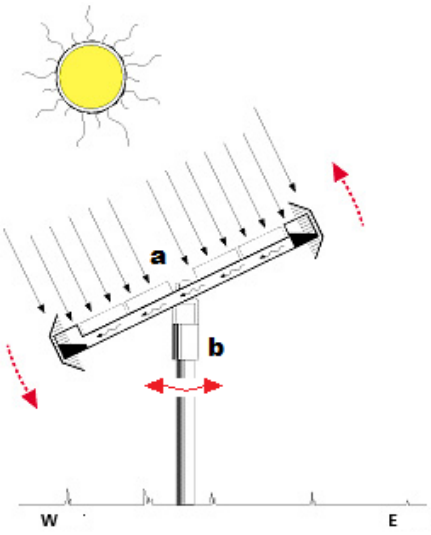


Fig1 Esquema básico de un seguidor solar

a) superficie captadora (panel fotovoltaico) b) mecanismos de orientación.

1.3COMPONENTES DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO FOTOVOLTAICO

1.4PANELES FOTOVOLTAICOS

Un panel fotovoltaico es un tipo de panel solar diseñado para el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica. Su función es transformar la energía solar en electricidad. Están formados por un conjunto de celdas fotovoltaicas interconectadas entre ellas las que dependen del efecto fotoeléctrico.

La célula solar fotovoltaica es una lámina de silicio cristalino de un espesor aproximado de 0.3mm. Está dotada de unos contactos eléctricos para poder canalizar la energía que produce cuando se la ilumina. Existen varios tipos de paneles solares fotovoltaicos, suelen clasificarse de acuerdo al material y a la tecnología utilizada para su elaboración.

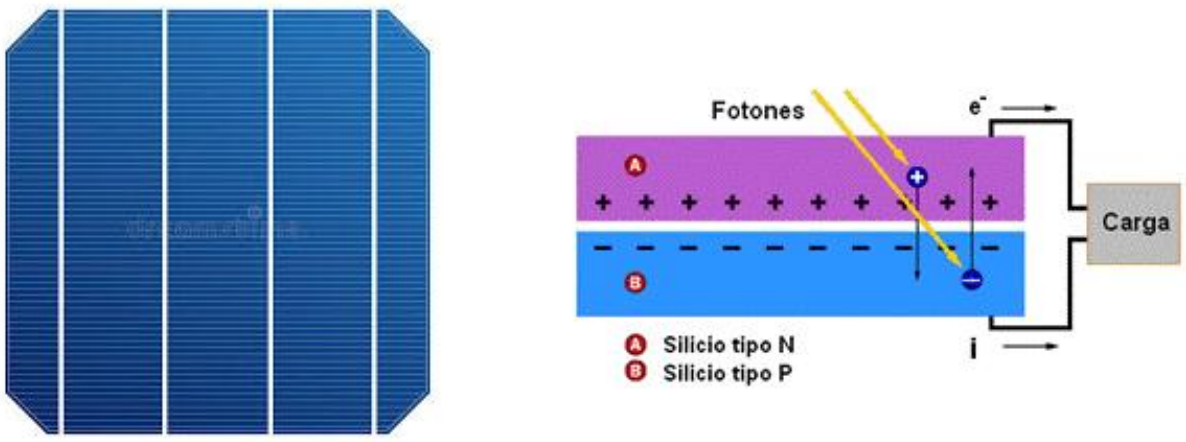


Fig2 Apariencia y estructura de una célula solar.

1.4.1Tipos de paneles solares

Mono cristalino.

Están formados en secciones con una barra de silicio perfectamente cristalizado en una sola pieza. En algunos análisis desarrollados en laboratorios se han alcanzado rendimientos máximos del 24,7%, a diferencia de los que existen en el mercado que alcanzan un 16%.

Poli cristalino.

Los materiales son semejantes a los mono cristalinos, sin embargo el proceso de cristalización del silicio es diferente. Los paneles poli cristalinos se basan en secciones de una barra de silicio que se ha estructurado desordenadamente en forma de pequeños cristales. Son visualmente reconocibles por presentar en su superficie un aspecto granulado. Su rendimiento es inferior a los mono cristalinos pero son de bajo costo alcanzando rendimientos comercialmente disponibles hasta un 14%.[8]

Amorfo.

Basados también en el silicio, pero a diferencia de los anteriores este material no sigue una estructura. Los paneles de este tipo son habitualmente empleados para pequeños dispositivos electrónicos como calculadoras, relojes y en pequeños paneles portátiles. Su rendimiento máximo ha sido del 13% y los de uso comercial solo alcanzan el 8%.[8]

Fig3 Tipos de paneles solares.

1.4.2Mecanismos de orientación

REDUCTORES DE ENGARANAJE

Los engranajes tienen la función de transmitir una rotación entre dos ejes con una relación de velocidades angulares constantes. Se denomina relación de transmisión (i) al coeficiente entre la velocidad angular de salida (velocidad de la rueda conducida) y la de entrada (velocidad de la rueda conductora). Ver ecuación (1.0).

$$\boldsymbol{i = \frac{W2}{W1}} \qquad \textbf{(1.0)}$$

Donde:

(i) relación de transmisión

(W2) velocidad de la rueda conducida

(W1) velocidad de la rueda conductora.

Dicha relación debe tener sigo positivo si los ejes giran en el mismo sentido y signo negativo si giran en sentido contrario. Del mismo modo si la relación de transmisión es mayor que 1 (i>1) se supondrá el empleo de un mecanismo multiplicador, y si es menor que 1 (i<1) que suele ser lo más habitual, supondrá el empleo de un mecanismo reductor. Es claro que la obtención de una relación de transmisión de carga entra dos ejes no es algo exclusivo de los engranajes, ya que lo mismo puede obtenerse con poleas o cadenas.[9]

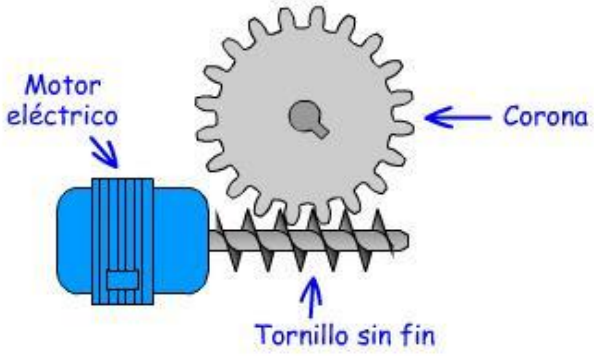


Fig4 Reductor de engranaje sinfín-corona

Grados de libertad

Por grado de libertad se entiende el número de entradas independientes requeridas para determinar la posición de todos los eslabones del mecanismo respecto a tierra en cualquier instante.

En muchos casos resulta posible conocer la movilidad de un mecanismo a partir del número de eslabones y la cantidad y tipo de los pares que los enlazan. El criterio de Grübler -Kutzbach para mecanismos planos establece que la movilidad está dada por: Ver ecuación (2.0):

$$m = 3(n-1) - 2j1 - j2 \qquad \textbf{(2.0)}$$

Donde:

m= movilidad

n = número de eslabones.

j1 = número de pares con un grado de libertad.

j2 = número de pares con dos grados de libertad.

Los grados de libertad en un ensamble de eslabones predicen por completo su carácter. Hay varias posibilidades:

· m positivo: Se tendrá un mecanismo, y los eslabones tendrán movimiento relativo.

· m=1: El mecanismo puede ser impulsado con un solo movimiento de entrada.

· m = 0: Se tendrá una estructura, y ningún movimiento es posible.

· m negativo: Se tendrá una estructura precargada, estáticamente indeterminada en la que hay exceso de ligaduras, por lo que ningún movimiento es posible y algunos esfuerzos pueden también estar presentes en el momento del ensamble.[10]

1.5SEGUIMIENTO SOLAR

Existen dos tipos de seguimiento que pueden llevarse a cabo. Dependiendo de la aplicación que se le va a dar al seguidor y las necesidades de los usuarios, entonces se elegirá entre uno u otro prototipo

Tipos de seguimiento:

- **Seguimiento Ecuatorial:** Consiste en el seguimiento de dos ejes paralelos a los de la tierra (N-S/E-O), donde el movimiento en Norte-Sur proporciona el movimiento diurno y el movimiento Este-Oeste proporciona el ángulo que se toma con respecto al eje polar.
- **Seguimiento Azimutal:** Es uno de los más empleados, sobre todo cuando se trata de estructuras pesadas. Uno de los ejes es vertical y proporciona el seguimiento en azimut y el otro eje es horizontal y proporciona el seguimiento de altura. El seguimiento se realiza en los dos ejes.

- **Posicionamiento solar, elevación y azimut solar**

El azimut es el ángulo que forma un cuerpo celeste y el Norte, medido en sentido de rotación de las agujas de un reloj alrededor del horizonte del observador. Determina la dirección de un cuerpo celeste. Por ejemplo, un cuerpo celeste que se halla al Norte tiene un azimut de 0º, uno al Este 90º, uno al Sur 180º y al Oeste 270º.

La elevación es la distancia angular vertical que hay entre un cuerpo celeste y el horizonte local del observador o, también llamado, plano local del observador. Para nosotros, la elevación del sol es el ángulo que forma la dirección de su centro geométrico y el horizonte local del observador.[11]

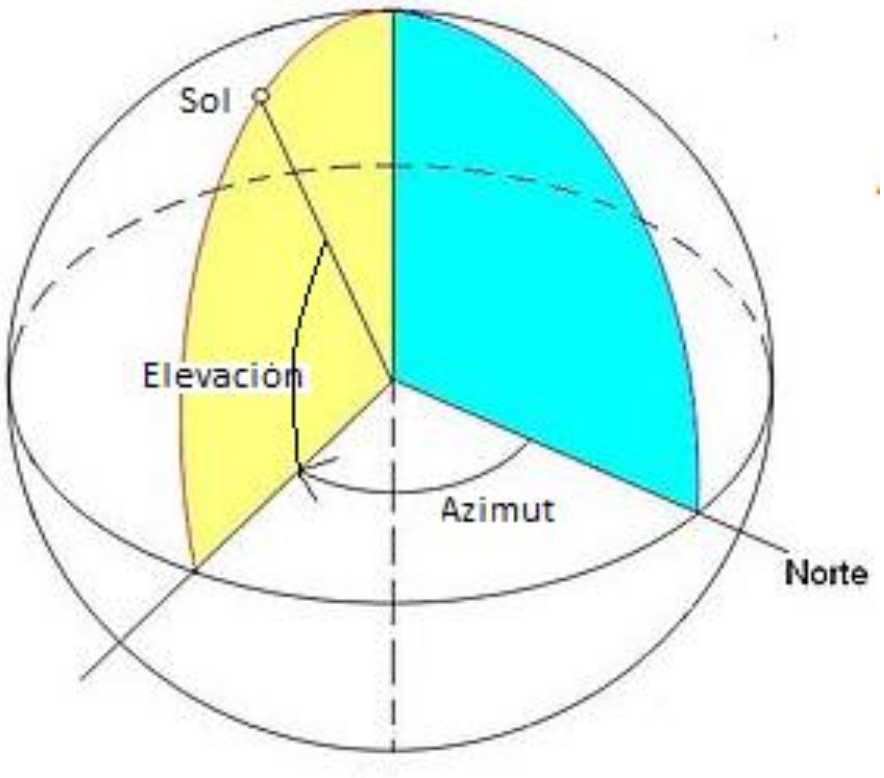


Fig5 Ángulos de posicionamiento solar, elevación y azimut.

Carta solar

La carta solar cilíndrica consiste en un diagrama en el que se representa la posición del Sol sobre un lugar determinado para fechas diferentes y a diferentes horas, en función de la altura del Sol y el azimut del punto (orientación con respecto al Sur). En el eje vertical se sitúa la altura solar en grados sexagesimales y en el eje horizontal el acimut medido desde el Sur. Una de las aplicaciones de la carta solar es conocer el número de horas de sol teóricas (con cielo despejado) que reciben las diferentes fachadas de un edificio (o laderas de una montaña) cuando no ocurre ninguna obstrucción (no hay sombras proyectadas, así servirán para fachadas de edificios o laderas de elevada pendiente). Para ello únicamente hay que considerar que el acimut en grados sexagesimales del eje X del diagrama expresa las diferentes orientaciones de lasuperficie: (ver figura de carta solar).[12]

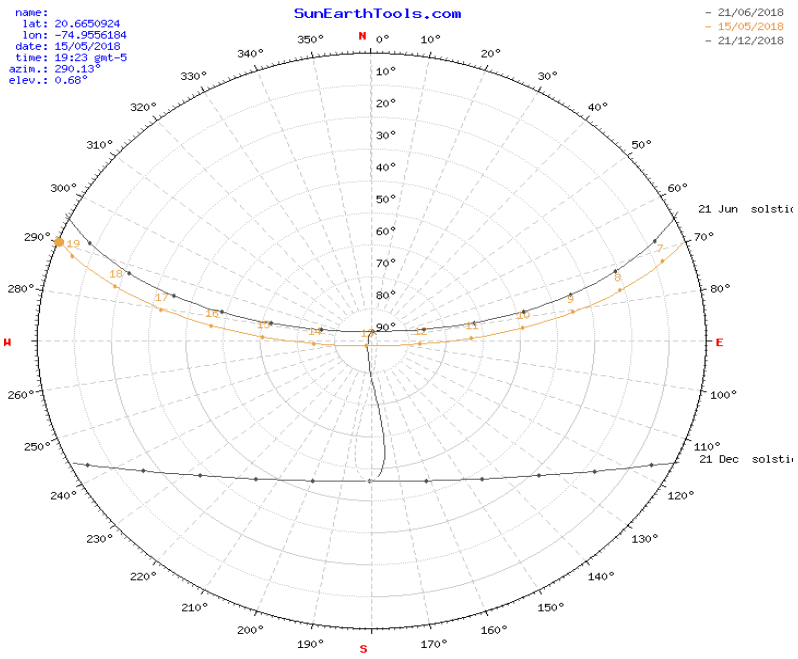


Fig6 Carta solar cilíndrica.

Ángulo de declinación

La declinación del sol es el ángulo entre el ecuador y una línea trazada desde el centro de la Tierra al centro del sol denotado por δ, varía estacionalmente debido a la inclinación de la Tierra sobre su eje de rotación y a la rotación de la Tierra alrededor del sol. Ver ecuación (3.0).

$$\boldsymbol{\delta = 23.45 sen(360 \frac{248+d}{365})} \qquad \textbf{(3.0)}$$

Donde:

D= día del año con el 1° de enero como d = 1**.**

La declinación es cero en los equinoccios (22 de marzo y 22 de septiembre), positivos durante el verano del hemisferio norte y negativo durante el invierno del hemisferio norte. La declinación alcanza un máximo de 23,45 ° en 22 de junio (solsticio de verano en el hemisferio norte) y un mínimo de -23,45 ° el 22 de diciembre (solsticio de invierno en el hemisferio norte).[13]

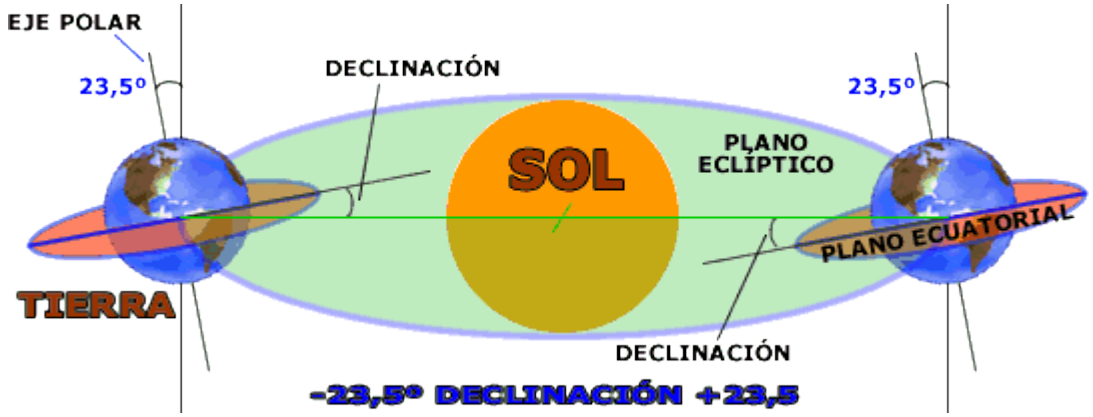


Fig7 Representación del ángulo de declinación.

1.6CLASIFICACIÓN DE LOS SEGUIDORES SOLARES

Clasificación atendiendo a su estructura

- **Seguidor de estructuras fijas:** Son las más robustas y flexibles del mercado y permiten adaptarse a cualquier tipo de terreno con desniveles superiores al 5%.
- **Seguidor de estructuras móviles:** Son menos robustas que las anteriores y permiten ser trasladadas hacia lugares de mayor incidencia del sol.

Clasificación según el tipo de sistema fotovoltaico

Según el tipo de sistema fotovoltaico encargado de la producción de energía, los seguidores se dividen en:

- **Seguidores en sistemas fotovoltaicos concentrados:** Son aquellos que requieren que la componente de luz directa esté concentrada en un punto específico, y por lo tanto debe estar orientado con mucha precisión, arrojando pérdidas en caso contrario. Los seguidores de este tipo orientan ya sea el sistema o un espejo o conjunto de espejos para que la luz recibida sea enfocada en un colector fotovoltaico. La precisión requerida en este caso va desde un máximo de 2° hasta un mínimo de 0.1° para entregar el 90% de la potencia nominal de salida.
- **Seguidores en sistemas fotovoltaicos no concentrados:** En el caso de los paneles fotovoltaicos aceptan tanto la luz directa como la difusa, de manera

que en estos casos no requieren gran precisión para entregar una potencia aceptable, como en el caso anteriormente explicado. El seguimiento en estos tipos de sistemas se usa para minimizar el ángulo de incidencia entre la luz incidente y la normal de los paneles, para producir la mayor cantidad de energía. Puede instruirse entonces que la precisión requerida no es tan grande, ya que a partir de la figura 1 se puede deducir que la potencia recibida por el panel está afectada por el coseno del ángulo entre la normal del panel y el rayo incidente.

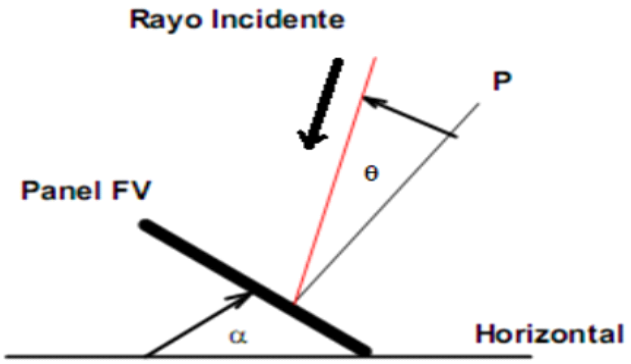


Fig8 Relación de Potencia incidente y ángulo de inclinación.

Además de las pérdidas por la mala orientación del panel existen por suciedad, temperatura, por efecto de sombra, conectar paneles diferentes, espectro solar, caídas óhmicas del cableado, rendimiento propio del panel, de la batería, del inversor, etc. Pero para nosotros, es importante únicamente reducir las pérdidas por mala orientación del panel, ya que poco o nada se puede hacer en los demás casos. Es lógico pensar que los parámetros propios del panel no está en nuestras manos cambiarlos a gusto nuestro, pues ya son inherentes al sistema, por ejemplo: la eficiencia propia del panel solar. Nos preocupa solamente la inclinación del panel, puesto que sabemos que la inclinación del panel respecto al rayo incidente de luz, afecta a la potencia de salida del panel solar y al rendimiento del sistema. Dicho de otra manera, las pérdidas provenientes de una mala orientación, pueden expresarse solamente con la función cosθ, siendo θ el ángulo entre la normal del panel solar y el rayo incidente. La figura 1.1 muestra entonces el comportamiento de la eficiencia de un sistema fotovoltaico (SFV) en función de este ángulo de desorientación.[5]

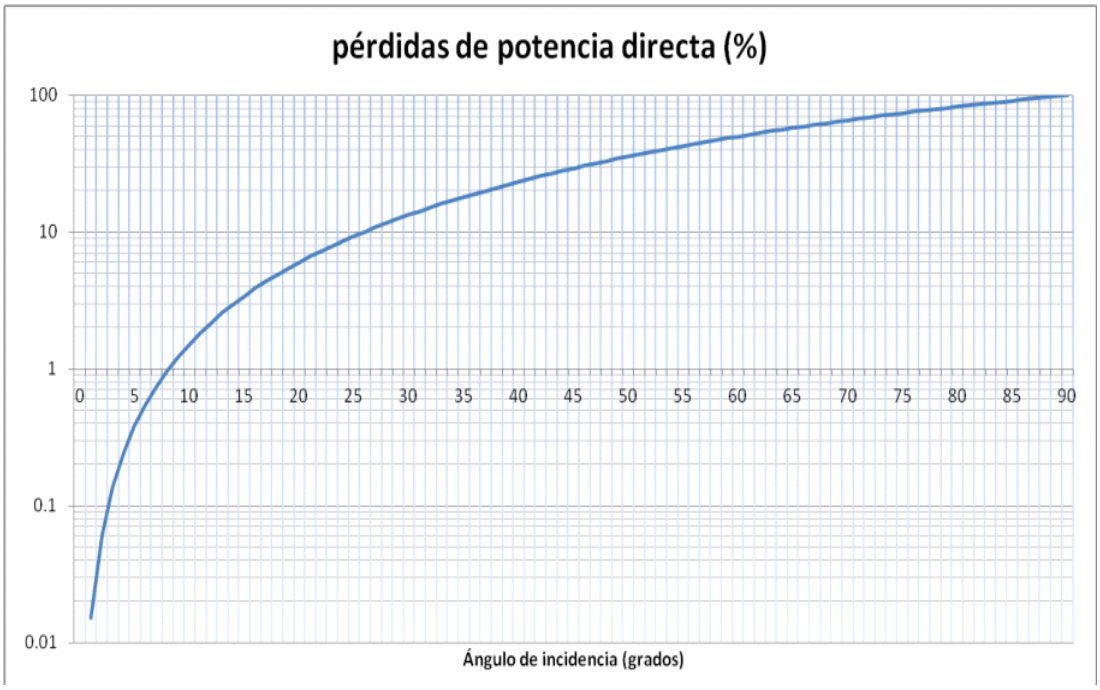


Fig9 Pérdidas de potencia directa por mala orientación de paneles solares.

Clasificación de los seguidores solares según el tipo de movimiento

Seguidor de un solo eje: La rotación de la superficie de captación se hace sobre un solo eje, este puede ser horizontal, vertical u oblicuo. Este tipo de seguimiento representa un mínimo grado de complejidad y su costo es menor en comparación con otros tipos de seguidores. La limitación de este tipo de seguidor consiste en que no puede realizar un seguimiento completo del sol ya que solo puede seguir ya sea el azimut o la inclinación solar, pero no ambas con un incremento de conversión de la energía eléctrica de hasta 28%.

Seguidor de dos ejes: Este tipo de seguidor cuenta con dos grados de libertad y está en capacidad de realizar un seguimiento total del sol. Tanto en inclinación como en azimut, aunque el rendimiento de la instalación puede ser superior en comparación con los de un solo eje llegando hasta 35%, es importante mencionar que el de dos ejes resulta ser más costoso.[6]

1.7COMPARATIVA DE LOS SEGUIDORES SOLARES

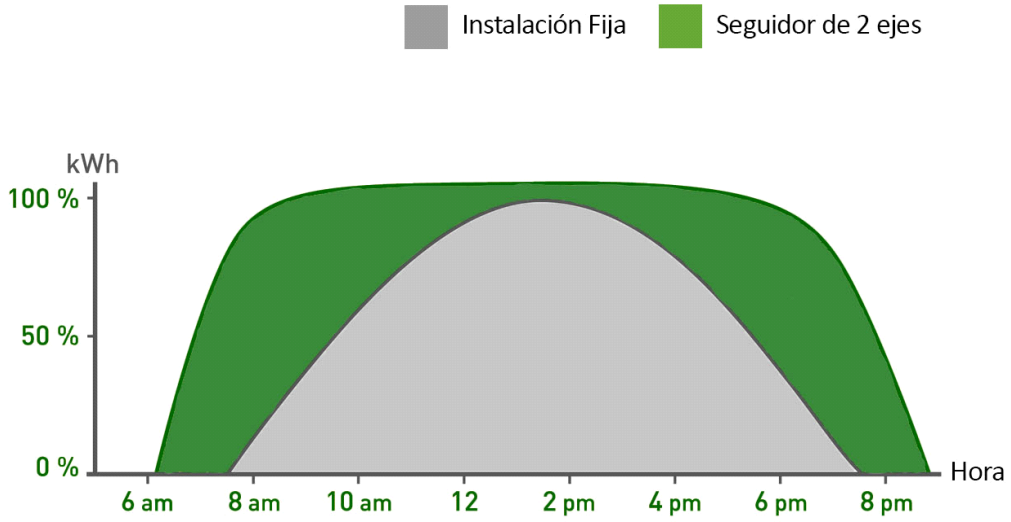


Fig10 Comparación del comportamiento de la generación entre un sistema fijo y con seguimiento en dos ejes.[14]

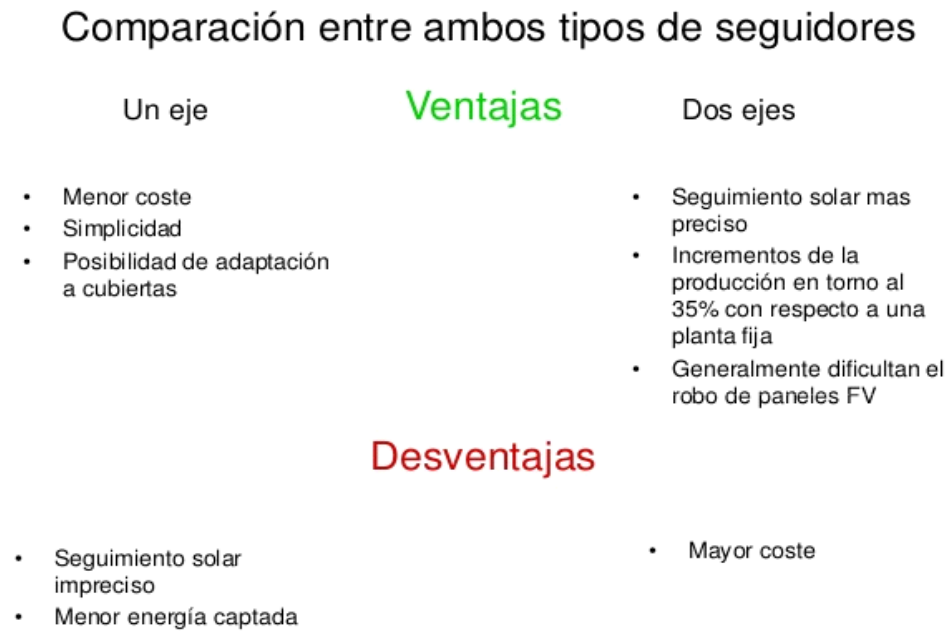


Fig11 Comparación atendiendo al numero de ejes.(sitiosolar.com, 2013)

Según el dispositivo que proporciona el movimiento existen dos tipos básicos de seguidores:

- **Seguidor pasivo:** Es un seguidor que carece de un control electrónico para su funcionamiento, el cual se basa en el cambio de densidad de un líquido de bajo punto de ebullición, regularmente freón. También puede usar un gas comprimido de bajo punto de ebullición, el cual es conducido hacia un lado o hacia otro, según sea calentado por la luz solar incrementando la presión en el gas, provocando que el seguidor se mueva en respuesta a ese desbalance. Como es un tipo de seguimiento impreciso no puede utilizarse para sistemas concentrados, pero sí en sistemas fotovoltaicos no concentrados.
- **Seguidor activo:** Este tipo de seguidor utiliza un control electrónico para ubicar la posición del Sol, el cual se retroalimenta a base de sensores o por cálculos numéricos y utilizan algún actuador para realizar el movimiento. Puede utilizar motores eléctricos, brazos electromecánicos con engranajes o tornillos sinfín, los cuales son controlados por un circuito electrónico. Este tipo de seguidor debe estar energizado ya sea por una fuente externa al sistema FV o por el mismo, convirtiendo al seguidor en "autónomo". Se debe considerar que la energía en el panel solar debe ser suficiente para energizar el seguidor, de lo contrario, no podrá orientarse. En el mercado existen diferentes tipos de seguidores activos que se diferencian entre sí por el número de movimientos automáticos que realizan y el volumen de trabajo que pueden desarrollar.[5]

Clasificación de los seguidores solares según el algoritmo de seguimiento

Seguidores por punto luminoso. Este tipo de seguidores poseen un sensor que les indica cual es el punto del cielo más luminoso al cual deben apuntar.

Seguidores con programación astronómica. Se trata de seguidores que mediante un programa y de acuerdo con algoritmos matemáticos conocen en qué punto debería estar el sol a cada hora y apuntan a dicha posición.[15]

1.8SEGUIDORES SOLARES CON MICRO CONTROLADORES

Los altos niveles de integración y la reducción del costo de adquisición de dichos dispositivos han traído consigo un aumento en el uso de estos como parte de todo tipo de equipos electrónicos que van desde electrodomésticos hasta equipo médico. En la actualidad la mayor parte de los seguidores solares son controlados por micro-controladores debido a la autonomía que brindan, la adaptabilidad y el bajo coste.

1.8.1Micro-controladores

Un micro-controlador es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto por varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica. Un micro controlador incluye en su interior las tres principales unidades funcionales de una computadora: unidad central de procesamiento, memoria y periféricos de entrada/salida.[16]

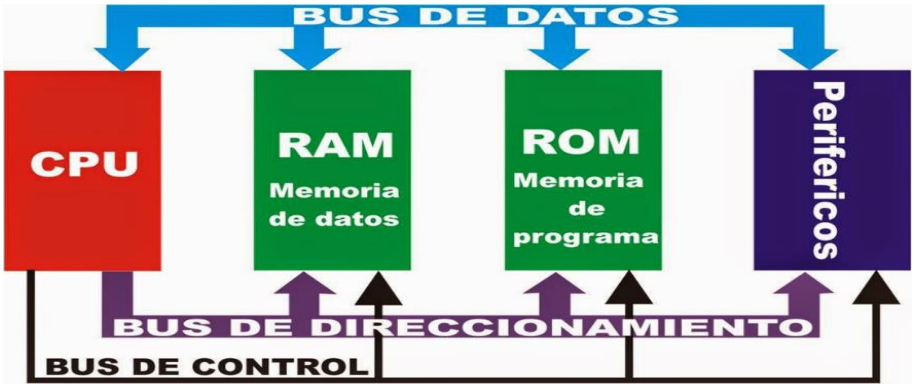


Fig12 Esquema de bloques de un micro-controlador.

1.8.2Características a tener en cuenta en la selección de micro-controladores

- Voltaje de operación
- Pines digitales E/S
- Pines de entrada analógica.
- Memoria flash
- SRAM
- EEPROM.
- Velocidad de reloj

1.9TENDENCIAS ACTUALES EN LA FABRICACIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE SEGUIDORES SOLARES

Según datos de la empresa Degertraker los seguidores de dos ejes se alzan actualmente como líderes en el mercado debido a su alta eficiencia. Destacan el uso de sistemas de control detección máxima de luz (MLD), el restablecimiento de la posición inicial en la noche y la protección contra vientos fuertes con anemómetro.[17]

1.9.1Sistemas de seguimiento fotovoltaico que existen en el mercado

	TUV CE assced 100 W un eje.	Precio 873 USD
	Dos ejes de seguimiento solar concentrado 320W	Precio 1000 USD

1.10CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Atendiendo a las características de los seguidores solares, su clasificación, las ventajas y desventajas de cada uno, así como las tendencias actuales sobre el uso de estos se decide construir un seguidor solar de dos ejes utilizando como algoritmo de seguimiento el método por punto luminoso y con la capacidad de restablecer su posición inicial. Para esto se hace necesario tener en cuenta variables ambientales relacionadas con la posición del sol, así como definir la velocidad de seguimiento, la precisión y el método de control a utilizar.

CAPÍTULO II CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO FOTOVOLTAICO.

2.1INTRODUCCIÓN

Como se dijo anteriormente un seguidor solar es un dispositivo electro mecánico capaz de orientar los paneles solares de forma que estos permanezcan aproximadamente perpendiculares a los rayos solares. Cuando esto ocurre la radiación solar captada es máxima haciendo posible incrementar la energía eléctrica convertida.

Como se puede observar en una carta solar los ángulos de elevación y azimut varían a lo largo del día de manera que hay horas en que la radiación captada es mayor que en otras si se tiene un sistema fijo.

Debido a este comportamiento se decide construir un sistema de seguimiento de dos ejes, utilizando como algoritmo de seguimiento el método por punto luminoso. Se hace necesario determinar una velocidad de seguimiento sobre la base de la variación de los ángulos de posicionamiento del sol en diferentes momentos del día y del factor de reducción de los engranajes para lograr una mayor precisión.

El sistema está compuesto por una parte eléctrica y una mecánica. La parte eléctrica se encargará de realizar el análisis de la radiación proveniente del sol y de accionar dos motores para mover las partes mecánicas y posicionar el panel solar en el punto de máxima radiación. La parte mecánica será la encargada de dotar de un soporte sólido al sistema, así como capacitarlo para tener cierto grado de movimiento.

2.2DISEÑO MECÁNICO DEL PROTOTIPO

El diseño mecánico del prototipo se realizó tomando como referencia modelos disponibles en el mercado, con la posibilidad de soportar un panel de 150W y de realizar un seguimiento total de la trayectoria solar tanto en azimut como en elevación o dicho de otra manera que contara con dos grados de libertad.

2.2.1El panel solar

El panel solar utilizado es un SW 150R6A de silicio poli cristalino y una potencia de 150W. Consta de 36 celdas por módulo cada una de 156mmx156mm, una capa de cristal templado de seguridad (EN 12150), en la capa trasera una película delgada de teflón blanco y está ensamblado en un marco de aluminio anodizado. Además, puede operar en un rango de temperatura de -45ºC a 85ºC.

Largo	1508mm
Ancho	680mm
Espesor	33mm
Peso	11kg

Fig14 Características mecánicas del panel solar.

2.3DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO

Para la construcción del sistema mecánico se utilizaron materiales reciclados, algunos de ellos partes de un automóvil que se encontraban en desuso por lo que fue necesario restaurar alguna, además de realizar adaptaciones mediante cortes y soldadura. El sistema mecánico consta de tres partes fundamentales. La base, los brazos y las partes móviles. (Ver figura 14). Las partes estructurales como la base y los brazos se construyeron de manera artesanal, tomando como base de ejemplo diseños disponibles en el mercado y teniendo en cuenta las dimensiones y el peso de la superficie de captación que en este caso es un panel solar. Este diseño tiene la particularidad de ser fácil de montar y desmontar para facilitar su almacenaje y transporte.

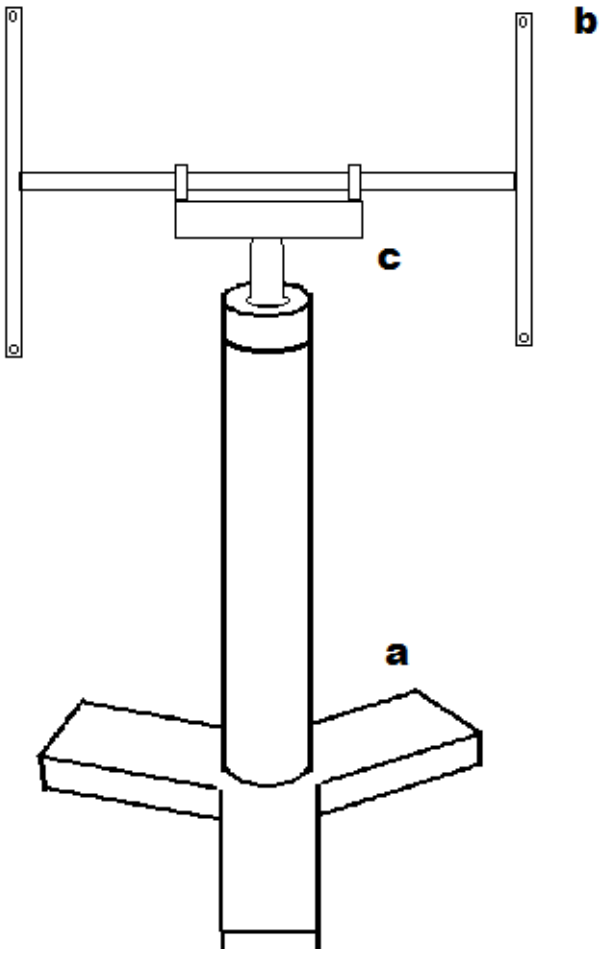


Fig14 Vista del diseño del seguidor solar.

Base

La base está construida en dos partes. La primera con una viga de acero de 120mm de ancho cortada en tres piezas con un diámetro de apoyo de 600mm. La segunda es una sección de tubería de 110mm de diámetro, con un largo aproximado de 1000mm y dispuesto a modo de torre. Ambas partes del conjunto se encuentran unidas por soldadura de arco eléctrico, construidas con el objetivo fundamental dotar al seguidor de una base sólida evitando que se vuelque y se dañe el panel solar.

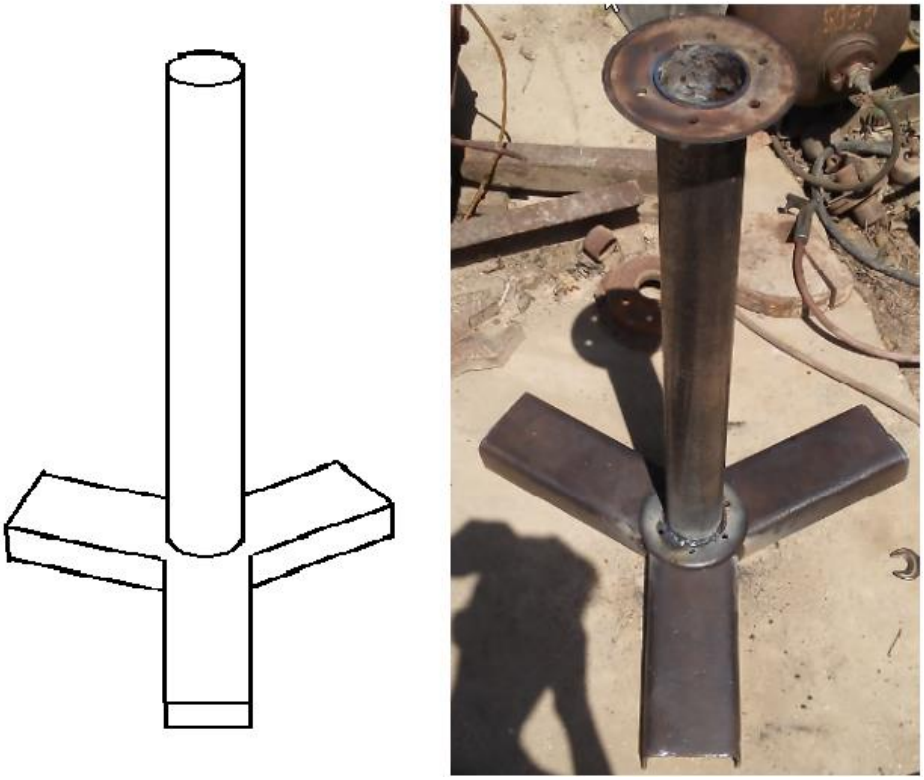


Fig15 Construcción de la base.

Brazos

Los brazos constituyen la estructura de apoyo directo del panel solar, está construida a la medida del mismo por cuatro secciones de tubería de 10mm dispuestas a modo de T doble. La estructura posee agujeros en los extremos ubicados a 880mm de largo y 640mm de ancho, en correspondencia con los agujeros ubicados en la estructura del panel para acoplarlo correctamente.

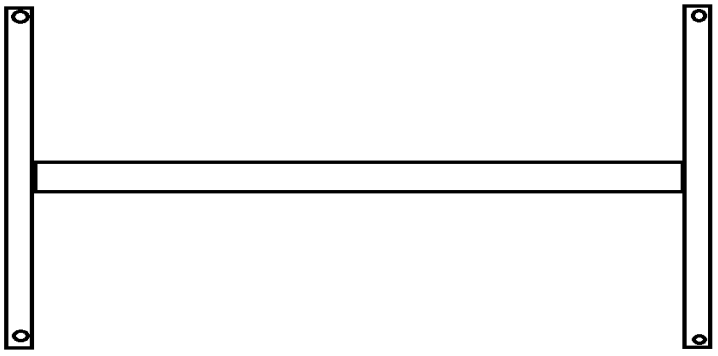


Fig16 Diseño de los brazos que sostendrán al panel solar.

Fig17 Reductor de engranaje de tipo sin fin y corona.

2.3.1Velocidad de seguimiento

Los ángulos de posición del sol varían durante todo el día de manera no uniforme, lo cual dificulta aún más la tarea de logar un seguimiento eficaz. Por lo cual es necesario determinar una velocidad de seguimiento en relación con la variación angular del sol para diferentes momentos del día, así como el coeficiente de reducción para establecer proporciones entre variación del ángulo en el sistema y la velocidad en el eje del motor.

El sistema de trasmisión construido posee dos pasos de reducción compuestos por dos poleas, la primera acoplada directamente al eje del motor y la segunda en el eje de entrada del reductor. Procedemos a calcular el índice de reducción del sistema de

poleas, para una velocidad de salida W2=1rad/s, y una velocidad de entrada W1=30rad/s sustituyendo los valores en la ecuación (1.0) se obtiene:

$$i = \frac{1rpm}{30rpm}$$

$$i = 0.03$$

Esto significa que para obtener un ciclo completo a la salida el eje del motor debe rotar 30 veces. Ahora podemos aplicar esto a la velocidad de seguimiento la cual podemos determinar estimando una variación angular para un intervalo de tiempo determinado. Siendo un radián igual a 360º, si sustituimos 360º en la ecuación 1.0 podremos determinar con cada rad o ciclo que describe el eje del motor cuantos grados varía el eje de salida del reductor.

$$\frac{360º}{30rpm} = 12º$$

Este resultado puede traducirse en que cada vez que el motor gire un ciclo completo el eje de salida del reductor varía en 12º con lo cual se puede establecer una velocidad de seguimiento de 12º/h, teniendo en cuenta que la posición del sol varía aproximadamente 15º/h y que los motores de posicionamiento angular permiten realizar giros precisos menores a un ciclo se puede establecer una velocidad de seguimiento de 6º por intervalo de tiempo el cual puede establecerse cada media hora para realizar un seguimiento más preciso.

Fig18 Ensamblaje final del sistema de seguimiento de dos ejes.

2.4DISEÑO ELECTRÓNICO

El diseño electrónico de este sistema está basado en el algoritmo de seguimiento por punto luminoso. El circuito debe ser capaz de medir el desbalance de voltaje producido entre cuatro sensores LDR colocados sobre el panel solar y dispuestos en forma de divisor de tensión. De tal forma que pueda accionar dos motores de

posicionamiento angular los cuales mueven la estructura mecánica orientando los paneles directamente hacia el Sol corrigiendo el desbalance de voltaje.

Para esto se utiliza un micro controlador conectado a los sensores LDR el cual es el encargado de medir dichos valores y de controlar los motores para establecer un seguimiento total y preciso de la trayectoria solar.

Análisis de los requerimientos:

- Debe realizar mediciones utilizando sensores analógicos.
- Contar con una placa controladora.
- Comunicación con PC.
- Facilidad de ajuste mediante software.
- Capacidad para accionar dos motores de posicionamiento angular.
- Bajo consumo energético y costo de producción.

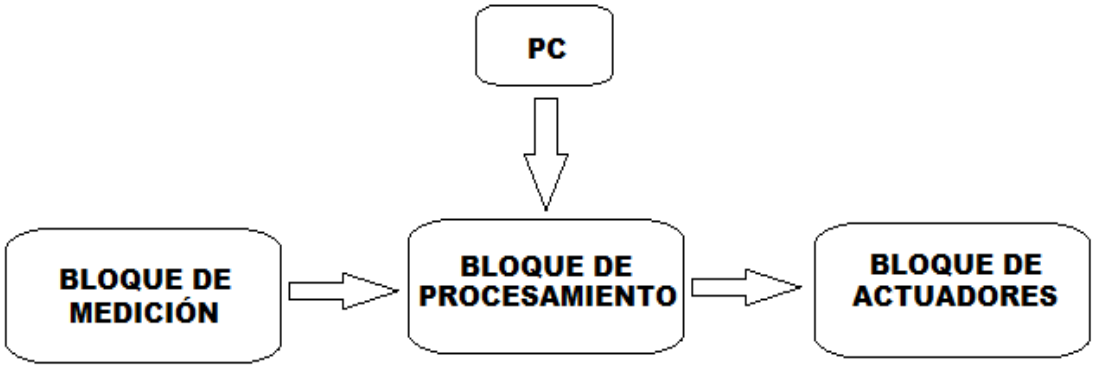


Fig19 Diagrama de bloques del diseño electrónico.

2.4.1Bloque de medición

El bloque de medición está compuesto por cuatro foto resistores (LDR) a modo de sensores y cada uno de estos está conectado a un potenciómetro formando un circuito divisor de tensión. Las señales obtenidas de cada divisor se conectan a cuatro entradas analógicas del micro controlador el que se encarga de medir y comparar los valores para establecer en cual existe mayor iluminación.

Sensores fotoeléctricos

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas. Las variables de instrumentación pueden ser, por ejemplo: temperatura, intensidad lumínica, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, pH, etc. Una magnitud eléctrica puede ser una resistencia eléctrica , una capacidad eléctrica (como en un sensor de humedad), una tensión eléctrica (como en un termopar o en sensor de efecto Hall), una corriente eléctrica (como en un fototransistor).[18]

Una fotorresistencia es un componente electrónico cuya resistencia disminuye con el aumento de intensidad de luz incidente. El valor de resistencia eléctrica de un LDR es bajo cuando hay luz incidiendo en él (puede descender hasta 50 ohm) y muy alto cuando está a oscuras (varios megohmios).

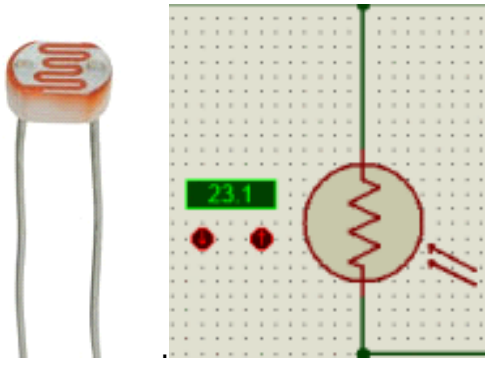


Fig20 Apariencia real e Imagen del ícono en ISIS de un LDR.

Las características eléctricas de estos dispositivos no son fáciles de conseguir dado su simple funcionamiento y gran variedad de fabricantes, los LDR, o fotorresistencias, se adquieren comercialmente en tamaños diversos, esto implica que el rango de resistencia cambie en función del tamaño, un LDR de tamaño grande, tiene rangos de cambio menor que un LDR pequeña. Incluso los cambios de resistencia no son exactamente iguales en dos del mismo tamaño. Estas razones hacen que la forma de mayor simplicidad para su uso sea la lectura de su resistencia, o el voltaje que se desempeña en sus terminales.

Para utilizar un LDR, la forma más simple es realizar un divisor de voltaje con una resistencia fija [19], para entender este concepto se puede observar el arreglo o circuito mostrado en la figura: (Ver fig 21).

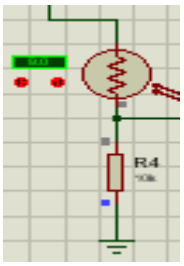


Fig21 LDR y resistor conectados como divisor de tensión

Para determinar el valor de salida de un divisor de tensión y mediante la teoría de circuitos empleada podemos utilizar la siguiente ecuación:

$$Vent = \frac{LDR(Vsal)}{LDR+R} \quad \textbf{(4.0)}$$

Despejando de la ecuación el valor del voltaje de salida se obtiene:

$$Vsal = \frac{R}{R+LDR} Vent \quad \textbf{(4.1)}$$

Sustituyendo las variables con los valores de resistencia y voltaje de alimentación siendo Vent=5V, LDR=200k (En total oscuridad), R=1kohms se obtiene:

$$Vsal = \frac{1000}{1000+200000} 5V \quad \textbf{(4.2)}$$

$$Vsal = 0.0248V$$

Para la instalación del bloque de medición se construyó un sólo módulo para contener los cuatro foto resistores y así garantizar una mayor fiabilidad de la medición. A diferencia de otros modelos que suelen emplear dos, uno para cada eje o cuatro dispuestos a los lados del panel, se construyó de la siguiente forma:

(Ver figura22).

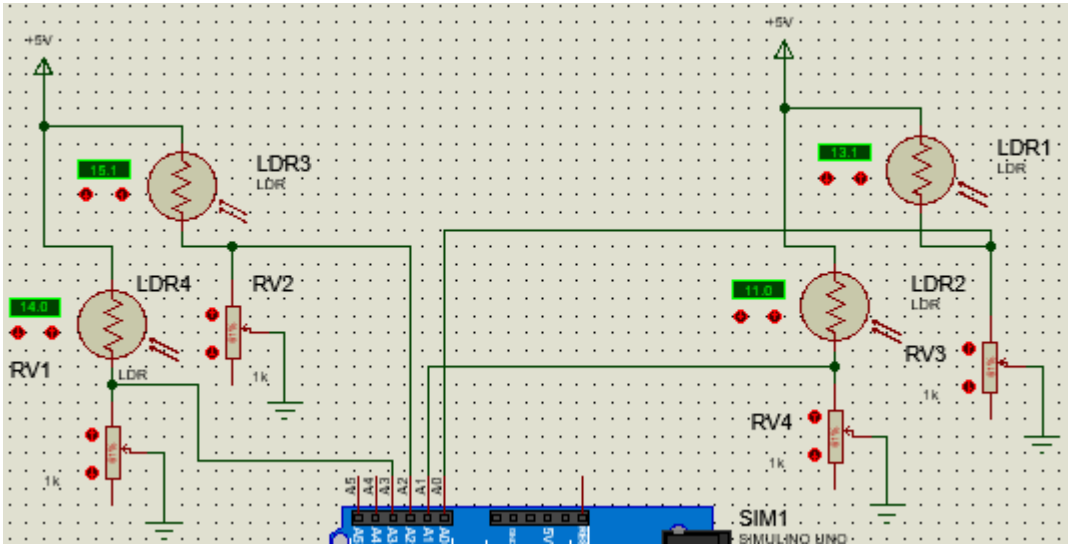


Fig22 Diagrama del Módulo vista del simulador ISIS de Proteus.

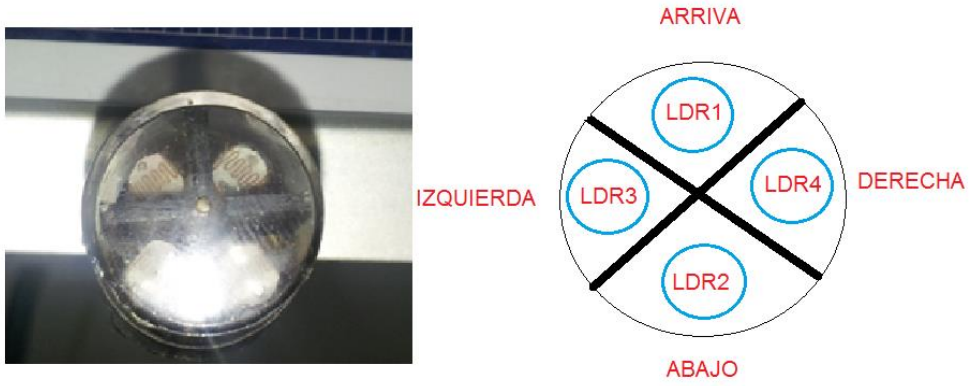


Fig23 Encapsulamiento de los foto resistores.

2.5Bloque de procesamiento

El bloque de procesamiento está constituido por una placa micro controladora Arduino UNO basado en Atmega 328, el cual es el encargado de realizar el control sobre el sistema. Este debe procesar las señales que suministran los foto resistores y manipular los actuadores para accionar los motores de pasos que harán rotar los ejes del seguidor.

2.5.1Placa controladora Arduino UNO

El Arduino UNO es una placa micro controladora basado en el ATmega 328.Consta con 14 pines de salidas/entradas digitales dentro de los cuales hay 6 que pueden utilizarse como salidas pwm (modulación por ancho de pulsos). Además, posee 6 entradas analógicas, conexión USB, Jack de alimentación a 5V y comunicación por puerto serie utilizando los pines digitales 0 y 1.

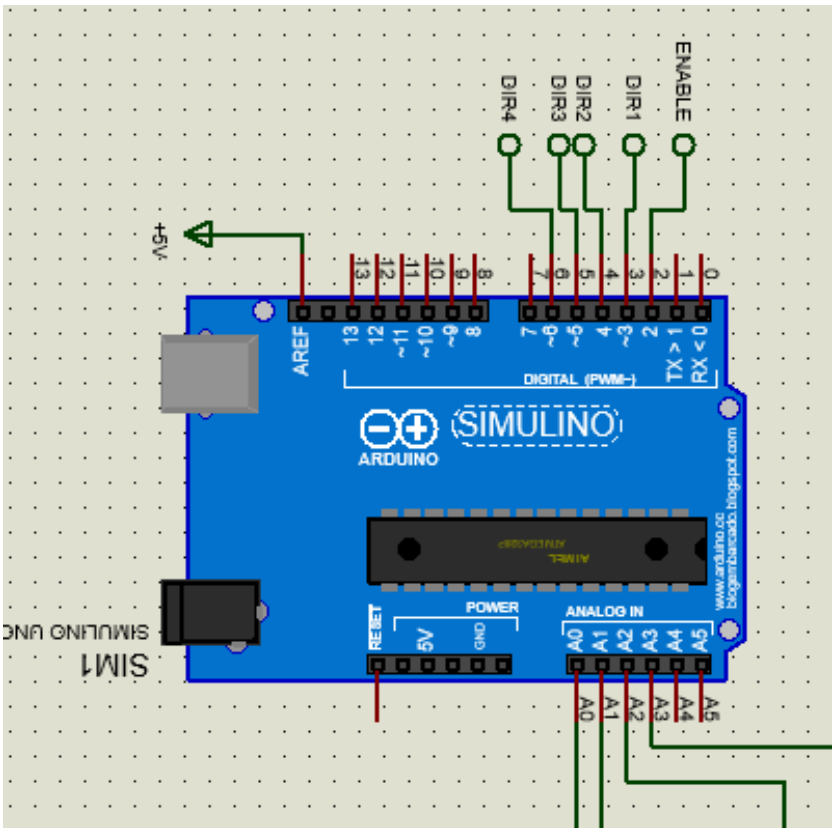


Fig24 Vista del simulador ISIS en Proteus de la placa controladora Arduino UNO

Características del Micro- controlador ATmega328

El ATmega328 tiene 32 KB (con 0.5 KB utilizado para el gestor de arranque). También tiene 2 KB de SRAM y 1KB de EEPROM (que se puede leer y escribir con la biblioteca EEPROM).

Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (recomendado).	7-9V
Límites de voltaje de entrada.	6-20V
Pines digitales E/S	14 (6 provistos de salida PWM)
Pines de entrada analógica.	6
Corriente DC por E/S.	40 mA
Corriente DC del pin a 3.3V	50 mA
Memoria flash	32 KB (ATmega328)
Memoria utilizada por el bootloader	0.5 KB
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM.	1 KB (ATmega328)
Velocidad de reloj	16 MHz

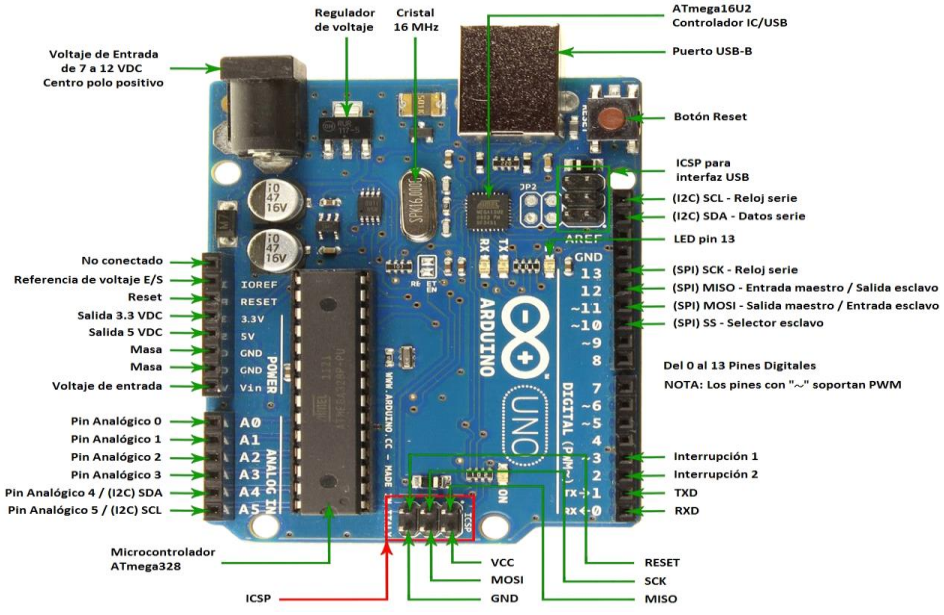


Fig25 Apariencia real de la placa controladora Arduino UNO

Entradas y salidas

Cada uno de los 14 pines digitales del Uno se puede usar como entrada o salida, usando pinMode (), funciones digitalWrite () y digitalRead (). Operan a 5 voltios. Cada pin puede proporcionar o recibir un máximo de 40 mA y tiene una resistencia interna de pull-up (desconectada por defecto) de 20-50 kOhms.

Además, algunos pines tienen funciones especializadas:

• Serie: 0 (RX) y 1 (TX). Se usa para recibir (RX) y transmitir (TX) datos en serie TTL. Estos pines se conectan a los pines correspondientes del chip ATmega8U2 USB-to-TTL Serial.

• Interrupciones externas: 2 y 3. Estos conectores pueden configurarse para activar una interrupción en un nivel bajo.

• PWM: 3, 5, 6, 9, 10 y 11. Proporcionan salida PWM de 8 bits con la función analogWrite ().

• SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). Estos pines soportan comunicación SPI usando la biblioteca SPI.

• LED: 13. Hay un LED incorporado conectado al pin 13 digital. Cuando el pin tiene un valor ALTO, el

El LED está encendido, cuando el pin está BAJO, está apagado.

Entradas analógicas.

El Uno tiene 6 entradas analógicas, etiquetadas de A0 a A5, cada una de las cuales proporciona 10 bits de resolución (es decir, 1024 valores diferentes). Por defecto, miden desde tierra a 5 voltios, aunque es posible cambiar el extremo superior de su rango usando el pin AREF y la función analogReference (). Adicionalmente, algunos pines tienen una funcionalidad especializada:

• I 2 C: 4 (SDA) y 5 (SCL). Admite la comunicación I 2 C (TWI) utilizando la biblioteca Wire.

Hay un par de otros pines en el tablero:

• AREF. Voltaje de referencia para las entradas analógicas. Usado con analogReference ().

• Reiniciar. Normalmente se usa para agregar un botón de reinicio.

Comunicación

El Arduino Uno tiene varias facilidades para comunicarse con una computadora, otro Arduino, u otros micro controladores. El ATmega328 proporciona comunicación serial UART TTL (5V), que está disponible en los pines digitales 0 (RX) y 1 (TX). Un ATmega8U2 en el tablero canaliza esta serie a través de USB y aparece como un puerto virtual para el software en la computadora. El software Arduino incluye un monitor serial que permite visualizar datos textuales para enviar desde y hacia la placa Arduino. Los LED RX y TX de la placa parpadearán cuando los datos se transmiten a través del chip de USB a serie y la conexión USB a la computadora (pero no para comunicación serial en los pines 0 y 1). Una biblioteca de SoftwareSerial permite la comunicación serial en cualquiera de los pines digitales de Uno. El ATmega328 también es compatible con comunicación I2C (TWI) y SPI. El software Arduino incluye una biblioteca de cables para simplificar el uso del bus I2C.

Programación

El compilador Arduino es un software de código abierto diseñado para escribir, compilar y subir programas o códigos a una placa controladora Arduino. El lenguaje de programación utilizado es C++, además ofrece unas librerías o core que facilitan la programación de los pines de entrada y salida y de los puertos de comunicación, así como otras librerías para operaciones específicas. El propio IDE ya incluye estas librerías de forma automática y no es necesario declararlas expresamente.

Entorno de Desarrollo de Software

El entorno de desarrollo integrado (IDE) se puede bajar desde la página de Arduino y en la Figura 26 se puede distingue las partes que lo constituyen. El área de edición de código es donde se escribirá el código del software que se requiere. Es sencillo visualmente y tiene ciertas características que usted debe descubrir mediante su uso.

Normalmente, en la jerga de Arduino, aquí se crea el “sketch” (código fuente). Una sección importante es el área de mensajes, en donde el compilador le informa posibles errores en el código. Además, en esta área, la placa Arduino puede enviar información acerca de su estado, según como sea programado.

Conexión de la placa al computador Cada kit Sparkfun dispone de un cable USB para poder conectar la placa a un computador, tal como se muestra en la Fig26.

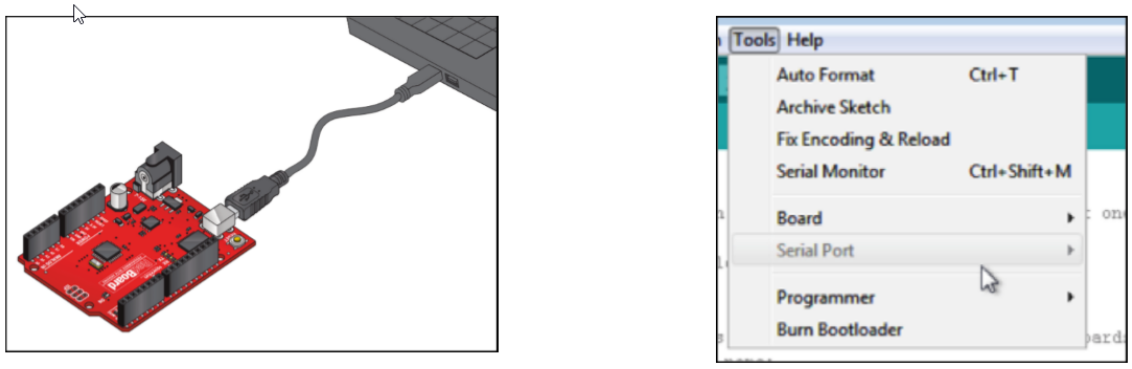


Fig26 Conexión de la placa Arduino con una PC.[20]

2.6MOTORES DE POSICIONAMIENTO ANGULAR O MOTORES PASO A PASO (PAP)

Un motor de posicionamiento angular o paso a paso es una máquina eléctrica rotatoria compuesta por cuatro o más polos los cuales se pueden alimentar de forma independiente para esto se utiliza un circuito como driver. Esto permite controlar de acuerdo a la necesidad la velocidad, el sentido del giro y el torque.

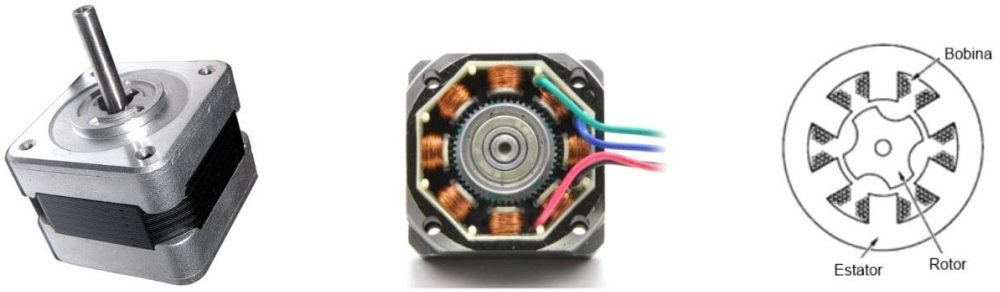


Fig27 Apariencia de un motor de posicionamiento angular.

Motor Unipolar de 6 Hilos

Los motores unipolares tienen cuatro bobinas y se llaman así porque en cada bobina la corriente siempre circula en la misma dirección. Esto es una de las ventajas de los unipolares sobre los bipolares. Al no necesitar invertir la dirección de corriente, son más fáciles de manejar y más baratos de fabricar los drivers.

En el caso de los motores unipolares la mayor parte de las veces el accionamiento se realiza utilizando un driver como es el ULN 2003. Aunque también se pueden utilizar mosfets o transistores de manera lineal.

Paso	Terminales			
	A	B	C	D
1	+V	-V	+V	-V
2	+V	-V	-V	+V
3	-V	+V	-V	+V
4	-V	+V	+V	-V

Fig28 Secuencia de pasos utilizada para manejar un motor unipolar de seis hilos.

El motor de pasos bipolar

El motor pap bipolar está formado por dos bobinas y a diferencia del unipolar, requiere de invertir el sentido de la corriente para hacerlo girar en un sentido u otro. Esto hace que sea más complejo y costoso el circuito de accionamiento, pero este motor tiene la particularidad de suministrar más torque a la vez que se puede controlar muy bien la velocidad y el ángulo en la rotación de su eje. El circuito de accionamiento suele construirse conectando cada bobina a un puente H el cual puede estar diseñado a partir de transistores o mosfets, aunque es mucho más cómodo utilizar un driver determinado para esta finalidad como puede ser L298 o Pmod HB3. (ver figura)

Paso	A+	A-	B+	B-
1	+V	-V	+V	-V
2	+V	-V	-V	+V
3	-V	+V	-V	+V
4	-V	+V	+V	-V

Fig29 Secuencia utilizada para manejar un motor bipolar.

2.7BLOQUE DE ACTUADORES

El bloque de actuadores tiene como finalidad suministrar la energía necesaria para mover los dos motores utilizados en el prototipo. Este está conectado a ocho salidas del micro-controlador, cuatro para activar cada circuito de fuerza. El mismo está formado por cuatro módulos de puente H, Pmod HB3 conectados a los motores de posicionamiento angular.

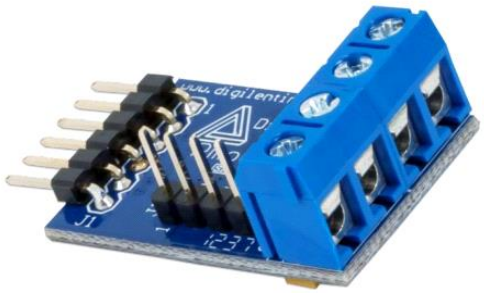


Fig30 Apariencia real del Pmod HB3[21].

El PmodHB3 utiliza un circuito de puente en H completo para permitir a los usuarios conducir motores de CC desde la placa del sistema**.** Para cambiar el sentido de la corriente hay que tener en cuenta que el pin Enable se encuentre en alto, para invertir el giro solo basta con cambiar el estado del pin de dirección de alto a bajo. Este componente está diseñado para operar a 12V y un máximo de 2A, por lo cual ay que tener en cuenta que el consumo de los motores no exceda este valor para evitar averías.

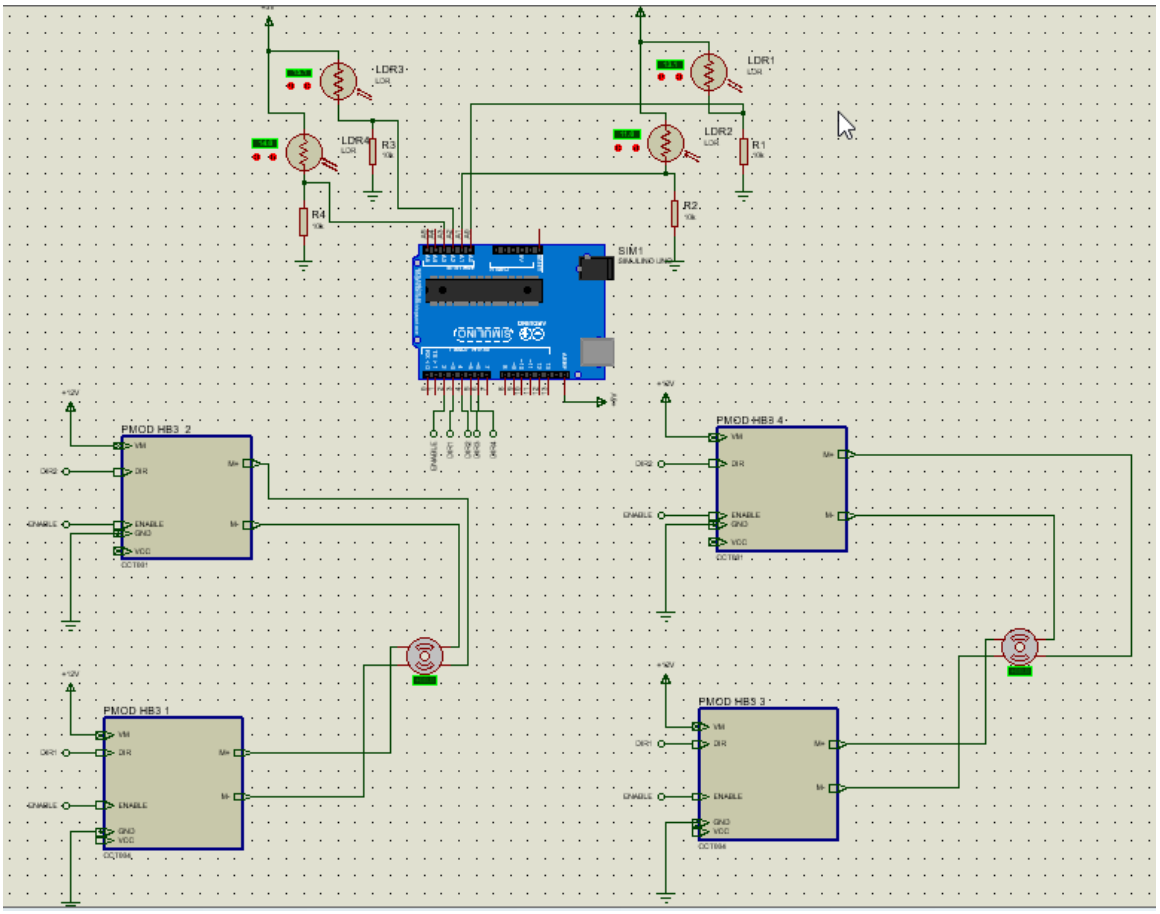


Fig31 Vista del circuito en el simulador ISIS.

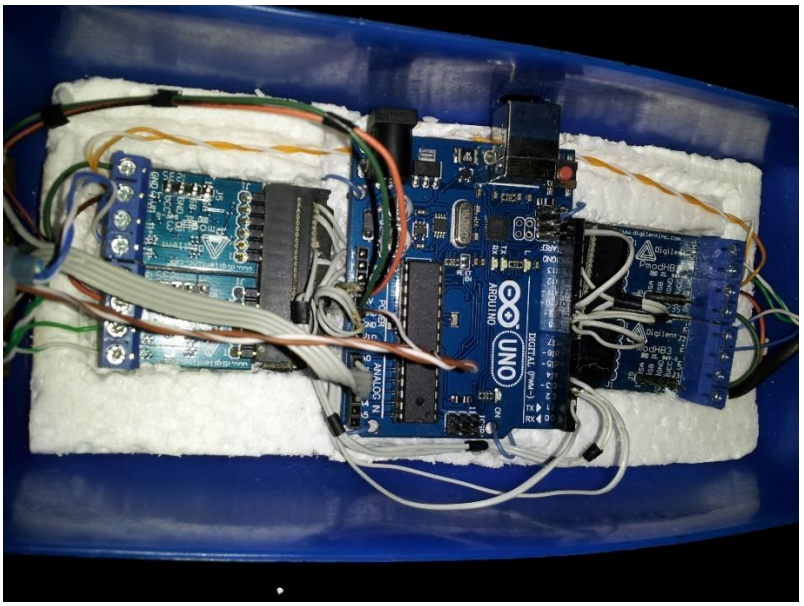


Fig32 Montaje real del circuito del seguidor solar.

2.8ALGORITMO DE DESARROLLO DEL PROGRAMA

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa electrónica que tiene un microcontrolador, está diseñada para ser utilizada en proyectos multidisciplinares. Su programación se basa en el lenguaje C/C++. La estructura de programación está formada por tres bloques y se ejecuta de la siguiente manera. (ver fig34)

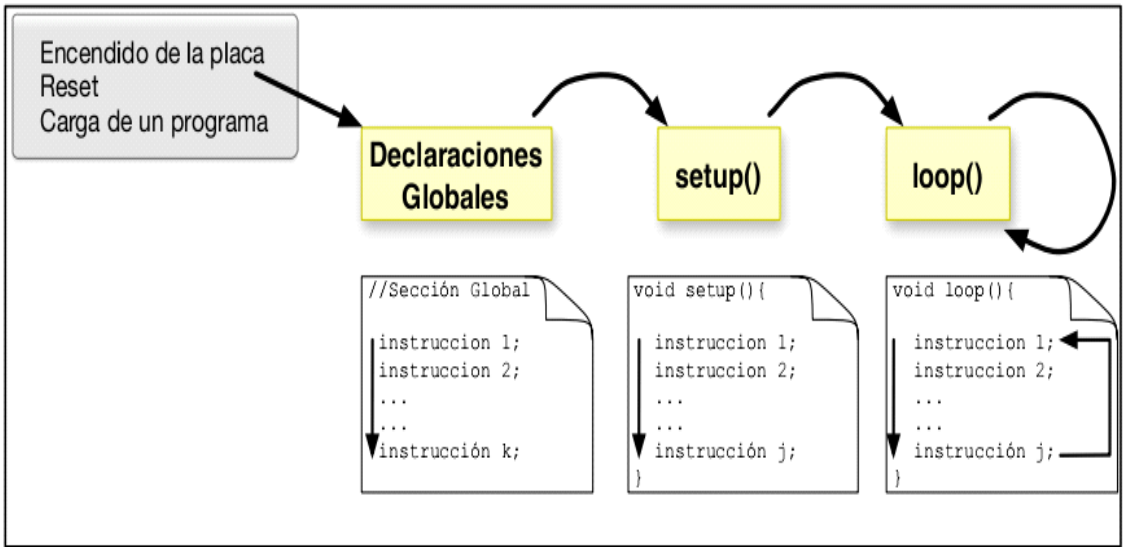


Fig33 Estructura de programación de Arduino.

En el bloque de declaraciones globales se escriben las librerías que se vayan a utilizar, se declaran las variables globales y se les signan valores a estas para simplificar el trabajo. Este bloque solo se ejecuta una vez y bajo cualquiera de los siguientes eventos.

1 Encendido de la placa.

2 Después de un reset.

3 Después de cargar un programa desde la PC.

El segundo bloque comienza con la función *setup ()*, se ejecuta después de la sección anterior y por una sola vez. Se utiliza para configurar el hardware que se

utilizará, es donde se determina que pines serán utilizados y como se comportarán, como entrada o salida.

La función *loop ()*, por otro lado, se ejecuta después de la función anterior, de forma "perpetua", a una tasa de repetición muy cercana a la velocidad de trabajo de la placa, dependiendo de la cantidad de instrucciones que tenga.

La estructura del código está diseñada para que el seguidor pueda operar de forma automática durante periodos de tiempo indefinido basándose en el método de seguimiento por punto luminoso y está dividida en tres etapas o sub rutinas. La primera está encargada de llamar a las otras subrutinas, es donde se encuentran declaradas y asignadas las variables globales. La subrutina de configuración como su nombre lo indica configura el hardware de la placa para determinar los pines que se utilizaran y su comportamiento como entrada o salida.

La subrutina de orientación se encarga de determinar en qué dirección se encuentra el punto más luminoso del cielo, almacenando los valores obtenidos de los sensores y comparándolos. Para ejecutar la parte del código encargada del movimiento de los motores para posicionar el panel directamente hacia los rayos solares. Para el diseño del algoritmo a utilizar se construyó el siguiente diagrama de bloques.

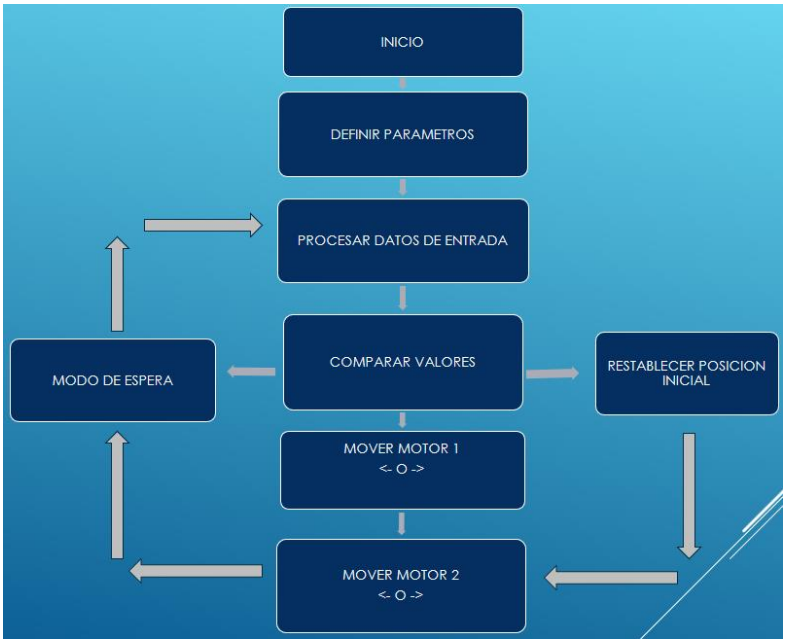


Fig34 Diagrama de bloques del programa.

2.8.1DESCRIPCIÓN DEL CÓDIGO

En el inicio el micro controlador ejecuta las rutinas necesarias para su arranque. Luego se definen los parámetros donde encontramos los recursos de hardware y de qué forma se utilizarán. Se definen dos tipos de variables. Las primeras corresponden a los valores de entrada analógica suministrados por los cuatro sensores, dos para la elevación y dos para el azimut los que serán valores de iluminación. A las segundas se le asignan valores relacionados con los tiempos de espera y la velocidad de los motores, de esta forma si se quiere variar alguno de estos parámetros solo hay que cambiar el valor de una variable una sola vez y cambia a lo largo del código. Los valores de iluminación son comparados, en caso de ser iguales el sistema se pone en modo de espera por un tiempo previamente definido y de acuerdo con el comportamiento de los ángulos de posicionamiento del sol. Si el valor 1 es mayor o menor que el valor2 el sistema ordena mover el motor hacia arriba en sentido (anti horario) o hacia abajo (en sentido horario), y vuelve a comparar tantas veces sea necesario hasta que los valores sean iguales. De la misma forma el comportamiento es similar para los valores 3 y 4 correspondientes al ángulo azimut. Teóricamente cuando los valores sean iguales el panel estará orientado directamente en el punto de máxima radiación solar. Para el restablecimiento de la posición inicial se definieron valores específicos para los cuales se determina que el día ha terminado y que debe ponerse en la posición inicial hasta que salga el sol. Este movimiento se logra ejecutando la sección de código que controla el motor 1 una determinada cantidad de veces, en relación con el coeficiente de reducción, de tal forma que con cierta cantidad de giros pueda cubrir los 180° o 150° para ubicarse en el punto inicial del recorrido.

2.9CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

La selección de un diseño y la construcción de este dispositivo requirió de mucho empeño sobre todo para conseguir y adaptar los materiales mecánicos los cuales en sumayoria han sido reciclados de piezas de automóvil. Se hizo necesario utilizar soldaduras por arco eléctrico, cortes con discos abrasivos y por oxicorte. También se hicieron trabajos de torneado y perforación de agujeros los cuales se llevaron a cabo en un taller mecánico con herramientas propias.

Los materiales electrónicos como la placa controladora Arduino UNO, los módulos de puente H Pmod HB3 y las herramientas para el montaje electrónico fueron suministradas por el departamento de eléctrica y se realizó en el laboratorio de Micro controladores donde se cuenta con condiciones necesarias para el desarrollo de proyectos como este.

CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y VALORACIÓN ECONÓMICA

3.1Introducción

La valoraciónón económica de un proyecto permite realizar un análisis de los costes de los materiales empleados para su construcción, en aras de evaluar la posibilidad y viabilidad de inversiones para generalización o producción en serie. Esa es la razón por la que resulta tan importante y más si se quiere disminuir los costes o incrementar la calidad de los materiales. Este capítulo aborda este tema tomando como referencia precios de productos similares en el mercado mundial. También se analiza el impacto social de este proyecto enfocado hacia los estudiantes y profesores de la carrera desde el punto de vista del aprobechamiento del prototipo en practicas de laboratorio, clases demostrativas y proyectos de investigación. Para un análisis de los resultados obtenidos se llevaron a cabo pruebas para determinar el funcionamiento óptimo del seguidor en ambiente de laboratorio y en el terreno, las cuales se presentan a continuación.

3.2Pruebas

Se hace necesario comprobar si el sistema electrónico responde correctamente a los cambios de iluminación, para lo cual en el laboratorio se utilizó una lámpara para variar los valores de la posición de la luz observando si se invierte el sentido de giro de los motores en la dirección correcta. Para ellos realizó el montaje del circuito de la siguiente manera. (Ver figura36).

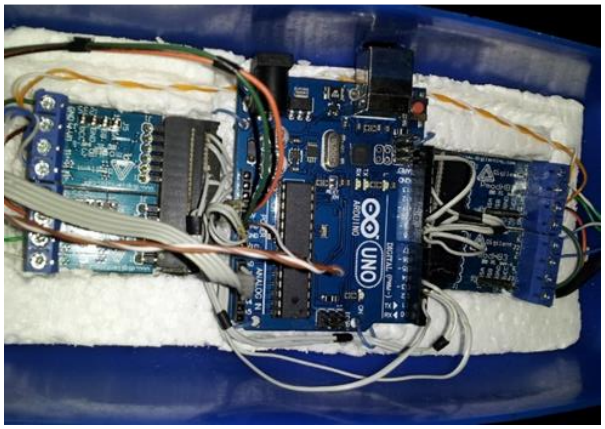


Fig35 Vista del montaje del circuito.

La alimentación se suministró mediante una fuente de voltaje controlado disponible en el laboratorio, conectando el Arduino uno a una tensión de 5V y el bloque de actuadores que alimenta los motores a 12V.(Ver figura 37).

Fig 36 Fuente de Alimentación utilizada.

Para lograr una mayor precisión en el movimiento se realizó un ajuste de voltaje en el bloque de sensores mediante los potenciómetros, para lo cual se utilizó un multímetro para medir los valores de tensión permitiendo establecer un punto de equilibrio.

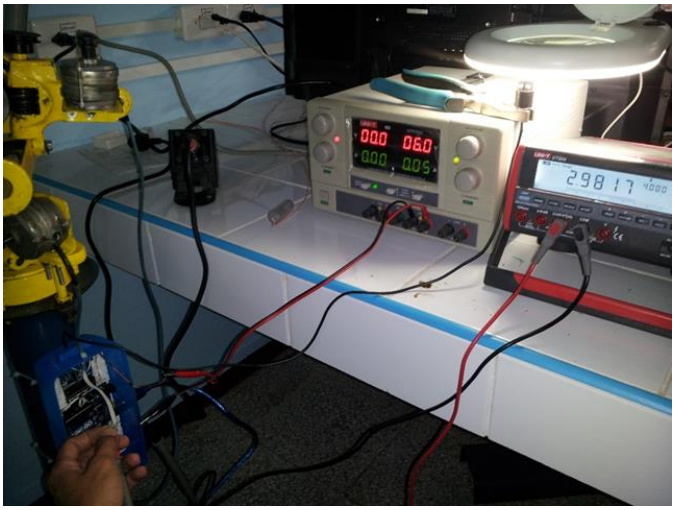


Fig37 Ajuste de los sensores.

Se pudo comprobar que para todos los casos el sistema electrónico actúa correctamente invirtiendo el sentido de giro de los motores en correspondencia con la posición de la lámpara y realizando paradas cuando esta se encuentra perpendicular al sensor.

Después de las pruebas de laboratorio se dio paso a probar el seguidor en el terreno, instalando el panel solar sobre la base y ubicando el seguidor en áreas exteriores. La primera se hizo el día 10/6/2018 con el panel acoplado al seguidor. El cielo estaba nublado por lo que el sistema comenzó a seguir los puntos de máxima radiación en el cielo independientemente de la posición del sol. Con una velocidad de se guimiento de 6°/min y un tiempo de muestreo de 5 min se pudo observar que el comportamiento del prototipo antes este tipo de condición climatología es bueno y que se puede ajustar para garantizar su eficacia.Como observaciones se tiene que debido a dificultades mecánicas el seguidor no puede mover el eje horizontal, imposibilitando variar el ángulo de elevación. Por lo cual se pasó a observar el desarrollo del seguimineto solo en azimut. Ver figura 39.

Fig38 Seguidor emplazado en el terreno.

La segunda sesión de prueba se desarrollo el 11/6/2018 con clima soleado. Para llevar a cabo un análisis de los resultados se utilizó una carta solar y diagrama cartesiano obtenidos con la herramienta online SunEarthTools.com para comprobar el azimut y el ángulo de inclinación se utilizó una brújula tomando datos cada una hora.

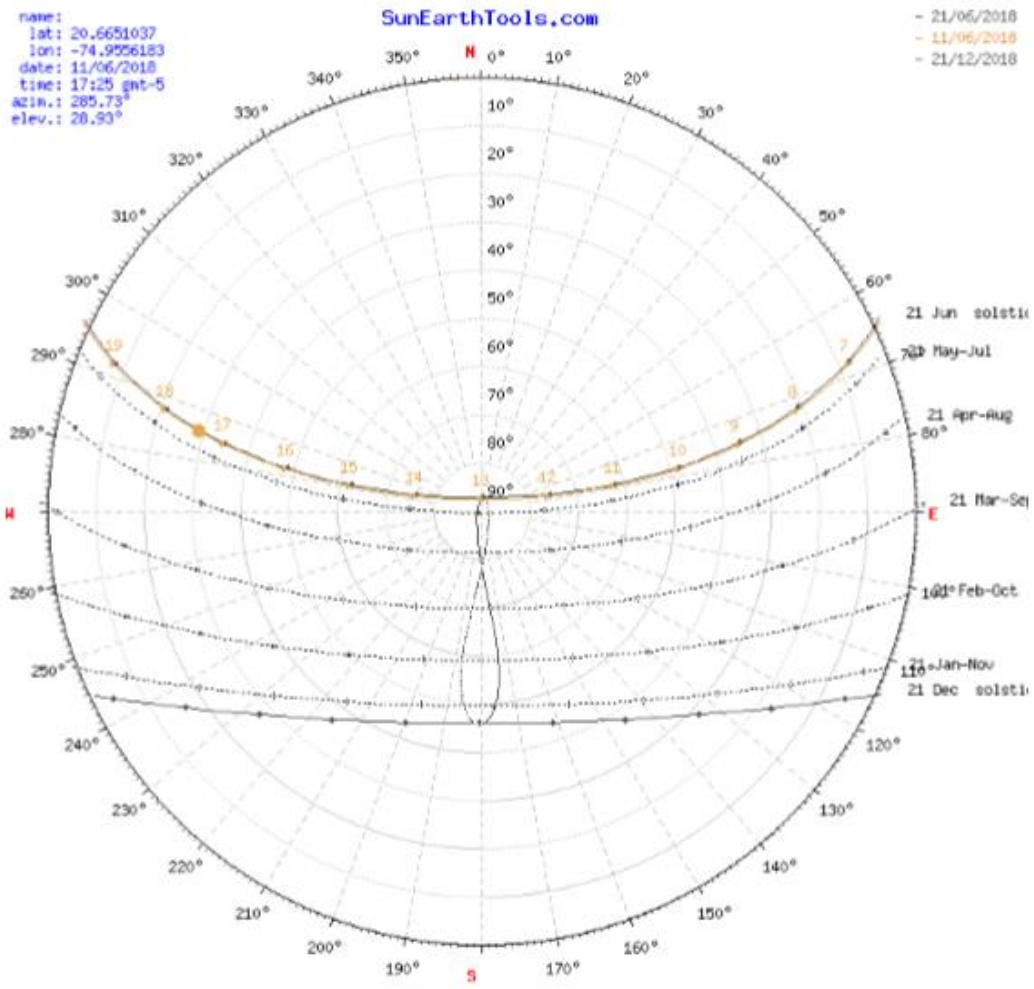


Fig39 Carta solar para el día 11 de junio de 2018 y la ubicación geografica del seguidor del seguidor solar.

También se obtuvieron los ángulos de posicionamiento del sol para distintos instantes de tiempo y se compararon con los valores recogidos en las mediciones los cuales se tomaron utilizando una aplicación Android instalada en un teléfono inteligente. Ver figura 41. Esta prueba se realizó entre las 11:00 y las 16:00horas.

Estos datos se analizaron de forma comparativa para evaluar el funcionamiento del seguidor. Ver figura 42.

Fig40 Aplicación Android Compass.

Tabla de valores de elevación.

Fecha Coordenadas	11/6/2018 20.6651037, -74.9556183	
Ubicación:	Moa, Cuba	
Hora	Elevación Estimada	Elevación Real
11:00:00	62.21	60.05
12:00:00	75.98	72.02
13:00:00	87.55	83.81
14:00:00	75.77	73.23
15:00:00	62	61.04
16:00:00	48.24	48.19

En la tabla de valores de elevación se puede apreciar coma va cambiando la variable con respecto al tiempo y se puede notar que existen diferencias entre los valores estimados y lo obtenidos, esto se

debe fundamentalmente a la acción del viento y la tolerancia de movimiento en los mecanismos. Para visualizar la precisión de seguimiento de elevación se elaboró la siguiente grafía.

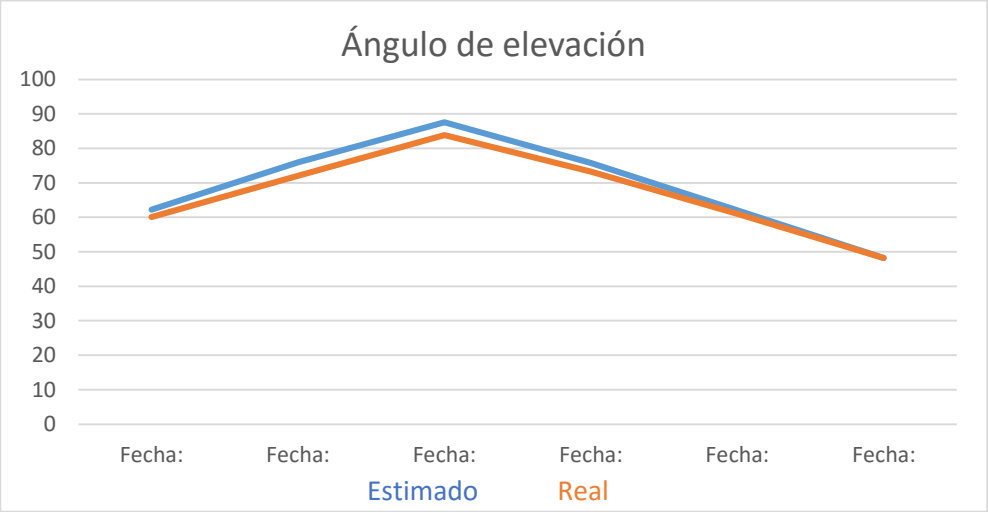


Fig41 Gráfica de comportamiento de la elevación.

Se puede observar como el movimiento es más preciso hacia las ultimas horas esto se debe a que el seguidor se encontraba en una posición favorable para realizar el movimiento y también devidoma que el viento había disminuido.

Tabla de valores de azimut.

Fecha Coordenadas	11/6/2018 20.6651037, 74.9556183	
Hora	Azimut Estimado	Azimut Real
11:00:00	79.4	77.8
12:00:00	77.22	77.64
13:00:00	357.55	355.26
14:00:00	282.69	296.45
15:00:00	280.63	282.56
16:00:00	281.99	279.81

En la tabla de valores de azimut se encuentran recogidos los valores estimados y medidos. Se puede notar la perturbación provocada por el viento sobre la estructura y la precisión de seguimiento.

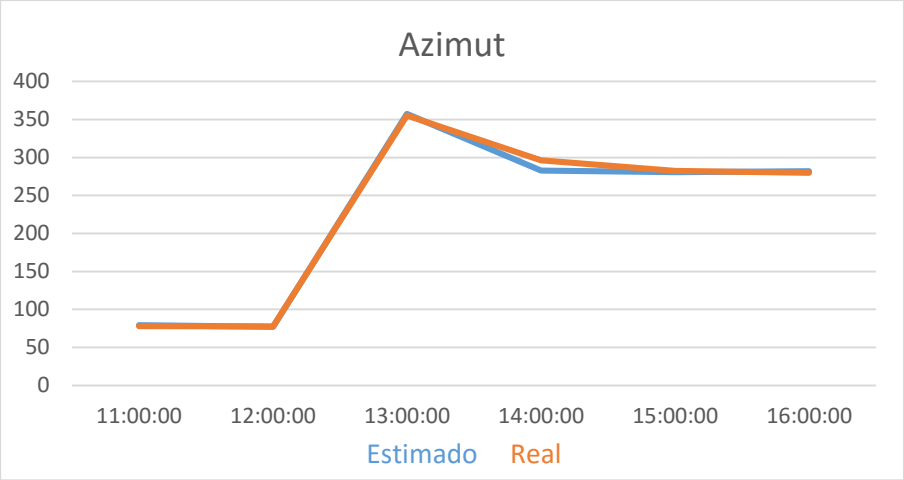


Fig42 Gráfica de comportamiento del azimut.

3.3IMPACTO SOCIAL

El prototipo de seguidor solar construido será donado a departamento de eléctrica del instituto, con el fin de utilizarlo como medio de enseñanza y se plantea organizar dos practicas de laboratorio. La primera se encuentra orientada a la asignatura de micro controladores donde los estudiantes deberán adquirir habilidades y profundizar en los siguientes temas:

1. Programación en C++ de Arduino.
2. Utilización de sensores fotoeléctricos.
3. Manejo de motores de posicionamiento angular.
4. Accionamiento de motores utilizando puentes Half.

La segunda practica que también puede ser una clase demostrativa se enfoca en añadir al plan de la asignatura optativa de Energía solar el tema de seguimiento solar, debido a que el uso de seguidores solares se encuentra ampliamente difundido alo largo del planeta y se supone que en algún momento esta tecnología alcance

nuestro país. Además el tema se presenta como una oportunidad para demostrar el comportamiento de la trayectoria del sol y los factores que intervienen en ello.

Para el desarrollo de esta clase los estudiantes deberán auxiliares de la carta solar cilíndrica e instrumentos que permitan medir la elevación y el azimut, con lo cual se estimula el aprendizaje del alumno y el interés por la energía renobable.

Este dispositivo queda a disposición de estudiantes y profesores que deseen utilizarlo para el desarrollo de proyectos de investigación que requieran el uso de un seguidor solar o de una base con la capacidad de variar los ángulos de posicionamiento solar de una manera mas manejable.

3.4VALORACIÓN ECONÓMICA

Todo proyecto de investigación debe contar con una valoración económica que permita analizar los costos de los materiales empleados y la posibilidad de reproducirlo. En el caso de este prototipo la parte mecánica se construyó a partir de materiales reciclados que se encontraban en desuso. Algunos formaban partes de un automóvil como los rodamientos y los reductores de engranaje por lo que se hace difícil determinar el coste real de estos.

Tabla de costos de los componentes empleados.

Componentes	Cantidad u	Coste CUC/u	Coste total CUC
Arduino Uno	1	14	14
Módulo Pmod HB3	4	2.4	9.6
Fotoresistores	4	0.25	1
Potenciómetros	4	0.45	1.8
Motores PAP	2	5	10
Módulo Motorreductor	2	5.6	11.2
			47.6 CUC

Como se puede observar en la tabla el coste total de la implementación es de 47.6CUC lo que equivale a 1190 pesos en MN.

3.5CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Se analizaron los resultados obtenidos mediante pruebas de laboratorio y en el terreno en la que se demostró las capacidades del seguidor de posicionarse en el punto de máxima radiación para distintos instantes de tiempo y bajo distintas condiciones climatológicas permitiendo analizar el comportamiento de este ante radiación difusa.

Se demostró la capacidad de crear a partir del reciclaje de materiales desechados dándoles una nueva utilidad, contribuyendo a la economía del país y al cuidado del medio ambiente.

Se demostraron las capacidades de los microcontroladores para la supervisión de procesos relacionados con la generación de energía a partir de fuentes renovables.

Se elaboraron recomendaciones para la utilización del prototipo de seguidor solar para fines docentes y educativos.

CONCLUSIONES GENERALES

Las fuentes bibliográficas consultadas sirvieron de base teórica para la selección de un diseño y la ejecución de este proyecto. Permitiendo analizar las tendencias en el uso de seguidores solares y la creciente demanda de los mismos a nivel internacional.

La simulación en Proteus permitió diseñar y probar el circuito electrónico sin dañar ningún componente real para así contribuir al cuidado de los medios de laboratorio. Además, se seleccionó un diseño acorde con los requerimientos necesarios, dejando ver las aplicaciones que pueden tener los micro controladores en la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables.

La programación con el Compilador Arduino en C++ permitió cubrir las necesidades de autonomía, control y precisión requeridas por el algoritmo. Permitiendo además ajustar el comportamiento de las distintas partes para un mejor aprovechamiento de la radiación solar.

RECOMENDACIONES

- Profundizar en el diseño mecánico del prototipo con el fin de realizar mejoras en su funcionamiento para incrementar su precisión.
- Realizar una aplicación la cual permita censar y supervisar de forma remota variables referentes al seguidor y a la superficie de captación instalada.
- Proponer un diseño con la posibilidad de ejecutarse a gran escala en un parque fotovoltaico.

BIBLIOGRAFÍA

[1] D. C. Martins, "Usage of de solar energy from photovoltaic panels for the generation of electrical energy," presented at the Telecommunications Energy Conference, 1999.

[2] HavanaTimes. *OPEP financiará un proyecto de energía solar en Cuba*. Available: https://www.havanatimes.org/sp/?p=130793

[3] Energizar.org. *Seguidor solar*. Available: http://www.energizar.org.ar/energizar_desarrollo_tecnologico_seguidor_solar_que_es.html

[4] M. V. G. Gamez, "Diseño de un sistema de seguimiento solar de un eje para el aprovechaminto de la energía solar en sistemas fotovoltaicos.," 2013.

[5] J. M. Laborit, "Diseño de un seguidor solar con fines académicos," 2017.

[6] Mejía, "Diseño eimplementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema fotovoltaico.," Universidad tecnológica de Pereira 2010.

[7] Castañeda, "Diseño de un seguidor solar para eficientar la captación de la energía solar en los paneles fotovoltaicos. ," Instituto Tecnológico Superior de Arandas, 2010.

[8] siitiosolar.com. (2013). Available: http://www.sitiosolar.com/los-paneles-solares-fotovoltaicos/

[9] J. S. Fuentevilla, "Diseño y contrucción de un sistema de seguimiento fotovoltáico," Universidad tecnológica de Mixteca, 2012.

[10] ingelibreblog, "Teoría de mecanismos. Grados de libertad," 2014.

[11] Photopills.com. *Entendiendo el azimut y la elevación*. Available: www.photopills.com/es/articulos/entendiendo-el-azimut-la-elevacion

[12] ocw.upm.es. CARTA-SOLAR. Available: ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada.../CARTA-SOLAR.pdf

[13] pveducation.org. *declination angle*. Available: https://www.pveducation.org/equations/declination-angle

[14] valldoreix-gp.com. (2015). *Las ventajas de los seguidores solares*. Available: http://www.valldoreix-gp.com/las-ventajas-de-los-seguidores-solares/

[15] Slidesharecdn.com. *Tipos de seguidores solares según su algoritmo de seguimiento*. Available: https://image.slidesharecdn.com/seguidoressolares-150617181342-lva1-app6892/95/seguidores-solares-17-638.jpg?cb=1434564842

[16] Worpres.com. (2015). *Microcontroladores*. Available: https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2015/03/23/microcontroladores/

[17] Degeriberica. (2013). *Seguidores solares*. Available: https://www.grupojab.es/deger/

[18] D. E. L. Gómez, "Diseño e implementación de un sistema de medición de temperatura con fines docentes. Ingeniero Eléctrico, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”.", 2016.

[19] J. R. C. Mendoza, "Diseño y simulación de Sistemas microcontrolados en lenguaje C," 2011.

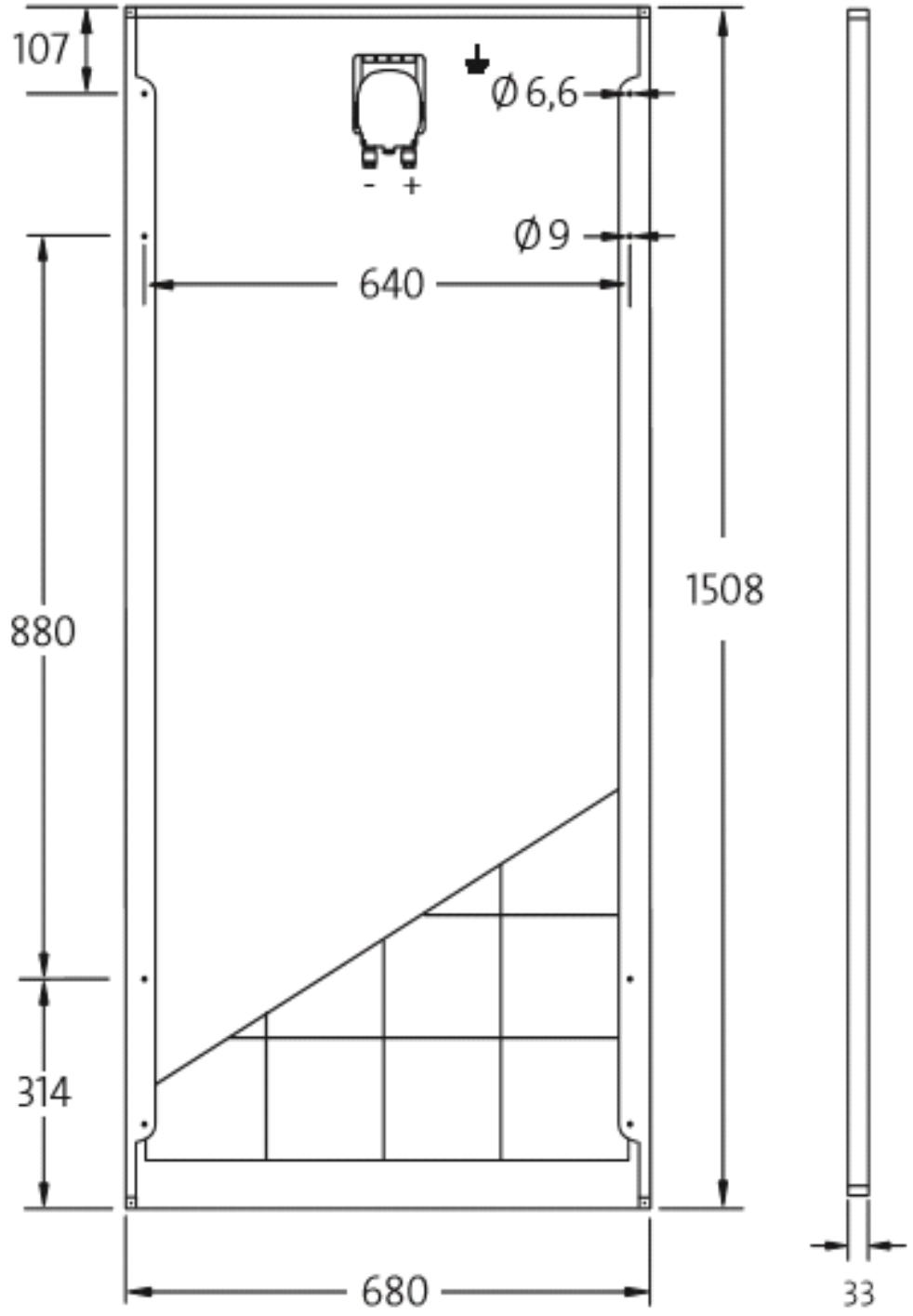
[20] G. A. Muñoz, "Programación en C para Arduino," Escuela de Ingeniería Civil Informática Universidad de Valparaíso, 2014.

[21] D. reference. *PmodHB3 Half Bridge*. Available: https://reference.digilentinc.com/reference/pmod/pmodhb3/reference-manual

ANEXOS

Anexo 1

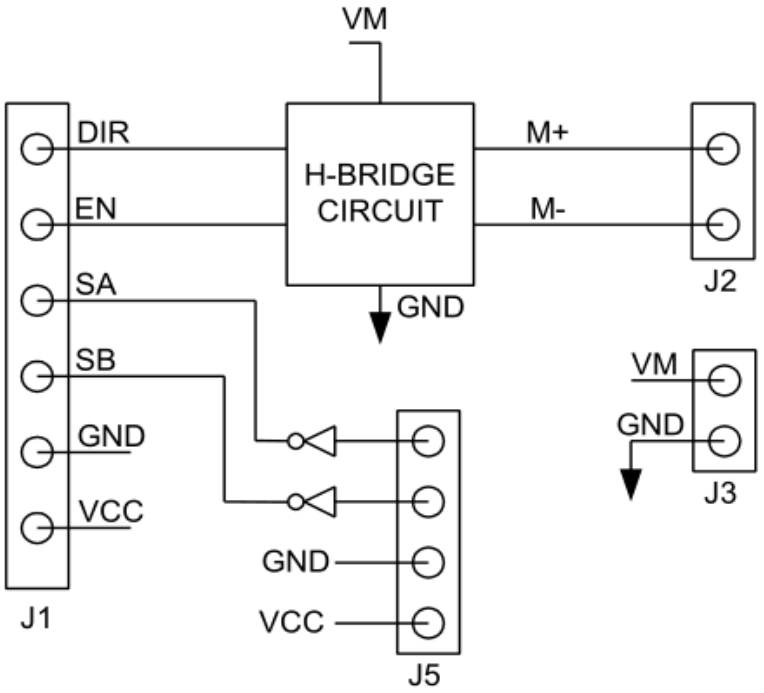
Anexo I Diagrama técnico del panel solar SW 150R6A.



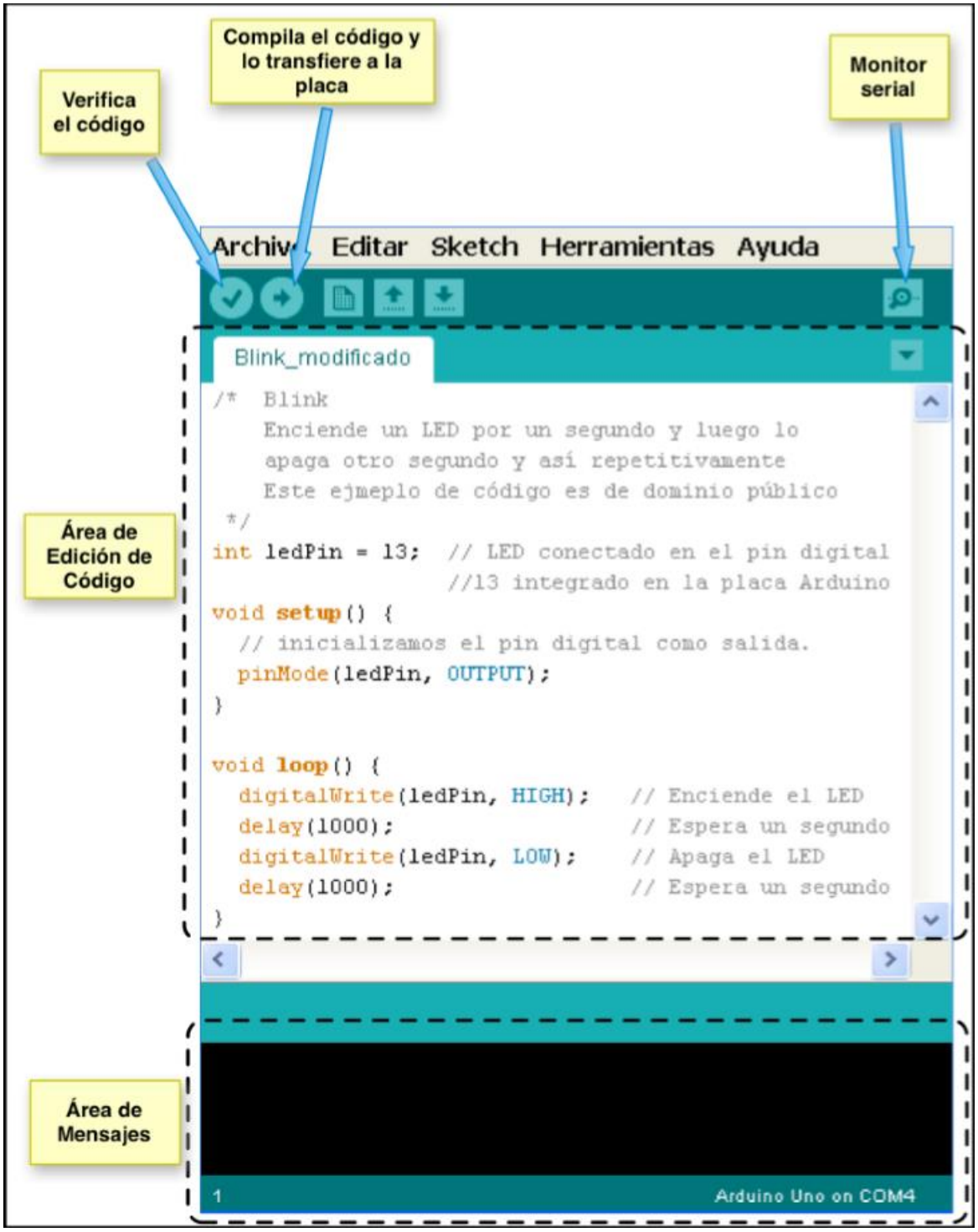
Anexo II Tabla de pines del módulo Pmod HB3.

Pin	Signal	Description
1	DIR	Direction pin
2	EN	Enable pin
3	SA	Sensor A feedback pin
4	SB	Sensor B feedback pin
5	GND	Power Supply Ground
6	VCC	Positive Power Supply (3.3/5V)

Anexo III Diagrama de circuito del Pmod HB3.



Anexo IV Vista del compilador Arduino



Anexo V Código del programa en el compilador Arduino.

```
int valor1;
int valor2;
int valor3;
int valor4;
int velocidadM1 = 600;
int velocidadM2 = 1000;
int esperar = 1000;
int a:
void setup() {
  pinMode(2, OUTPUT);
  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
  pinMode(5, OUTPUT);
  pinMode(8, OUTPUT);
  pinMode(9, OUTPUT);
  pinMode(10, OUTPUT);
  pinMode(11, OUTPUT);
 }
 void loop() {
 valor1 = analogRead(0);
 valor2 = analogRead(1);
 if ( valor1 < 100 || valor2 < 100)
 { digitalWrite(2, LOW);
   digitalWrite(3, LOW);
   digitalWrite(4, LOW);
   digitalWrite(5, LOW);
   delay(esperar);
 }
```

```
if ( valor1 < 200 || valor2 < 200)
{
  for (a = 0; a < 16; a++) {
    digitalWrite(2, LOW);
    digitalWrite(3, LOW);
    digitalWrite(4, LOW);
    digitalWrite(5, HIGH);
    delay(velocidadM1);
    digitalWrite(2, LOW);
    digitalWrite(3, LOW);
    digitalWrite(4, HIGH);
    digitalWrite(5, LOW);
    delay(velocidadM1);
    digitalWrite(2, LOW);
    digitalWrite(3, HIGH);
    digitalWrite(4, LOW);
    digitalWrite(5, LOW);
    delay(velocidadM1);
    digitalWrite(2, HIGH);
    digitalWrite(3, LOW);
    digitalWrite(4, LOW);
    digitalWrite(5, LOW);
    delay(velocidadM1);
    digitalWrite(2, LOW);
    digitalWrite(3, LOW);
    digitalWrite(4, LOW);
    digitalWrite(5, LOW);
    delay(esperar);
  }
```

```
}
else
{
  valor1 = analogRead(0);
  valor2 = analogRead(1);

  if (valor1 > valor2)
  { for (a = 0; a < 16; a++) {
      digitalWrite(2, HIGH);
      digitalWrite(3, LOW);
      digitalWrite(4, LOW);
      digitalWrite(5, LOW);
      delay(velocidadM1);
      digitalWrite(2, LOW);
      digitalWrite(3, HIGH);
      digitalWrite(4, LOW);
      digitalWrite(5, LOW);
      delay(velocidadM1);
      digitalWrite(2, LOW);
      digitalWrite(3, LOW);
      digitalWrite(4, HIGH);
      digitalWrite(5, LOW);
      delay(velocidadM1);
      digitalWrite(2, LOW);
      digitalWrite(3, LOW);
      digitalWrite(4, LOW);
      digitalWrite(5, HIGH);
      delay(velocidadM1);
      digitalWrite(2, LOW);
      digitalWrite(3, LOW);
      digitalWrite(4, LOW);
      digitalWrite(5, LOW);
      delay(esperar);
    }
  }
```

```
else
{ valor1 = analogRead(0);
  valor2 = analogRead(1);

  if (valor1 < valor2)
  { for (a = 0; a < 16; a++) {
      digitalWrite(2, LOW);
      digitalWrite(3, LOW);
      digitalWrite(4, LOW);
      digitalWrite(5, HIGH);
      delay(velocidadM1);
      digitalWrite(2, LOW);
      digitalWrite(3, LOW);
      digitalWrite(4, HIGH);
      digitalWrite(5, LOW);
      delay(velocidadM1);
      digitalWrite(2, LOW);
      digitalWrite(3, HIGH);
      digitalWrite(4, LOW);
      digitalWrite(5, LOW);
      delay(velocidadM1);
      digitalWrite(2, HIGH);
      digitalWrite(3, LOW);
      digitalWrite(4, LOW);
      digitalWrite(5, LOW);
      delay(velocidadM1);
      digitalWrite(2, LOW);
      digitalWrite(3, LOW);
      digitalWrite(4, LOW);
      digitalWrite(5, LOW);
      delay(esperar);
    }
  }
}
```

```
valor3 = analogRead(2);
valor4 = analogRead(3);

if (valor3 > valor4)
{ for (a = 0; a < 16; a++) {
    digitalWrite(8, HIGH);
    digitalWrite(9, LOW);
    digitalWrite(10, LOW);
    digitalWrite(11, LOW);
    delay(velocidadM2);
    digitalWrite(8, LOW);
    digitalWrite(9, HIGH);
    digitalWrite(10, LOW);
    digitalWrite(11, LOW);
    delay(velocidadM2);
    digitalWrite(8, LOW);
    digitalWrite(9, LOW);
    digitalWrite(10, HIGH);
    digitalWrite(11, LOW);
    delay(velocidadM2);
    digitalWrite(8, LOW);
    digitalWrite(9, LOW);
    digitalWrite(10, LOW);
    digitalWrite(11, HIGH);
    delay(velocidadM2);
    digitalWrite(8, LOW);
    digitalWrite(9, LOW);
    digitalWrite(10, LOW);
    digitalWrite(11, LOW);
    delay(esperar);

  }

}
```

```
else
{
  valor3 = analogRead(2);
  valor4 = analogRead(3);

  if (valor3 < valor4)
  { for (a = 0; a < 16; a++) {
      digitalWrite(8, LOW);
      digitalWrite(9, LOW);
      digitalWrite(10, LOW);
      digitalWrite(11, HIGH);
      delay(velocidadM2);
      digitalWrite(8, LOW);
      digitalWrite(9, LOW);
      digitalWrite(10, HIGH);
      digitalWrite(11, LOW);
      delay(velocidadM2);
      digitalWrite(8, LOW);
      digitalWrite(9, HIGH);
      digitalWrite(10, LOW);
      digitalWrite(11, LOW);
      delay(velocidadM2);
      digitalWrite(8, HIGH);
      digitalWrite(9, LOW);
      digitalWrite(10, LOW);
      digitalWrite(11, LOW);
      delay(velocidadM2);
      digitalWrite(8, LOW);
      digitalWrite(9, LOW);
      digitalWrite(10, LOW);
      digitalWrite(11, LOW);
      delay(esperar);
    }
  }
}
}
```

Anexo VI Logotipo del seguidor.