

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ



SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



SEP

## **INFORME TECNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL INGENIERÍA EN ELECTRICA**

**PRESENTA:**

**Domínguez Hernández Eliseo Gabriel**

**Hernández De lucio Omar**

**EL TEMA:**

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE SEGUIDOR SOLAR PARABOLICO  
PARA MOTOR STIRLIN**

**ASESOR INTERNO**

**DR. RAFAEL MOTA GRAJALES**

**PERIODO:**

**Enero – Agosto 2016**

**TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS, AGOSTO 2016.**

## Contenido

1. Introducción.....	2
1.1 Antecedentes.....	3
1.3 Justificación .....	6
1.4 Objetivo .....	6
1.5 Metodología .....	6
2. Fundamento teórico.....	9
2.1 Definición de la parábola .....	9
2.2 Motor paso a paso .....	12
2.3 Motor Stirling.....	18
2.4 Dispositivos del sistema.....	23
3. Desarrollo .....	25
3.1 Componentes de la plataforma de seguimiento solar.....	25
3.2 Principios de seguimiento solar .....	25
3.3 Determinación de la posición del sol .....	28
4. Resultados .....	32
4.1 Control del motor por modulación de anchos de pulsos (PWM).....	32
5. Referencias .....	33
Anexo .....	34
Conclusión .....	38

## 1. Introducción

Tomando el concepto de movimiento del sol ayudará a cualquier desarrollador, pasatiempos, técnico, Ingeniero o sistema para comprender las fórmulas que uno necesitan para utilizar en la programación de microcontroladores, controladores lógicos programables o escribir un sencillo programa de PC que automáticamente podría dirigir su sistema de seguimiento solar.

La discusión alrededor del movimiento del sol se hace así en el contexto de orientación un seguidor solar con respecto al sol en cualquier lugar sobre la tierra y en cualquier momento del día. Este artículo tiene como objetivo ayudar a los lectores a conceptualizar el movimiento del sol y presenta algunos modelos teóricos básicos alrededor del movimiento del sol, a medida que progresa a través del cielo durante el día.

La conceptualización del movimiento del sol (o más bien relativa y aparente movimiento del sol) es de suma importancia en el desarrollo de un sistema de seguimiento solar y el artículo está diseñado para ayudar al lector a comprender los principios básicos detrás del movimiento del sol en términos simples y comprensibles.

Un seguidor solar automático inteligente es un dispositivo que orienta una carga hacia el sol. Tal dispositivo de seguimiento solar programable por computadora incluye principios de seguimiento solar, sistemas de seguimiento solar, así como microcontroladores, microprocesadores o PC basado en el control de seguimiento solar para orientar los reflectores solares, lentes solares, paneles fotovoltaicos u otras configuraciones ópticos hacia el sol.

Espaciales motorizados y sistemas cinemáticos garantizar la dinámica de movimiento y emplean tecnología de transmisión y engranajes principios para conducir Configuraciones ópticas como mangin, parabólica, cónica, o colectores de energía solar de cassegrain para enfrenar el sol y seguir el movimiento del sol contorno continuamente.

En aprovechar la energía del sol a través de un seguidor solar o práctico sistema de seguimiento solar, sistemas de automatización de control de energías renovables requieren de algoritmos de posición solar y software de seguimiento

solar automático para lograr el control dinámico de movimiento con arquitectura de automatización de control, tableros de circuitos y hardware.

El eje de doble altura-acimut o seguidor solar multi-eje sistemas de seguimiento usan un algoritmo de seguimiento o sensores de trazado de rayos o software para garantizar el paso del sol por el cielo se remonta con la alta precisión en aplicaciones de seguidor solar automatizada, a través de equinoccio solar, solsticio de verano y solsticio de invierno.

Una calculadora de posición de alta precisión sol o sol posición algoritmo utiliza una rutina de programa de software para alinear el seguidor solar al sol y es un componente importante en el diseño y construcción de un sistema de seguimiento solar automático. Desde la perspectiva de software del seguimiento de sol, el soneto rastrear el sol tiene un significado literal.

Utilizando ecuaciones solares en un circuito electrónico para el seguimiento solar automático es bastante simple. Dirigiéndose el colector solar directamente hacia el sol, un aprovechamiento solar significa o dispositivo puede aprovechar el calor solar o térmico. Con el fin de seguir al sol como la tierra gira (o como el sol se mueve a través del cielo) es necesaria la ayuda de fórmulas de ángulo del sol, ángulo solar fórmulas o procedimientos de seguimiento solar en el cálculo de la posición del sol en el cielo.

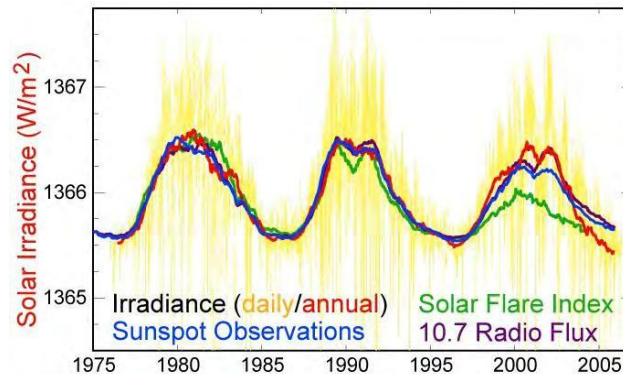
## **1.1 Antecedentes**

Hoy en día podemos observar a varias disciplinas que buscan desarrollar sistemas sustentables de transformación de energía y que abordan el problema de varios puntos de vista para lograr una producción más limpia. La mayoría de los dispositivos solares están instaladas fijas y captan en su mayoría los rayos del sol a mediodía.

Además en el mercado hay diferentes alternativas de seguimiento solar para celdas fotovoltaicas como el sistema de posicionamiento global, utilizando controladores lógicos programables y mediante computadora utilizando LabView, el prototipo propuesto busca ser una alternativa de bajo costo que mediante una estructura soporta un plato solar.

En el sistema se propone posicionar ambos motores, para asegurar el correcto seguimiento del plato parabólico en cualquier posición del sol con respecto al Este-Oeste o Norte-Sur utilizando motores de corriente directa, además de sensores foto resistivos que permiten pasar un determinado voltaje dependiendo de la cantidad de luz que les llegue logrando con ello valores continuos.

El sol irradia energía en forma de energía electromagnética y la cantidad de radiación electromagnética que llega a la tierra desde el sol conocido como radiación solar. La irradiación del término se utiliza normalmente para definir la cantidad de energía solar por unidad de área recibida en un momento dado. Como la energía electromagnética solar atraviesa la atmósfera de la tierra, mientras que los niveles de energía solares es alrededor de  $1367 \text{ W/m}^2$  cuando alcanza la superficie de la tierra.



**Fig. 1.1** Irradiación solar sobre la superficie de la tierra.

En la figura 1.1 Allí se muestra una ilustración de la irradiación solar sobre la superficie de la tierra como un argumento que demuestra la naturaleza cíclica de las variaciones de la radiación entre los años 1975 y 2005. En cuanto a aplicaciones solares, esto significa que el nivel de radiación puede suponer relativamente estable alrededor de los niveles medidos de  $1366 \text{ W/m}^2$ , o redondeado como  $1 \text{ kW/m}^2$ .

## 1.2 Estado del Arte

M. Serhan, L. El-Chaar, (2010) "sistema de seguimiento de dos ejes: la comparación con un sistema fijo" Propuso el mecanismo de seguimiento de bucle cerrado y superar los problemas relacionados con (soleado, lluvioso) las condiciones meteorológicas utilizando motores de corriente alterna de la antena, y el circuito de control electrónico de potencia para convertir corriente continua en corriente alterna. Sin embargo, causa más pérdidas en el sistema [1].

JA Beltrán, Etal, (2013) "Diseño y fabricación de prueba de rendimiento de un seguidor solar hecho por la electrónica de control embebido", Propusieron para el sistema de seguimiento de bucle abierto, el rastreador llevara a cabo el cálculo para determinar la posición del sol y determinar los ángulos de rotación de los dos ejes de seguimiento utilizando una formula especifica sol de seguimiento con el fin de impulsar el colector solar hacia el sol [2].

A.-JN Khalifa Al-SS y Mutawalli, (2014) "Efecto de seguimiento solar de dos ejes en el rendimiento de los concentradores parabólicos compuestos," *Conversión y Gestión de la Energía*, el sistema fotovoltaico que diseño para concentrar gran cantidad de luz solar en las células, el máximo seguidor del punto de poder concentrado el cual poder extraer la máxima potencia del PV [3].

H. Mousazadeh, Etal (2014), "Una revisión de principios y métodos de seguimiento solar para maximizar sistemas solares de salida", renovables y sostenibles de doble eje solar tracker es un tipo de seguidor solar de dos ejes de rotación que le permiten alinear los paneles fotovoltaicos y apuntan directamente hacia el disco solar en todo el momento [4].

LH Hwang, Etal (2014), "Un desarrollo de la posición de seguidor solar en el método del programa para el pequeño con tipo autónomo sistema fotovoltaico". En este trabajo, solia microprocesador y sensor y diseñado para mejorar la eficiencia de la instalación fotovoltaica del dispositivo de seguimiento.

De la posición fotovoltaica, y se compara el sistema fotovoltaico normal de forma fija con el sistema fotovoltaico de la posición solar formulario de seguimiento. Se utiliza el método de control de tensión constante para el seguimiento del punto de máxima potencia en el control de convertidor elevador y utilizando el MASP en el método de control de control del inversor [5].

S. Ozcelik, Etal (2012), "de dos ejes Solar Análisis de Rastreo y Control de Potencia Máxima Generación", *Procedia Computer Science*, vol. 6, pp. 457-462, 2011. Utiliza el ángulo de declinación solar local y ecuación del tiempo, Etime para calcular el ángulo horario solar instantánea [6].

MA Abas, (2013), "Mejora de la estructura del seguidor solar control basado en microcontrolador," una nueva estructura mecánica de seguidor solar fue diseñado y presentado. La estructura implementa dos motores paso a paso para la rotación libre del eje X y Y. la rotación se forma inteligente controlado por un microcontrolador PIC 18F4560 2k pre programado que proporciona la estrategia de programación sencilla a través del lenguaje C.

El algoritmo diseñado se basa en la medición de la intensidad de la radiación solar que es capturado por un dispositivo sensible ultravioleta conocida como piránometro. El sistema ha sido probado y los resultados muestran impacto muy significativo en el diseño mecánico, el control de algoritmo y también el coste del desarrollo [7].

### **1.3 Justificación**

Los problemas de contaminación, riesgo y deterioro del medio ambiente son el motivo por el cual es importante buscar fuentes alternativas de energía a la nuclear y la derivada de combustibles fósiles, los sistemas de energía solar aprovechan la radiación solar incidente sobre la tierra para generar energía eléctrica o calefacción.

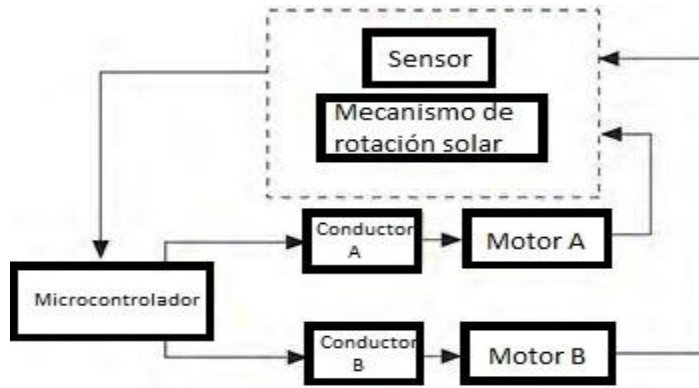
Se propone y evalúa un sistema de seguimiento solar con el objetivo de lograr el correcto posicionamiento de un seguidor solar parabólico y así obtener la mayor cantidad de luz solar durante todo el día y por lo tanto producir la mayor cantidad de energía eléctrica. Se controla el movimiento de los motores de corriente directa con respecto a los sensores propuestos para desarrollar esta función.

Esta propuesta es una alternativa en la mediana generación de energía eléctrica para satisfacer la demanda de electricidad en casa habitación o comunidades rurales de forma sustentable buscando nuevas alternativas para eficientar los sistemas tradicionales de transformación de energía solar, comprometidos con el cuidado del medio ambiente.

### **1.4 Objetivo**

Diseñar un sistema lo más estable posible durante su evolución temporal, construcción mecánica del sistema intentando que haya el menor rozamiento para que el movimiento sea lo más limpio posible, tanto en el eje superior e inferior implementando un algoritmo correcto en Arduino uno para una buena regulación de la velocidad de los motores en sus respectivos ejes para una posición óptima.

### **1.5 Metodología**



**Fig. 1.2** Diagrama hardware del seguidor solar parabólico.

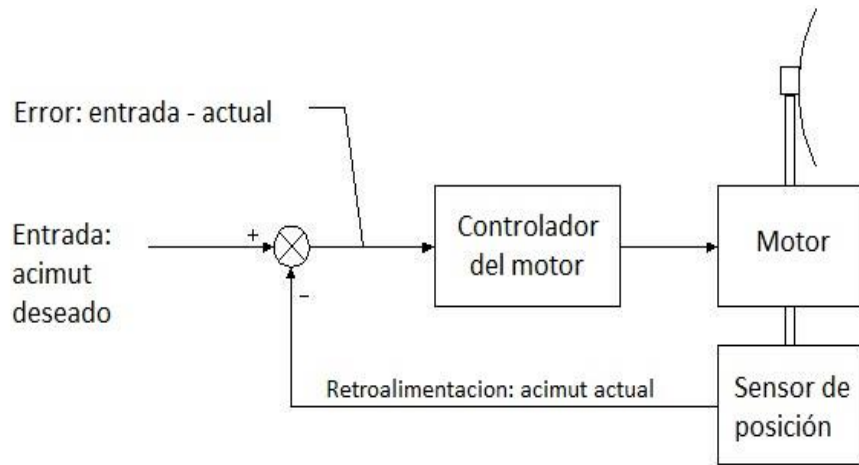
Representa la arquitectura de control de seguimiento solar a un típico sistema de control en formato de diagrama bloque. El diagrama de bloques ilustra como el sistema de seguimiento solar utiliza dos motores como unidades mecánicas que lleva acabo una rotación de doble eje para maniobrar el colector solar para enfrentar directamente el sol.

Esta rotación permite al sistema seguir al sol en tiempo real, permitiendo al colector solar cosechar óptimamente la energía solar. Por lo general, los dos motores se desemparejan, lo que significa que la rotación de un motor no influya en el otro, con el fin de minimizar el consumo de energía durante el funcionamiento.

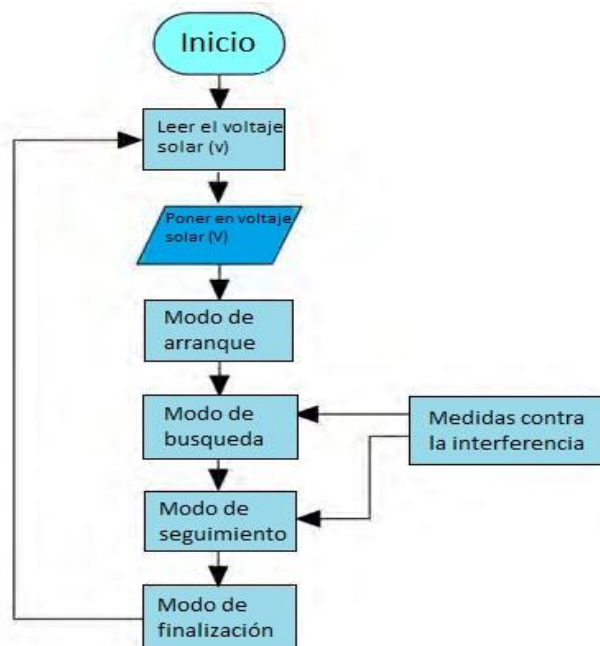
Cuando está funcionando el sistema de seguimiento solar, normalmente ejecuta la siguiente secuencia de operaciones en el marco de los procedimientos de software y diagrama de flujo que son Leer todos los codificadores de ángulo, Leer posiciones del seguidor de entradas del microcontrolador, Calcular el siguiente punto de la trayectoria del sol,

Busque cualquier desencadenadores de eventos, Realizar acciones de sucesos requeridas de diagrama de flujo, Calcular y establecer las señales de salida, Ir al siguiente eje y repetir, Salida de interrupción.





**Fig. 1.3** Diagrama software del seguidor solar



**Fig. 1.3** Diagrama de flujo del seguidor solar

La señal de entrada ordenada es el Azimut deseado y la elevación del reflector solar en cuanto a los parámetros del vector solar. La señal de error conduce los motores para volver a colocar el reflector solar hasta que la realimentación de posición indica que el reflector solar está en el Azimut deseado y ángulos de elevación, momento en el que la señal de error es cero y las paradas de los motores.

Este mecanismo de servo puede combinarse con una retroalimentación óptica de los medios de seguimiento solar, en el cual el sistema también puede usar señales ópticas de acimut y elevación como entrada. Se ilustra un diagrama de bloques típico de un sistema de seguimiento solar a dos ejes controlado por un microprocesador.

## 2. Fundamento teórico

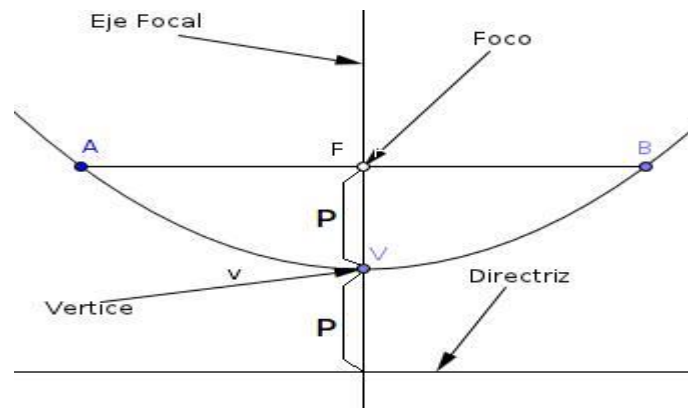
### 2.1 Definición de la parábola

Se llama parábola al lugar geométrico de los puntos del plano que equidistan de un punto fijo, llamado foco, y de una recta fija llamada directriz.

**Elementos de la Parábola.-** Se definen por las siguientes partes **Directriz.-** La Directriz es la recta sobre la cual, si medimos su distancia hasta un punto cualquiera de la parábola, esta debe ser igual a la distancia de este mismo punto al Foco. **Eje Focal.-** El eje focal es la recta perpendicular a la directriz que pasa por el foco. **Vértice.-** Es el punto en el cual la parábola corta el eje focal.

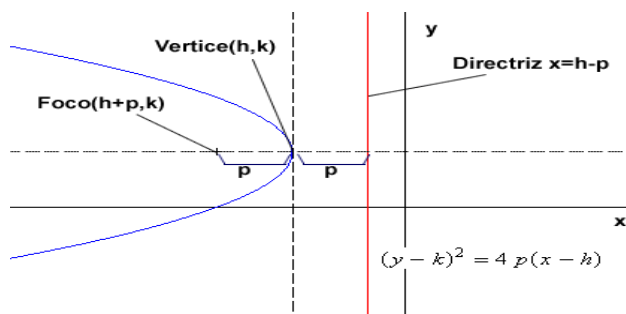
**Lado Recto.-** Es un segmento paralelo a la directriz, que pasa por el foco y es perpendicular al eje focal y sus extremos son puntos de la parábola (A, B).

**Parámetro.-** La distancia entre el vértice y la directriz es la misma de entre el vértice y el foco de una parábola esta recibe el nombre de parámetro de la parábola (suele denotarse por  $p$ ).



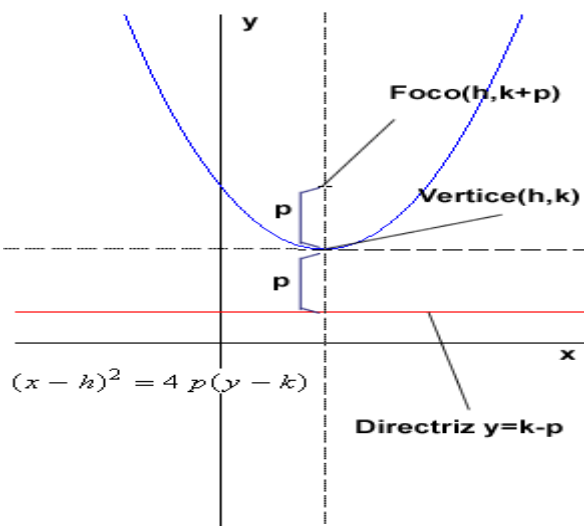
**Fig.2.1** Elementos de la parábola.

**Ecuación de la Parábola.-** La ecuación para una parábola con eje focal paralelo al eje x, vértice en (h, k) y cuya distancia al foco es p es:



**Fig.2.2** Elementos para la ecuación de la parábola con eje focal paralelo al eje x.

La ecuación para una parábola con eje focal paralelo al eje y, vértice en (h, k) y cuya distancia al foco es p es:



**Fig.2.3** Elementos para la ecuación de la parábola con eje focal paralelo al eje y.

**Aplicaciones.-** Las aplicaciones de las parábolas son básicamente aquellos fenómenos en donde nos interesa hacer converger o divergir un haz de luz y sonido principalmente. Por ejemplo, las antenas parabólicas, las lámparas sordas, los faros de los autos. Se pueden construir, por la misma propiedad de las parábolas, hornos solares. Los micrófonos de ambiente en algunos deportes también tienen forma paraboloidal.

Las parábolas tienen una propiedad si se coloca una bombilla encendida en el foco de la parábola, algunos haces de luz serán reflejados por la parábola y todos estos rayos serán perpendiculares a la directriz. Esta propiedad es usada en las lámparas sordas o en los faros de los automóviles estos están formados por un paraboloides (parábola en 3 dimensiones) de espejos y una bombilla en el foco de este paraboloides.

En algunas lámparas se puede mover la bombilla del foco y los haces de luz divergerán o convergerán. Este principio funciona también en las antenas parabólicas. Un satélite envía información a la Tierra, estos rayos serán perpendiculares a la directriz por la distancia a la que se encuentra el satélite. Al reflejarse en el plato de la antena (blanca, casi siempre) los rayos convergen en el foco en donde se encuentra un receptor que decodifica la información.

También en los telescopios se usa esta propiedad. En el siglo XVI Galileo demostró que la trayectoria de un proyectil que se dispara al aire formando un ángulo con la horizontal es una parábola. Desde entonces, las formas parabólicas se han usado para diseñar fanales de automóviles, telescopios reflectores y puentes colgantes.

**Ecuación Simple.-** Se obtiene una ecuación simplificada para una parábola si colocamos su vértice en el origen y su directriz paralela al eje x. Si el foco es el punto (0, p) entonces la directriz tiene la ecuación  $y=-p$  y la parábola tiene la ecuación  $x^2=4py$ . Si escribimos  $a=1/(4p)$ , entonces la ecuación de la parábola toma la forma (1.1).

$$y=ax^2 \qquad (1.1)$$

La parábola se abre hacia arriba si  $a>0$  y hacia abajo si  $a<0$ . La gráfica es simétrica con respecto al eje Y, porque su ecuación no cambia cuando x se reemplaza por -x. Esto corresponde a que la función  $f(x)=ax^2$  es una función par. Si intercambiamos X, y Y en la ecuación  $y=ax^2$ , el resultado es una parábola cuya directriz es paralela al eje Y con una ecuación con la forma (1.2).

$$x=ay^2 \qquad (1.2)$$

Este intercambio es una reflexión respecto a la diagonal  $y=x$ . La parábola de la ecuación (1.2) se abre hacia la derecha si  $a>0$  y hacia la izquierda si  $a <0$ . Para este caso la parábola es simétrica con respecto al eje x porque la ecuación no cambia cuando y es reemplazada por -y.

### **Ecuación General**

Si se toma a la ecuación con eje focal paralelo al eje x se obtiene la siguiente forma  $(y-k)^2 = 4p(x-h)$  resolviendo el producto, la potencia e igualando 0, se obtiene una ecuación con la forma (1.3).

$$y^2 - 2ky - 4px + k^2 + 4ph = 0 \quad (1.3)$$

Tomando los valores constantes  $-2k$  como  $D$ ,  $-4p$  como  $E$  y  $k^2 + 4ph$  como  $F$  se tiene la siguiente forma  $y^2 + Dy + Ex + F = 0$ , que es la ecuación general para una parábola con eje focal paralelo al eje  $x$ .

Si se toma la ecuación con eje focal paralelo al eje  $y$  y obtienen la siguiente forma  $(x-h)^2 = 4p(y-k)$  resolviendo el producto, la potencia e igualando 0, se obtiene una ecuación con la forma (1.4).

$$x^2 - 2hx - 4py + h^2 + 4pk = 0 \quad (1.4)$$

Tomando los valores constantes  $-2h$  como  $D$ ,  $-4p$  como  $E$  y  $h^2 + 4pk$  como  $F$  se tiene la siguiente forma  $X^2 + Dx + Ey + F = 0$ , que es la ecuación general para una parábola con eje focal paralelo al eje  $y$ .

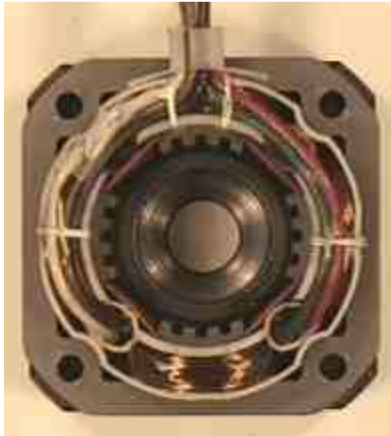
## 2.2 Motor paso a paso

Los motores paso a paso son ideales para la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos. La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde  $90^\circ$  hasta pequeños movimientos de tan solo  $1.8^\circ$ , es decir, que se necesitarán 4 pasos en el primer caso ( $90^\circ$ ) y 200 para el segundo caso ( $1.8^\circ$ ), para completar un giro completo de  $360^\circ$ .

**Principio de funcionamiento.-** Básicamente estos motores están constituidos normalmente por un rotor sobre el que van aplicados distintos imanes permanentes y por un cierto número de bobinas excitadoras bobinadas en su estator. Las bobinas son parte del estator y el rotor es un imán permanente. Toda la conmutación (o excitación de las bobinas) debe ser externamente manejada por un controlador.

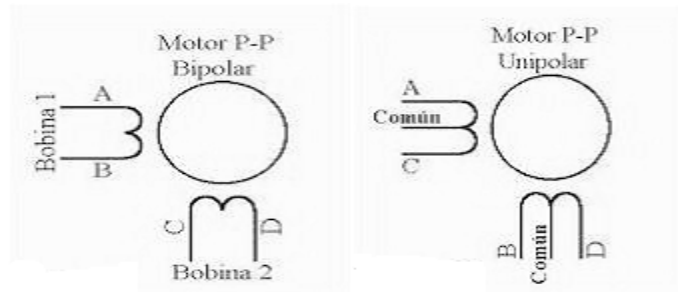


*Fig.2.4 Imagen del rotor.*



**Fig.2.5** Imagen de un estator de cuatro bobinas.

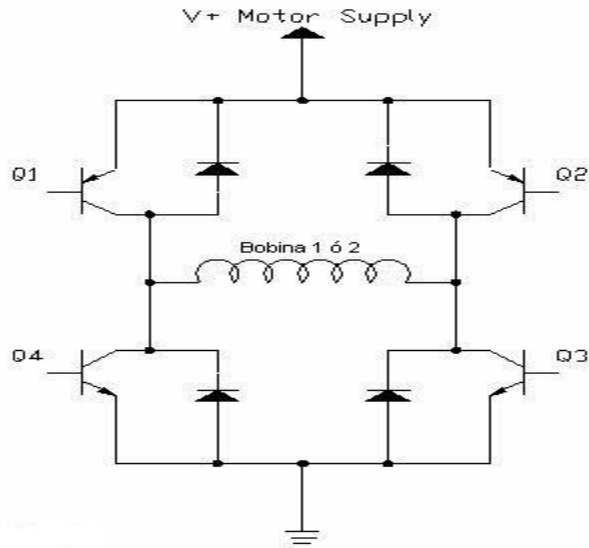
Existen dos tipos de motores paso a paso de imán permanente:



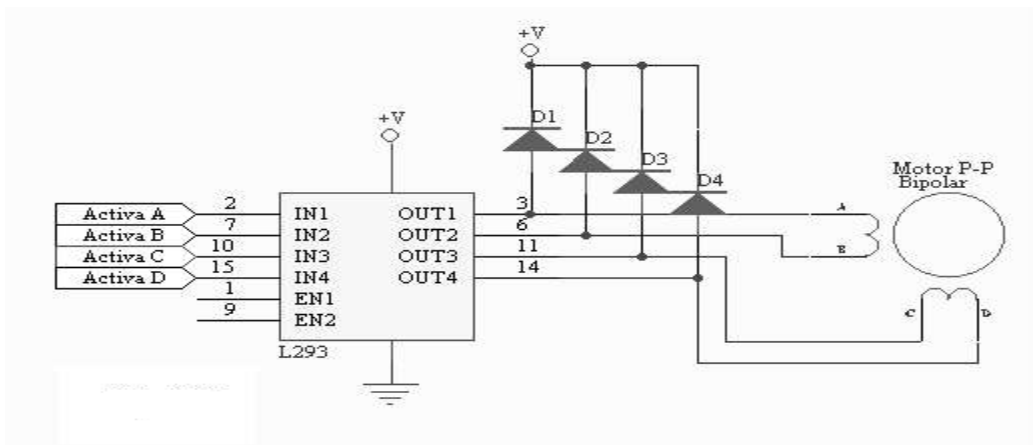
**Fig.2.6** Tipos de motores paso a paso.

**Bipolar.-** Estos tiene generalmente cuatro cables de salida (ver figura 2.6). Necesitan ciertos trucos para ser controlados, debido a que requieren del cambio de dirección del flujo de corriente a través de las bobinas en la secuencia apropiada para realizar un movimiento. En la figura 2.7 podemos apreciar un ejemplo de control de estos motores mediante el uso de un puente en H (H-Bridge).

Como se aprecia, será necesario un H-Bridge por cada bobina del motor, es decir que para controlar un motor paso a paso de 4 cables (dos bobinas), necesitaremos usar dos H-Bridges iguales al de la figura 2.7. El circuito de la figura 2.7 es a modo ilustrativo y no corresponde con exactitud a un H-Bridge. En general es recomendable el uso de H-Bridge integrados como son los casos del L293B (ver figura 2.8).

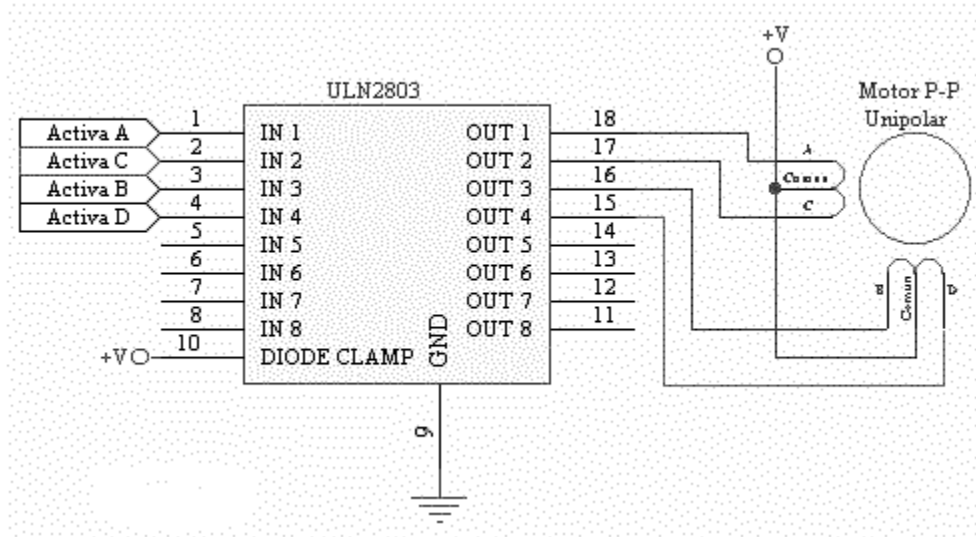


**Fig.2.7** Ejemplo de control de motores mediante uso de puente H.



**Fig.2.8** Ejemplo de uso de H-Bridge integrados.

**Unipolar.-** Estos motores suelen tener 6 o 5 cables de salida, dependiendo de su conexión interna. Se caracteriza por ser más simple de controlar. En la figura 2.9 se aprecia un ejemplo de conexión para controlar un motor paso a paso unipolar mediante el uso de un ULN2803, es un arreglo de 8 transistores tipo Darlington capaces de manejar cargas de hasta 500mA. Las entradas de activación (A, B, C y D) pueden ser activadas por un microcontrolador.



**Fig.2.9** Ejemplo de control de un motor unipolar mediante uso de un ULN2803.

**Secuencias para manejar motores paso a paso Bipolares.-** Como se dijo anteriormente, estos motores necesitan la inversión de la corriente que circula en sus bobinas en una secuencia determinada. Cada inversión de la polaridad provoca el movimiento del eje en un paso, cuyo sentido de giro está determinado por la secuencia seguida. A continuación, se puede ver la tabla con la secuencia necesaria para controlar motores paso a paso del tipo Bipolares.

**Tabla 1.1** Secuencia necesaria para controlar motores paso a paso del tipo bipolares.

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

**Secuencias para manejar motores paso a paso Unipolares.-** Existen tres secuencias posibles para este tipo de motores, las cuales se detallan a continuación. Todas las secuencias comienzan nuevamente por el paso 1 una vez alcanzado el paso final (4 u 8). Para revertir el sentido de giro, simplemente se deben ejecutar las secuencias en modo inverso.



**Secuencia Normal.-** Esta es la secuencia más usada y la que generalmente recomienda el fabricante. Con esta secuencia el motor avanza un paso por vez y debido a que siempre hay al menos dos bobinas activadas, se obtiene un alto torque de paso y de retención.

**Tabla 1.2** Secuencia normal para controlar motores paso a paso.

PASO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	
1	ON	ON	OFF	OFF	
2	OFF	ON	ON	OFF	
3	OFF	OFF	ON	ON	
4	ON	OFF	OFF	ON	

**Secuencia del tipo wave drive.-** En esta secuencia se activa solo una bobina a la vez. En algunos motores esto brinda un funcionamiento más suave. Pero al estar solo una bobina activada, el torque de paso y retención es menor.

**Tabla 1.3** Secuencia tipo wave drive para controlar motores paso a paso.

PASO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	
1	ON	OFF	OFF	OFF	
2	OFF	ON	OFF	OFF	
3	OFF	OFF	ON	OFF	
4	OFF	OFF	OFF	ON	

**Secuencia del tipo medio paso.-** En esta secuencia se activan las bobinas de tal forma de brindar un movimiento igual a la mitad del paso real. Para ello se activan primero 2 bobinas y luego solo 1 y así sucesivamente. Como vemos en la tabla la secuencia completa consta de 8 movimientos en lugar de 4.

**Tabla 1.4** Secuencia tipo medio paso para controlar motores paso a paso.

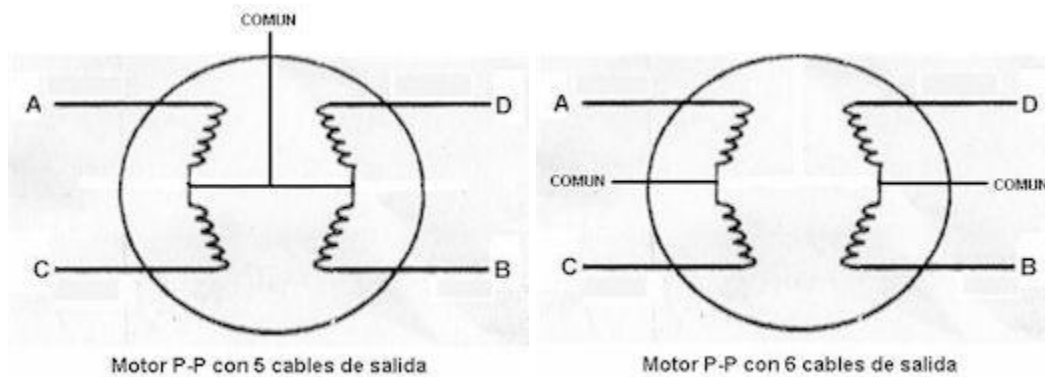
PASO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	
1	ON	OFF	OFF	OFF	
2	ON	ON	OFF	OFF	
3	OFF	ON	OFF	OFF	
4	OFF	ON	ON	OFF	
5	OFF	OFF	ON	OFF	
6	OFF	OFF	ON	ON	
7	OFF	OFF	OFF	ON	
8	ON	OFF	OFF	ON	

Como comentario final, cabe destacar que debido a que los motores paso a paso son dispositivos mecánicos y como tal deben vencer ciertas inercias, el tiempo de duración y la frecuencia de los pulsos aplicados es un punto muy importante a tener en cuenta. En tal sentido el motor debe alcanzar el paso antes que la próxima secuencia de pulsos comience. Si la frecuencia de pulsos es muy elevada, el motor puede reaccionar en alguna de las siguientes formas.

- Puede que no realice ningún movimiento en absoluto.
- Puede comenzar a vibrar, pero sin llegar a girar.
- Puede girar erráticamente.
- O puede llegar a girar en sentido opuesto.

Para obtener un arranque suave y preciso, es recomendable comenzar con una frecuencia de pulso baja y gradualmente ir aumentándola hasta la velocidad deseada sin superar la máxima tolerada. El giro en reversa debería también ser realizado previamente bajando la velocidad de giro y luego cambiar el sentido de rotación.

**Una referencia importante.-** Cuando se trabaja con motores paso a paso usado o bien nuevo, pero de los cuales no tenemos hojas de datos. Es posible averiguar la distribución de los cables a los bobinados y el cable común en un motor de paso unipolar de 5 o 6 cables siguiendo las instrucciones que se detallan a continuación:



**Fig.2.10** Distribución de los cables a los bobinados y cable común de un motor de paso unipolar.

**Aislando el cable(s) común que va a la fuente de alimentación.-** Como se aprecia en las figuras anteriores, en el caso de motores con 6 cables, estos poseen dos cables comunes, pero generalmente poseen el mismo color, por lo que lo mejor es unirlos antes de comenzar las pruebas. Usando un multímetro para chequear la resistencia entre pares de cables.

El cable común será el único que tenga la mitad del valor de la resistencia entre ella y el resto de los cables. Esto es debido a que el cable común tiene una bobina entre ella y cualquier otro cable, mientras que cada uno de los otros cables tiene dos bobinas entre ellos. De ahí la mitad de la resistencia medida en el cable común.

**Identificando los cables de las bobinas (A, B, C y D).-** Aplicar un voltaje al cable común (generalmente 12 voltios, pero puede ser más o menos) y manteniendo uno de los otros cables a tierra (GND) mientras vamos poniendo a tierra cada uno de los demás cables de forma alternada y observando los resultados.

### 2.3 Motor Stirling

El Motor Stirling fue inventado en 1816 por Robert Stirling, un cura escocés. El objetivo era conseguir un motor menos peligroso que la máquina de vapor. El funcionamiento del Motor Stirling se basa en la expansión y contracción de un gas que puede ser helio, hidrógeno, nitrógeno o aire. A este gas se le obliga a desplazarse cíclicamente de una fuente fría donde se contrae a una fuente caliente donde se expande.

Se considera como un motor térmico (motor termodinámico) debido a la presencia de un gradiente de temperaturas entre las dos fuentes térmicas. Originariamente

se concibió como un motor principal industrial para competir con la máquina de vapor, pero en la práctica, durante más de un siglo sólo se usó para aplicaciones domésticas y para motores de baja potencia.

Actualmente, aún se investiga el desarrollo. el hecho de que sólo necesite una fuente de calor externa le da una gran versatilidad ya que este hecho le da la posibilidad de poder utilizar muchas fuentes de energía para su funcionamiento. la fuente de energía de un Motor Stirling más relevante para nosotros es la energía solar térmica, aunque también se puede utilizar todo tipo de combustibles, biomasa, energía geotérmica y otras.

Pero el motor Stirling perdió interés después del desarrollo del motor de combustión interna y ha retomado interés en los últimos años por varias características muy favorables que tiene. En particular como son el **Rendimiento:** como veremos, el motor Stirling tiene el potencial de alcanzar el rendimiento de Carnot, lo cual le permite, teóricamente, alcanzar el límite máximo de rendimiento.

**Fuente de Calor Externa:** este motor intercambia el calor con el exterior, por lo tanto, es adaptable a una gran gama de fuentes de calor para su operación. Se han construido motores Stirling que usan como fuente de calor la energía nuclear, energía solar, combustibles fósiles, calor de desecho de procesos, etc. Al ser de combustión externa, el proceso de combustión se puede controlar muy bien, por lo cual se reducen las emisiones.

**Ciclo cerrado:** el fluido de trabajo opera en un ciclo cerrado y la fuente de calor es externa. Esto hace que este motor sea, potencialmente, de muy bajo nivel de emisiones. Como contrapartida a estas características favorables, está el hecho de que el fluido de trabajo es gaseoso, lo cual acarrea dificultades operativas. En la práctica, se ha visto que los fluidos de trabajo viables son el hidrógeno y el helio, ambos por buenas propiedades termodinámicas.

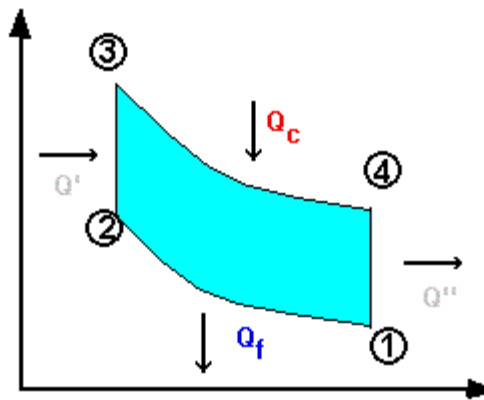
**Descripción del ciclo Stirling.-** El ciclo Stirling Teórico está compuesto por dos evoluciones a Volumen constante y dos evoluciones isotérmicas, una a  $T_c$  y la segunda a  $T_f$ . Este queda ilustrado en la figura 2.15. El fluido de trabajo se supone es un gas perfecto. En el ciclo teórico hay un aspecto importante que es la existencia de un regenerador. Este tiene la propiedad de poder absorber y ceder calor en las evoluciones a volumen constante del ciclo.

Si no existe regenerador, el motor también funciona, pero su rendimiento es inferior. Hay algunos aspectos básicos a entender en la operación de un motor Stirling; El motor tiene dos pistones y el regenerador. El regenerador divide al motor en dos zonas, una zona caliente y una zona fría; El regenerador es un

medio poroso, capaz de absorber o ceder calor y con conductividad térmica despreciable.

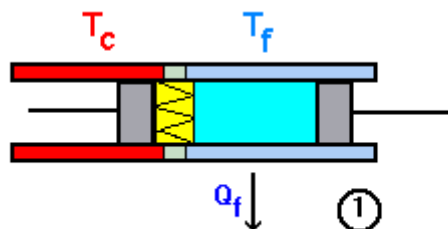
El fluido de trabajo está encerrado en el motor y los pistones lo desplazan de la zona caliente a la fría o vice versa en ciertas etapas del ciclo. Por lo tanto, se trata de un ciclo cerrado; Cuando se desplaza el fluido desde la zona caliente a la fría (o al revés), este atraviesa el regenerador; El movimiento de los pistones es sincronizado para que se obtenga trabajo útil.

Se supone que el volumen muerto es cero y el volumen de gas dentro del regenerador es despreciable en el caso del ciclo teórico. Como en el ciclo real esto no ocurre, el rendimiento es algo inferior; En el ciclo teórico se supone que la eficiencia del regenerador es de un 100%. Es decir, devuelve todo el calor almacenado y además con recuperación total de temperaturas.



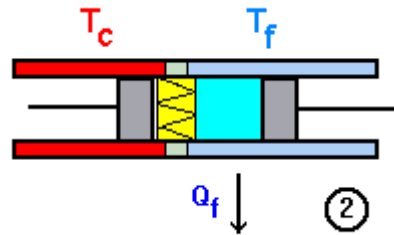
**Fig.2.11** Ciclo Stirling teórico.

**La descripción del ciclo es como sigue.-** En 1 el cilindro frío está a máximo volumen y el cilindro caliente está a volumen mínimo, pegado al regenerador. El regenerador se supone está "cargado" de calor (una discusión más extensa sobre este punto se ve en el párrafo sobre el regenerador). El fluido de trabajo está a  $T_f$  a volumen máximo,  $V_{max}$  y a  $p_1$ .



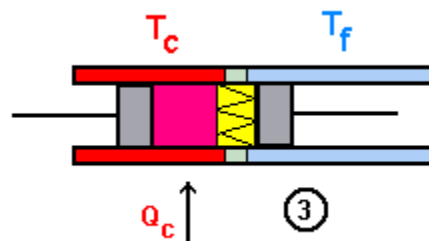
**Fig.2.12** Ciclo Stirling teórico.

Entre 1 y 2 se extrae la cantidad  $Q_f$  de calor del cilindro (por el lado frío). El proceso se realiza a  $T_f$  constante. Por lo tanto al final (en 2) se estará a volumen mínimo,  $V_{\min}$ ,  $T_f$  y  $p_2$ . El pistón de la zona caliente no se ha desplazado. En esta evolución el sistema absorbe trabajo.



**Fig.2.13** Ciclo Stirling teórico.

Entre 2 y 3 los dos pistones se desplazan en forma paralela. Esto hace que todo el fluido atraviese el regenerador. Al ocurrir esto, el fluido absorbe la cantidad  $Q'$  de calor y eleva su temperatura de  $T_f$  a  $T_c$ . Por lo tanto al final (en 3) se estará a  $T_c$ ,  $V_{\min}$  y  $p_3$ . El regenerador queda "descargado". En esta evolución el trabajo neto absorbido es cero (salvo por pérdidas por roce al atravesar el fluido el regenerador).



**Fig.2.14** Ciclo Stirling teórico.

Entre 3 y 4 el pistón frío queda junto al lado frío del regenerador y el caliente sigue desplazándose hacia un mayor volumen. Se absorbe la cantidad de calor  $Q_c$  y el proceso es (idealmente) isotérmico. Al final el fluido de trabajo está a  $T_c$ , el volumen es  $V_{\max}$  y la presión es  $p_4$ .

Finalmente los dos pistones se desplazan en forma paralela de 4 a 1, haciendo atravesar el fluido de trabajo al regenerador. Al ocurrir esto el fluido cede calor al regenerador, este se carga de calor, la temperatura del fluido baja de  $T_c$  a  $T_f$  y la presión baja de  $p_4$  a  $p_1$ . Al final de la evolución el fluido está a  $V_{\max}$ ,  $p_1$  y  $T_f$ . El regenerador sigue "cargado" de calor.

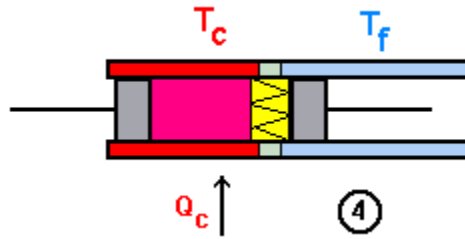


Fig.2.15 Ciclo Stirling teórico.

**Rendimiento del Ciclo.**- Supongamos que el fluido de trabajo es un gas perfecto. De acuerdo al Segundo Principio, el rendimiento del ciclo es como se muestra a continuación  $n = 1 - q_{ced}/Q_{abs}$  Lo cual se puede escribir como la siguiente ecuación (1.5).

$$n = (Q_c + Q' - Q_f + Q'') / (Q_c + Q') \quad (1.5)$$

Ahora bien, es fácil demostrar que  $Q' = -Q''$  en magnitud (solo de signos opuestos) en el caso de un gas perfecto, pues se trata de calentamientos o enfriamientos a volumen constante entre las mismas dos temperaturas, es decir que la ecuación toma forma (1.6).

$$Q' = C_v (T_c - T_f) = -Q'' = -C_v (T_f - T_c) \quad (1.6)$$

Por lo tanto, en el numerador  $Q'$  y  $Q''$  se anulan, así que el rendimiento toma la forma de la ecuación (1.7).

$$n = (Q_c - Q_f) / (Q_c + Q') \quad (1.7)$$

Ahora bien, vemos que, si el regenerador funciona, se logra recuperar el calor  $Q''$  para que sirva como  $Q'$ . Además, solo en el primer ciclo será necesario aportar el calor externo  $Q'$ . De allí en adelante se recupera en forma interna, por lo tanto, el rendimiento queda como la ecuación (1.8).

$$n = (Q_c - Q_f) / (Q_c) \quad (1.8)$$

Como la evolución 1-2 es isotérmica a  $T_f$ , se tiene que la ecuación (1.9) es igual a la ecuación (1.10) y con la ecuación (1.11) se simplifican.

$$Q_f = R'T_f \ln(p_2/p_1) \quad \Rightarrow \quad -Q_f = R'T_f \ln(p_1/p_2) \quad (1.9) \quad (1.10)$$

y

$$Q_c = R'T_c \ln(p_4/p_3) \quad (1.11)$$

de donde se obtiene la ecuacion (1.12)

$$n = [R'T_c \ln(p_4/p_3) - Q_f = R'T_f \ln(p_1/p_2)] / [R'T_c \ln(p_4/p_3)] \quad (1.12)$$

Es fácil demostrar que:  $(p_4/p_3) = (p_1/p_2)$ , En efecto:  $pV = R'T \implies (p_4/p_3) = (p_1/p_2) = V_{\min}/V_{\max}$  (Esto toma en cuenta las isotérmicas) Por lo tanto se demuestra que la ecuacion (1.13) es el rendimiento de Carnot.

$$n = 1 - T_f/T_c \quad (1.13)$$

Por consiguiente, si el regenerador es 100% eficiente, el motor Stirling tiene el potencial de alcanzar el rendimiento de Carnot.

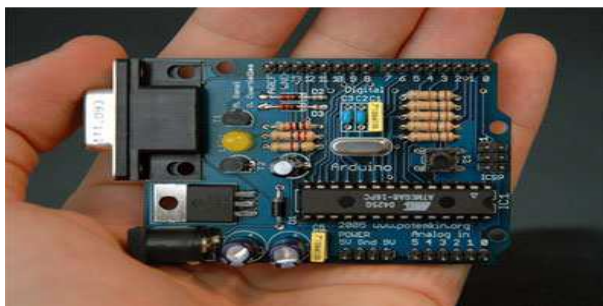
## 2.4 Dispositivos del sistema

El microcontrolador Arduino es una plataforma libre de computación de bajo coste basada en una placa de entrada-salida y en un entorno de desarrollo IDE que implementa el lenguaje Processing/WiringHardware. Arduino se puede usar para desarrollar objetos interactivos automáticos o conectarse a software en el ordenador (Pure Data, Flash, Processing; MaxMSP).

La placa es una placa de circuito impreso donde va instalado el microprocesador, la memoria, las conexiones de entrada y salida y la conexión para el puerto USB. A través de él se cargan las instrucciones a ejecutar según la programación, el programa que es realizado en el entorno de programación de Arduino. Comunicación Arduino-Ordenador.

Microprocesador.- realiza las instrucciones almacenadas en el programa de forma cíclica. Es un circuito integrado que contiene muchas de las mismas cualidades que una computadora. Escribe en los pines DS2-13 y lee en los DE2-13 AE0-5. Pines de entrada y salida: Permiten conectar elemento que dan información y crean actuaciones.

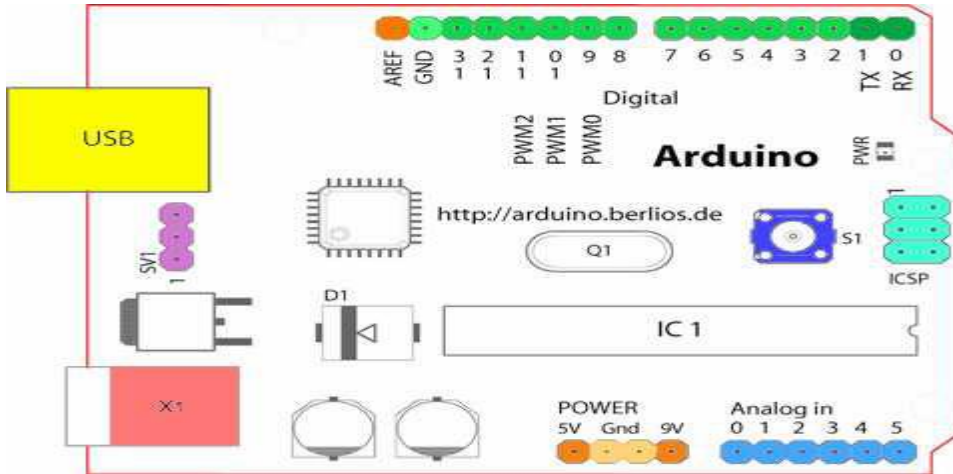
**Botón de reset.-** Permite resetear el programa y permite cargar uno nuevo.



*Fig. 2.16 Placa Arduino.*



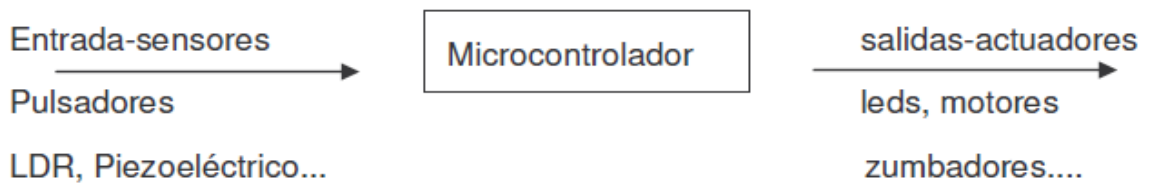
## Elementos del microcontrolador.



*Fig.2.17 Elementos del microcontrolador.*

**Aref.-** Pin de referencia analógica (naranja); **GND.-** Señal de tierra digital (verde claro); **Pines digitales 2-13.-** Entrada y salida (verde); **Pines digitales 0-1 / entrada y salida del puerto serie TX/RX** (verde oscuro); **Botón de reset.-** Pulsador (azul oscuro); **Pines de entrada analógica 0-5.-** (azul claro); **Pines de alimentación y tierra.-** (fuerza.- naranja, tierra.- naranja claro); **Entrada de la fuente de alimentación externa (9-12V DC) X1.-** (rosa); **Puerto USB.-** (amarillo).

**Entradas y salidas.-** El microcontrolador recibe información de las entradas, la procesa y escribe un 1 o un 0 (5v o 0v) en las salidas, actuando sobre el dispositivo que tenemos conectado. Al microcontrolador por lo tanto conectamos unos sensores a la entrada y unos actuadores a la salida, para que en función del programa y de la lectura de los sensores se produzcan una serie de actuaciones.



*Fig.2.18 Entradas y salidas del microcontrolador.*

Una señal es analógica cuando puede tomar infinitos valores entre su valor mínimo y máximo. Elementos analógicos: Potenciómetro, ldr, ntc, Zumbador, motor eléctrico, Led. Una señal es digital cuando solo puede tomar 2 valores, el máximo asociado a 1 o acierto "on" y el mínimo asociado a cero, falso o "off". Elementos digitales: pulsador, detector de presencia, led, timbre.

## 3. Desarrollo

### 3.1 Componentes de la plataforma de seguimiento solar

Motores eléctricos: motores eléctricos DC o AC para conducir los discos mecánicos, a través de corriente, frecuencia o control de velocidad; Almacenaje de la batería: copia de seguridad de sistema de batería para alimentación almacenamiento y puesta en marcha alimentación requisitos; Algoritmo de posición solar: algoritmo para calcular continuamente el vector sol  $S_Q(s, s)$ , como acimut solar y los ángulos de elevación.

Dispositivos de subsistemas de detección de movimiento: codificadores de eje rotacional o lineal, inclinación, fotodiodos, sensores, resistencias fotosensibles para monitorear la posición del plato mientras que se mueve a la posición deseada; Subsistema de la unidad de control: dispositivo programable para coordinar los modos de operación, así como la estrategia de control para posicionar el sistema según las coordenadas del algoritmo o sensor de la posición solar;

Capacidad de carga: el subsistema colector solar, típicamente un sistema óptico, elemento, objetivo, colector, reflector o plato con la cosecha solar asociado significa (es decir, Stirling módulo fotovoltaico motor/dispositivo o concentrado mecánicamente montado en el centro de un plato de tipo parabólico).

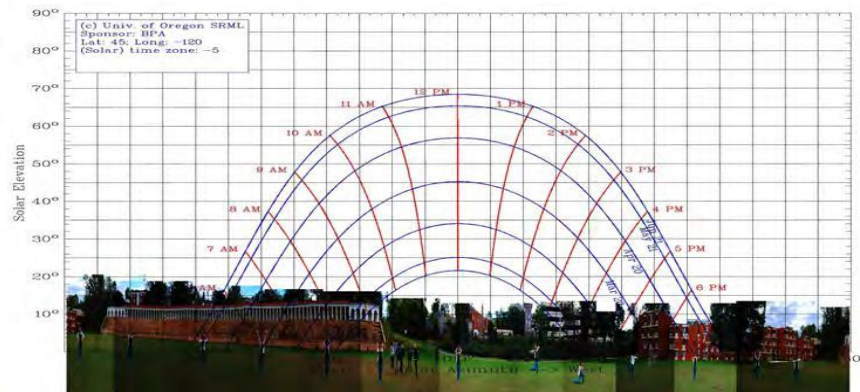
### 3.2 Principios de seguimiento solar

Un ejemplo demostrado antes, figura 3.1 muestra los vectores solares para un camino solar que debe ser seguido por un sistema de seguimiento solar. Esta secuencia de sol vectores deben ser rastreados por unidades de motor en un sitio de instalación-Instalación solar para una ubicación geográfica determinada antes de empezar cualquier solar cosecha.

Figura 3.1 muestra los contornos de la ruta de sol para un sitio de ubicación de ejemplo. Estos caminos de sol típicamente se calculan a partir del algoritmo de posición solar SPA como una secuencia de vector solar y es utilizado por el controlador de la energía solar sistema de seguimiento plataforma para ese sitio.

Figura 3.1 también muestra la estimada energía solar disponible en esa ubicación particular, datos que normalmente se obtuvieron de modelos solares de DNI para ese lugar en particular. De esta manera, el DNI también puede utilizarse para predecir la cantidad de energía solar disponible para ese lugar, o la información

puede utilizarse para evaluar la viabilidad de instalar un sistema de energía solar en el sitio en una base de un priorato.



**Fig. 3.1** Diagrama de camino del sol en coordenadas Cartesianas, que muestra el acimut y de elevación de la trayectoria diurna del sol en un lugar determinado

El plato de concentrador solar debe seguir dinámicamente el movimiento del sol durante toda la duración del día en ángulos azimutal y cenital. El responsable de la colocación correcta en el ángulo del acimut actuador se conoce como la impulsión del acimut mientras que el actuador de la posición correcta en el ángulo de elevación es conocido como la unidad de altura.

En general, dispositivos de seguimiento solar a dos ejes están diseñados para mejorar el rendimiento de colectores solares siguiendo las posiciones del sol. Sistemas de seguimiento solar seguimiento las vigas normales del sol directamente y aumenta el rendimiento de colectores solares por alrededor del 50% en verano y alrededor del 30% en invierno para una condición de cielo despejado.

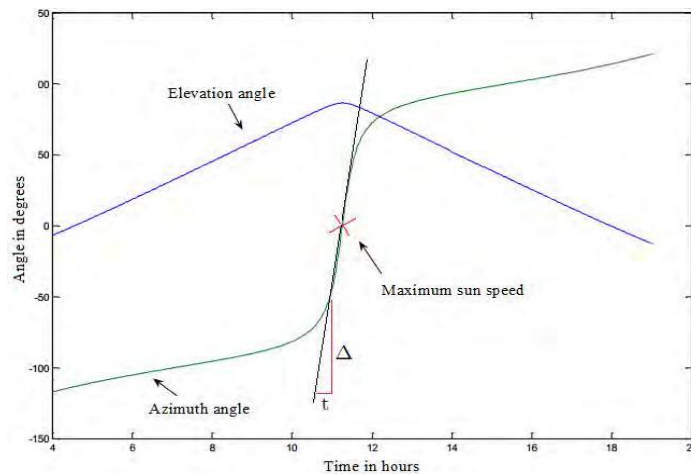
En el seguimiento solar de acimut y de elevación, el sistema de energía solar concentrada aprovecha energía solar mediante la rotación en el plano de acimut paralelo con el horizonte, así como en la elevación plano perpendicular al horizonte. Este movimiento doble eje permite el plato parabólico para moverse hacia arriba o hacia abajo dirección así como de izquierda a derecha para seguir el movimiento del sol durante todo el día.

Figura 3.2 ilustra un mecanismo de seguimiento solar concentrado de inclinación y oscilación de doble eje contrapeso y plataforma (Wilson, 2014). Una unidad lineal ajusta el movimiento o elevación ángulo Movimiento tilt del concentrador solar mientras que un impulsor rotatorio ajusta el desplazamiento o movimiento de acimut de la concentradora de seguimiento solar.



**Fig. 3.2** Eje de contrapeso de inclinación y giro se concentró plataforma de seguimiento solar de doble (Wilson, 2014).

Durante el seguimiento solar, la plataforma de seguimiento solar y energía conversión significa que convierte energía térmica en electricidad utilizando una matriz de espejo para enfocar los rayos de sol en el extremo receptor de un motor Stirling, que se calienta y se expande un gas. La presión creada por el expansión el gas impulsa un pistón, cigüeñal y eje que gira un generador de electricidad pequeñas.



**Fig. 3.3** Ángulos solares de acimut y elevación de la ruta de sol durante el día para un cierto lugar geográfico, con la pendiente de la representación de curva de acimut de la velocidad de movimiento máxima sol superpuesta.

Con referencia a la figura 3.3, uno puede determinar la velocidad del sol en grados por minuto utilizando los parámetros obtenidos de la figura en el punto de máxima pendiente en la fórmula dada en la ecuación (1.14).

$$Velocidad_{solar} \left( \frac{\text{grados}}{\text{min}} \right) = \frac{Angulo_{solar} (\text{grados})}{t (\text{min})} \quad (1.14)$$

Ecuación de (1.14) calcula la velocidad del sol en grados por minuto. Sin embargo, para relacionar la velocidad del sol a la velocidad del motor, debemos convertir la velocidad del sol a las revoluciones por Acta (rpm o RPM). Por lo tanto uno puede determinar la velocidad del sol en rpm dividiendo por 360 como en la ecuación 2.2 abajo.

$$Velocidad_{solar}(rpm) = \frac{Velocidad_{solar}(\frac{grados}{min})}{360} \quad (2.2)$$

Dependiendo de la ubicación del observador, la ecuación 2.2 demostrará que el sol se mueve en promedio a una velocidad angular de alrededor de 0.25 por minuto. Así, en el más rápido movimiento eje de seguimiento solar, es decir, el eje de Azimut (véase la figura 3.3), el eje del seguidor solar debe alcanzar una velocidad angular del movimiento de al menos 0.25 = min para mantenerse al día con el movimiento relativo del sol.

Los motores eléctricos normalmente se mueven a una velocidad de alrededor de 1750-2000 rpm. Esto significa que un motor eléctrico por sí mismo así no alcanzaría tal lentitud de movimiento adecuada para el seguimiento solar en coche. Por lo tanto un sistema de impulsión o transmisión de engranaje es necesario para la velocidad del engranaje-abajo motor proporcionando suficiente esfuerzo de torsión a velocidades más lentas del seguimiento solar.

Este sistema de seguimiento solar puede funcionar en modo cerrado bajo dirección de cuatro sensores de Foto receptor dos para cada eje de movimiento, o alternativamente en el modo de lazo abierto utilizando el astronómico basado en cálculos de posición del sol. En el modo de control de lazo abierto, los controles de microprocesador solares seguimiento usando vectores solares calculado con un algoritmo de posición solar.

La intensidad de la radiación solar recogida por los sensores se alimenta a un sistema de control electrónico que determina si el seguidor está colocado perpendicular al sol. Cualquier diferencia en la intensidad se traduce en movimientos motores que regulan la posición del seguidor solar. Cuando la intensidad solar diferencial captada por los sensores solares es cero, entonces los motores se detendrán.

### **3.3 Determinación de la posición del sol**

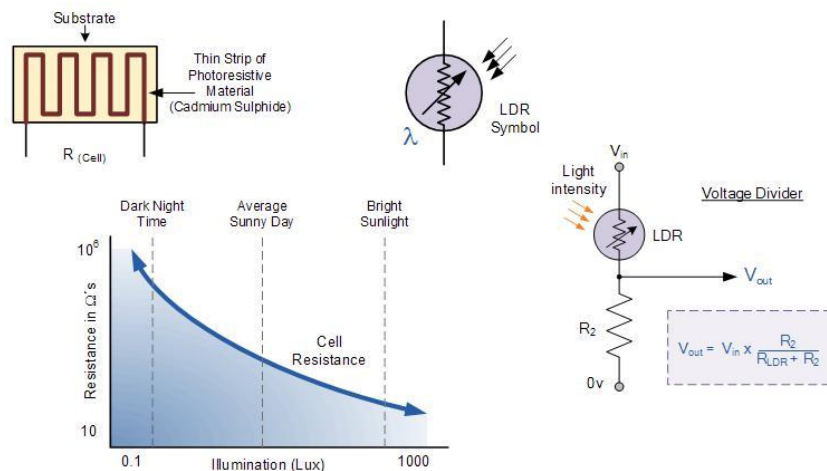
Puesto que la precisión y estabilidad son dos de los parámetros de diseño primaria para un sistema de seguimiento solar, diferentes opciones de estrategia de control

se han propuesto, probados y divulgados en la literatura general. Estos incluyen sistemas de control de lazo abierto, lazo cerrado de control y en algunos casos se combinan un sistema de control integrado o circuito híbrido en lazo abierto y lazo cerrado.

Hay cuatro categorías principales de elementos de control que deberán ser considerados en los controladores de lazo abierto y lazo cerrado para cumplir los criterios de diseño para este estudio. Estos incluyen los siguientes **Posición del sol.-** para determinar el vector sol  $S_{\alpha}$  ( $s, s$ ) de la ubicación del sistema CSP; **Sistema de impulsión eficaz.-** para poder mover la estructura eficientemente para que apunte directamente hacia el sol;

**Entradas de control.-** tipo de control de insumos a utilizar, por ejemplo sol algoritmo de vector, fotodiodos o cámara; **Sistema de control.-** Control de secuencia y la inteligencia de diagramas de estado para administrar las unidades que mueven la carga o sistema de energía de Stirling y motores eléctricos para su buen funcionamiento.

Una resistencia de dependiente de la luz (LDR) o foto-resistor opera bajo el principio de foto con producción en la que la resistencia de un semiconductor disminuye su exposición a los aumentos de la intensidad de la luz. El semiconductor absorbe la energía de la luz, haciendo que los electrones libres a moverse sobre el silicio-boquete de la venda, así disminuir la resistencia del dispositivo.



**Fig. 3.4** Resistor dependiente de la luz

En la figura 3.4 allí se muestra el sustrato con el gráfico de respuesta de voltaje de un LDR. Un LDR es también conocido como un Sensor de luz. Este es un dispositivo pasivo que convierte la energía de la luz solar visible o infrarroja en una salida de señal o resistencia eléctrica. La LDR puede utilizarse en una



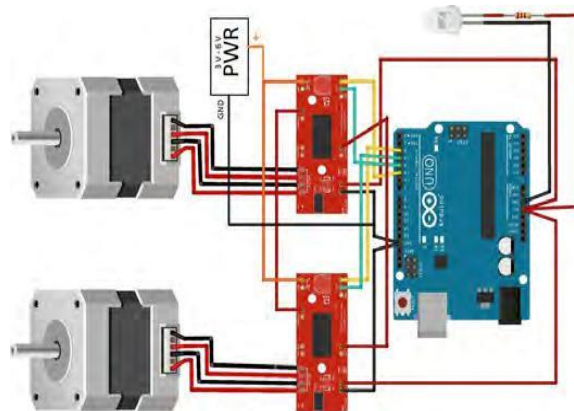
configuración de divisor de voltaje típico, como se muestra en la ilustración derecha.

Dispositivos sensibles a la foto y los principios detrás de su operación se utilizan en el control de lazo cerrado para sistemas de seguimiento solar. En estas soluciones, sensores sensibles a la luz o los detectores de infrarrojos se pueden emplear para seguimiento autónomo directa del sol o para afinar el posicionamiento del plato parabólico.

En general, las señales diferenciales de estos dispositivos se utilizan en salida circuitos de equilibrio para compensar las diferencias en las características del componente o cambios en los niveles de sensibilidad a la luz. En algunos diseños de seguimiento solar, ángulo doble de seguimiento se logra con ranura óptica fotodiodo sensor arreglos de discos que se utiliza para detectar si un plato solar se ha orientado hacia la posición solar.

Estos sensores auto-guiados hacia el blanco del fotodiodo se montan típicamente en la estructura del plato parabólico para ayudar con la regeneración en el mecanismo de control para ajustar el plato colector a una posición directamente frente al sol. Fototransistores tienen el beneficio adicional que puede conectarse en circuitos actuales para conducir los motores servo, así físicamente al mando de las unidades que dirige el mecanismo del plato parabólico.

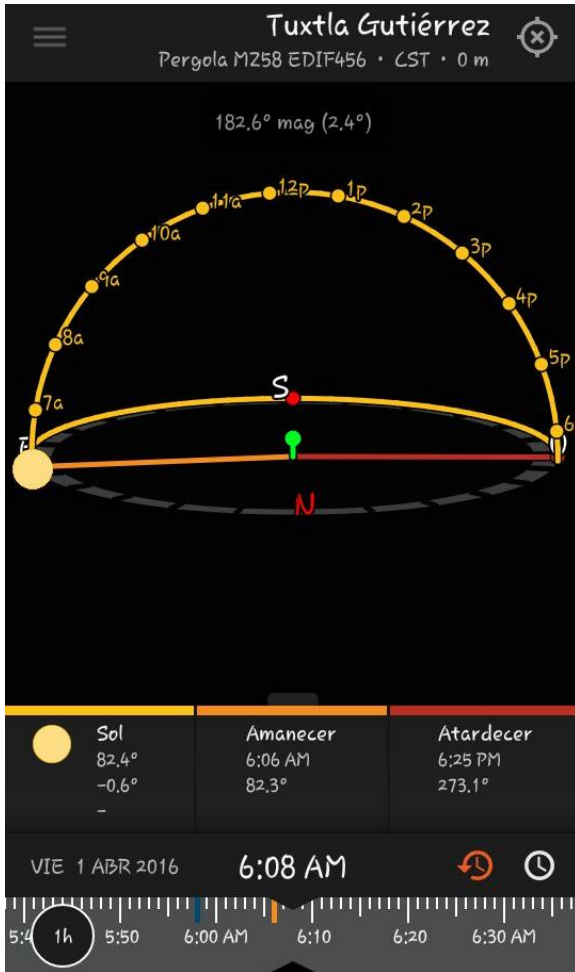
Para seguimiento solar con motores paso a paso, el proceso es muy similar. A modo del dibujo de la figura 3.5 ilustra dos motores paso a paso controlados a través de un procesador de Arduino y un puente H L298N. Esta aplicación utiliza el controlador de motor paso a paso EasyDriver como alta interfaz actual entre el motor y la electrónica delicada del procesador Arduino.



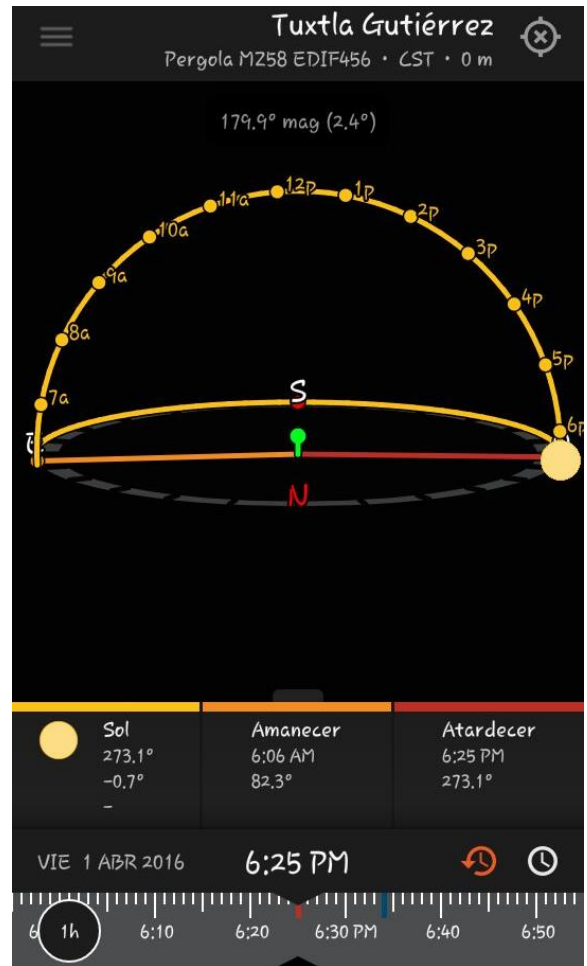
**Fig. 3.5** Ciénaga acimut y elevación eje motor que controlan el pulso del motor paso a paso.

Para comprobar exactamente la posición del Sol se usó un Software para Sistema Android llamado **Sun Surveyor**. Con esta aplicación se puede saber exactamente la posición del sol en que se encuentra en cualquier momento, también así sabiendo su hora de salida, y hora de entrada, también su ángulo de inclinación.

En la figura 3.6 se puede observar la hora en que sale el sol (6:08am), esta hora va dependiendo también del mes en que se encuentre. Y en la figura 3.7 se puede observar la hora en que se oculta (6:25pm).



**Fig.3.6** Hora de salida del sol (01-/Abril/2016).



**Fig.3.7** Hora de entrada del sol



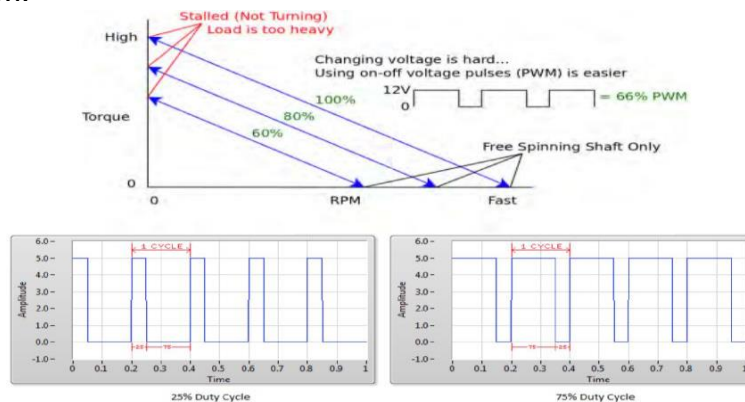
## 4. Resultados

### 4.1 Control del motor por modulación de anchos de pulsos (PWM)

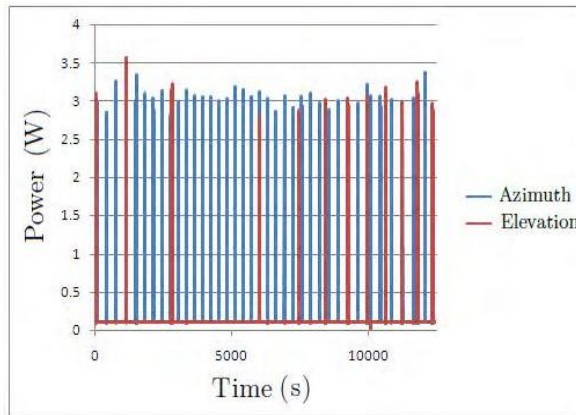
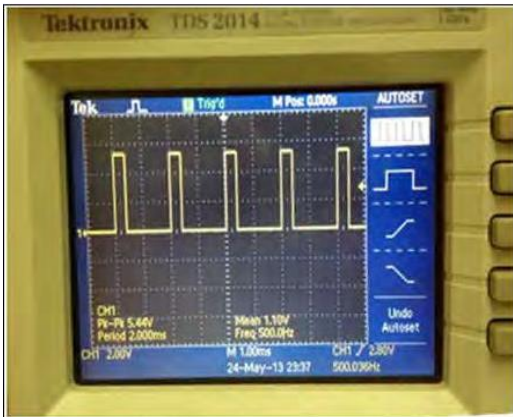
La frecuencia determina qué tan rápido el PWM completa un ciclo es decir, 1000 Hz sería 1000 ciclos por segundo, y por lo tanto, qué tan rápido cambia entre alto y bajo Estados. Apagando una señal digital y a un ritmo lo suficientemente rápido y con un determinado ciclo de trabajo, la salida parece comportarse como una señal analógica de tensión constante cuando se proporciona energía a los dispositivos.

La principal ventaja del control de motor de PWM es que la pérdida de energía en los dispositivos de conmutación es muy baja. Esto es especialmente valioso en aplicaciones de seguimiento solar fuera de la red donde el presupuesto de alimentación es crítico para la supervivencia del sistema. Cualquier consumo innecesario debe ser limitado, y con control PWM, cuando un interruptor está apagado no hay prácticamente ninguna corriente.

Cuando PWM y el poder se transfiere a la carga, no hay casi ninguna caída de voltaje en el interruptor. Puesto que la pérdida de potencia es el producto del voltaje y actual, para el control de PWM ambos casos están cerca de cero. PWM por lo tanto funciona bien con control de seguimiento solar digital, debido a la naturaleza encendido/apagado del PWM el ciclo de trabajo puede seleccionarse o el movimiento angular se puede computar directamente en términos del número de pulsos PWM.



**Fig. 4.1** Ejemplo de PWM par vs RPM para varios ciclos de trabajo (parte superior) y la señal PWM de dominio de tiempo (inferior).



**Fig. 4.2** Tiempo de secuencias muestreadas en el acimut y elevación

La figura muestra el tiempo de secuencias muestreadas en el acimut y elevación puente H en las salidas del motor, medido en los controladores de motor de alimentación directamente en los ejes de acimut y elevación a motores. Los niveles de potencia medidos en estos tiempos PWM destaca la potencia de salida entregada en las salidas de señal del motor controlador PWM y representa los niveles de consumo de energía de la serie drive DC motor actuador.

## 5. Referencias

- [1] Aaron Weiss (2010). Example Sketh for Arduino TinyGPS. Sparkfun electronics, USA, no. Au-gust, pp. 1-3.  
[https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Dev/Arduino/Boards/gps\\_arduino\\_1\\_0.ino](https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Dev/Arduino/Boards/gps_arduino_1_0.ino)
- [2] Adene Energy (2013). Promotion of tri-generation technologies in the tertiary instritutions. No. 128, pp. 1-6.  
<http://www.managenergy.net/download/nr128.pdf>
- [3] Aktuator (2014). Sun tracking system - a device for orienting a solar panel or to hold a solar reflector or lens pointed at the sun, like heliostats.  
[http://www.aktuator.ru/Solar\\_Actuator/](http://www.aktuator.ru/Solar_Actuator/)
- [4] American Clean energy (2014). Solar Power Green Savings Calculator. <http://americancleanenergy.com/about-solar>
- [5] Autodesk (2014a). Energy Analysis Charts and Tables.  
[http://help.autodesk.com/view/RVT/2015/ENU/?guid= GUID 51F923AF-836B-4B64-B9FA-BB8288A06004](http://help.autodesk.com/view/RVT/2015/ENU/?guid=GUID_51F923AF-836B-4B64-B9FA-BB8288A06004)

[6] Badea, N. and Voncila, I. (2012). Analysis by indicators performance of the conceptual structures mCCHP-SE using renewable energy sources. Journal of Energy and Power Engineering, vol. 6, pp. 1597–1604.

[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5628492](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5628492)

[7] Berland, B. (2013). Photovoltaic Technologies Beyond the Horizon : Optical Rectenna Solar Cell Final Report Photovoltaic Technologies Beyond the Horizon : Optical Rectenna Solar Cell Final Report. NREL/SR-520-33263 , ITN Energy Systems, Inc. Littleton, Colorado, , no. February, pp. 1–21.

[8] Boxwell, M. and Glasbey, S. (2014). Solar Electricity Handbook

<http://solarelectricityhandbook.com/solar-questions>.

<http://www.solarelectricityhandbook.com/solar-calculator.html>

[9] Catarius, A. (2010). Azimuth-altitude dual axis solar tracker. Ph.D. thesis.

[http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-121710-140419/unrestricted/Dual\\_Axis\\_Tracker\\_Final\\_Report.pdf](http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-121710-140419/unrestricted/Dual_Axis_Tracker_Final_Report.pdf)

[10] Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B. and Leahy, M. (2010 Aprilb). A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. Applied Energy, vol. 87, no. 4, pp. 1059–1082. ISSN 03062619.

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261909004188><http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261909004188>

[11] Energizar(2014)SolarTracker[http://www.energizar.org.ar/energizar\\_desarrollo\\_tecnologico\\_seguidor\\_solar\\_que\\_es.html](http://www.energizar.org.ar/energizar_desarrollo_tecnologico_seguidor_solar_que_es.html)[http://www.energizar.org.ar/energizar\\_desarrollo\\_tecnologico\\_seguidor\\_solar\\_como\\_funciona.html](http://www.energizar.org.ar/energizar_desarrollo_tecnologico_seguidor_solar_como_funciona.html)[http://www.energizar.org.ar/energizar\\_desarrollo\\_tecnologico\\_energia\\_solar.html](http://www.energizar.org.ar/energizar_desarrollo_tecnologico_energia_solar.html)

## Anexo

### Programación

```
#include <Servo.h>
int const leftSensorPin = A0;
int const rightSensorPin = A1;
```

```
Servo myServo;
```

```
int angle = 90;
int leftSensorValue = 0;
int rightSensorValue = 0;
```

```

// Es casi imposible que left y right sean exactamente iguales por lo que el motor
// no se detendra, le voy a poner un colchon en el que considere left = right para
// que se detenga cuando esté en ese rango. Este valor se puede ir ajustando para
lograr
// la precisión deseada sin que perjudique el funcionamiento del sistema
int colchon = 50;

void setup(){
myServo.attach(11);
Serial.begin(9600);
// Ponemos inicialmente el motor en 2º, no usar 0, puede dar vibraciones en el
motor
// si este no consigue alcanzar los 0º
myServo.write(angle);
}

void loop(){
leftSensorValue = analogRead(leftSensorPin);
delay(10);
rightSensorValue = analogRead(rightSensorPin);
delay(10);
Serial.print("Left Sensor Value: ");
Serial.print(leftSensorValue);
Serial.print(" - Right Sensor Value: ");
Serial.print(rightSensorValue);
Serial.print(" - Angle: ");
Serial.println(angle);

if (rightSensorValue > leftSensorValue && angle > 5 && rightSensorValue-
leftSensorValue > colchon){
angle = angle - 5;
myServo.write(angle);
}
if (rightSensorValue < leftSensorValue && angle < 175 && leftSensorValue-
rightSensorValue > colchon){
angle = angle + 5;
myServo.write(angle);
}
Else
//Este equilibrado, no mover
delay(15); // Ponemos un delay para que la placa pueda procesar los valores
}

```

**El código es sencillo pero al ser el primero se explicará paso a paso:**

```
#include <Servo.h>
```

```

int const leftSensorPin = A0;
int const rightSensorPin = A1;
Servo myServo;
int angle = 90;
int leftSensorValue = 0;
int rightSensorValue = 0;
// left y right nunca seran iguales asi que el motor siempre gira hasta el tope
// le voy a poner un colchon en el que considere left = right para que se detenga
int colchon = 50;

```

Aquí se realiza la declaración de variables, para poder usar los motores paso a paso importamos la librería servo.h que viene con el IDE de Arduino de serie. Creamos una objeto myServo que será la que apunte a nuestro motor. El resto de variables son las ordinarias de cualquier programa: el pin del sensor izquierdo (A0), el pin del sensor derecho (A1), y los valores iniciales de mis variables del programa.

En los pin A1 y A0 se lee la tensión en el divisor de tensión que forman la fotorresistencia y la resistencia que lo conecta a tierra. Esta tensión será proporcional a la luz que incida sobre la fotorresistencia

```

void setup(){
myServo.attach(11);
Serial.begin(9600);
//Ponemos inicialmente el motor en 2º, no usar 0, puede dar problemas
myServo.write(angle);
}

```

En el código de inicialización se indica que myServo se encuentra en el pin 11, que es a dónde conectamos el cable de datos de nuestro servo. Abrimos un puerto serial de comunicación para imprimir en pantalla y poder controlar los datos. Finalmente ponemos el motor en su posición inicial con la función **write** del objeto myServo (incluida por defecto en la librería servo.h).

### **Por último, el bucle:**

```

void loop(){
leftSensorValue = analogRead(leftSensorPin);
delay(10);
rightSensorValue = analogRead(rightSensorPin);
delay(10);
Serial.print("Left Sensor Value: ");
Serial.print(leftSensorValue);
Serial.print(" - Right Sensor Value: ");
Serial.print(rightSensorValue);
Serial.print(" - Angle: ");

```

```

Serial.println(angle);

if (rightSensorValue > leftSensorValue && angle > 5 && rightSensorValue-
leftSensorValue > colchon){
angle = angle - 5;
myServo.write(angle);
}
if (rightSensorValue < leftSensorValue && angle < 175 && leftSensorValue-
rightSensorValue > colchon){
angle = angle + 5;
myServo.write(angle);
}
else
//Este equilibrado, no mover
delay(15);
}

```

Lee el valor del sensor derecho y del izquierdo con un delay para dar tiempo a la lectura de la placa, que no es inmediata. Imprime por pantalla los valores que leen los sensores y el ángulo en el que se encuentra el servo. Finalmente se realiza la comparación para comprobar si es necesario mover el motor con dos if. Explicaré el primero de ellos el segundo es análogo.

Comprueba si la lectura del sensor derecho es mayor que la del izquierdo **Y** si el ángulo es mayor de 5° mi motor vibra si trato de rotarlo más hacia 0° **Y** si la diferencia de lecturas valor del sensor derecho menos izquierdo es mayor que el colchón; si se cumplen simultáneamente las tres condiciones rota el motor hacia la derecha 5° (ángulo = ángulo – 5°; si hubiese usado 2° de rotación, en el if hubiera usado 2° en lugar de 5° también).

Esto es para no llevar el motor hasta los 0° dónde se producen vibraciones en mi motor) rotando el motor de nuevo con la función write. Realizo una comprobación similar para ver si tengo que rotar a la izquierda. Si no se cumplen ninguno de los dos condicionales, el motor está equilibrado (la diferencia de lecturas será inferior al colchón o estará en su tope de movimiento) con lo cual no haré nada.

De momento está funcionando bastante bien. Iré ajustando el colchón cuando haya incorporado la placa fotovoltaica al sistema para tratar de que sea lo más sensible posible. También incluiremos un condensador de desacoplamiento cuando el motor tenga que mover la placa fotovoltaica para evitar las caídas de tensión en la placa Arduino durante el arranque del motor ya que este absorbe más corriente en el arranque que cuando se está ya moviendo.

## Conclusión

Las conclusiones sacadas son buenas y satisfactorias, ya que hemos logrado crear un sistema que tiene buen comportamiento y se cumple con los objetivos planteados inicialmente. El sistema funciona bien y es capaz de seguir cualquier rango de luz y variar la velocidad del motor de continua para así seguir de manera satisfactoria el error entre los sensores.

Se han utilizado componentes de bajo coste unidos a un bajo consumo de energía para controlar el dispositivo. Personalmente las conclusiones son positivas, ya que hemos puesto en práctica buena parte de los conceptos y conocimientos que hemos ido adquiriendo durante nuestra formación en la ingeniería y hemos sido capaces de solventar los problemas que nos han surgido de una manera real.

**Trabajos futuros que se pueden desarrollar.-** Incorporar una batería y un sistema de carga de esta a través de un módulo fotovoltaico; Comprobar otros algoritmos de seguimiento; Comparar experimentalmente las prestaciones de este seguidor con una estación solar fija; Diseñar un sistema de transmisión que conecte el seguidor diseñado con un teléfono móvil.