

Prototipo electrónico de seguimiento solar sin sensores

Electronic prototype of monitoring solar without sensors

FRANCO-MARTINEZ, David†*, HERRERA-GOMEZ, Juan Alberto y MONROY-CARREÑO, Roberto

Centro Tecnológico, Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM

ID 1^{er} Autor: *David, Franco-Martinez / CVU CONACYT ID: 69978*

ID 1^{er} Coautor: *Juan Alberto, Herrera-Gomez*

ID 2^{do} Coautor: *Roberto, Monroy-Carreño*

Recibido Agosto 20, 2018; Aceptado Noviembre 30, 2018

Resumen

Se presenta el desarrollo de un prototipo electrónico de seguimiento solar que optimiza la captación de la irradiación solar de un concentrador cilíndrico parabólico, sin el uso de sensores fotosensibles para evitar conflictos con el contexto que le rodea y que sea de un costo accesible. Se describen los elementos que conforman el sistema electrónico, así como el proceso de seguimiento solar, también se mencionan las características de los componentes utilizados en el desarrollo del prototipo. Se explica el diseño del circuito electrónico seguidor solar, detallando cada una de las etapas que lo componen, así como el método utilizado para el diseño de un algoritmo que realice la función de seguimiento solar, se presentan los resultados de las simulaciones del software desarrollado. Al analizar los datos de los ángulos medidos con los calculados, se pudo observar que la diferencia era pequeña, el error permisible es de 5° para que este se encuentre en el punto óptimo de radiación solar, por lo cual indica que nuestro sistema satisface las necesidades, además que reduce en 2° el error. Por lo cual el sistema propuesto es funcional y cumple con lo requerido, además mantiene un costo bajo.

Seguidor, Solar, Concentrador

Abstract

The development of an electronic solar tracking prototype that optimizes the capture of solar radiation from a parabolic cylindrical concentrator is presented, without the use of photosensitive sensors to avoid conflicts with the surrounding context and that is of an accessible cost. The elements that make up the electronic system are described, as well as the solar tracking process. The characteristics of the components used in the development of the prototype are also mentioned. The design of the solar electronic follower circuit is explained, detailing each of the stages that compose it, as well as the method used to design an algorithm that performs the solar tracking function. The results of the simulations of the developed software are presented. When analyzing the data of the angles measured with the calculated ones, it could be observed that the difference was small, the permissible error is 5 ° so that it is at the optimal point of solar radiation, which indicates that our system satisfies the needs, plus it reduces the error by 2°. Therefore, the proposed system is functional and complies with the requirements, in addition to maintaining a low cost.

Tracking, Solar, Concentrator

Citación: FRANCO-MARTINEZ, David, HERRERA-GOMEZ, Juan Alberto y MONROY-CARREÑO, Roberto. Prototipo electrónico de seguimiento solar sin sensores. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2018. 2-7: 14-35.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: (david_francom@hotmail.com)

Introducción

Se presenta el desarrollo de un prototipo electrónico de seguimiento solar que optimiza la captación de la irradiación solar de un concentrador cilíndrico parabólico, sin el uso de sensores fotosensibles para evitar conflictos con el contexto que le rodea y que sea de un costo accesible. Tomando en cuenta que los concentradores cilíndrico parabólicos (CCP) son diseñados con estructuras ligeras y de bajo costo, teniendo una buena eficiencia y alto rendimiento. Con este tipo de sistemas se puede obtener razones de concentración geométrica de 216 para seguimiento de un eje, la concentración geométrica, hace referencia a la relación que existe entre el área de abertura del colector y el área de recepción. (Kalogirou, 2004).

Esta es la tecnología con mayor desarrollo para producir calor a temperaturas altas, las cuales superen los 200°C , ya sea para generación de electricidad o para aplicaciones de calor de procesos. (Duffie and Beckman, 1991). Los concentradores cilíndricos parabólicos presentan una composición como la representada en la figura 1.

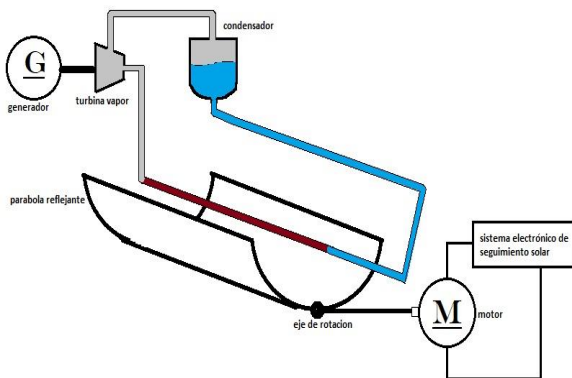


Figura 1 Diagrama del funcionamiento de un concentrador cilíndrico parabólico
Fuente: *Elaboración Propia*

En la anterior figura se observa los componentes de un sistema de concentración solar cilíndrico parabólico. Resalta entre sus componentes la estructura “parábola reflejante” la cual como su nombre lo indica refleja los rayos del sol concentrándolos en el “tubo concentrador” ubicado en el foco de la parábola.

De esta manera el agua contenida en el circuito de tuberías se calentará hasta alcanzar el punto de ebullición y se generará un flujo de vapor el cual se hace pasar a través de la “turbina”, dotando de movimiento a un generador eléctrico, posteriormente el vapor se dirige a un “condensador” el cual permite que el agua regrese a su estado líquido y se repita el ciclo.

Además, se observa que en la parte inferior de la parábola se encuentra un “eje de rotación” sobre el cual gira la parábola a lo largo del día siguiendo la trayectoria del sol, para que este movimiento sea posible es necesario un actuador electro-mecánico en este caso: un “motor” el cual a su vez es controlado por el “sistema electrónico de seguimiento solar” que contiene la configuración y los componentes electrónicos necesarios para realizar dicha función. La figura 2 ilustra los componentes del CCP utilizado en el desarrollo de esta tesis desde una vista frontal del mismo.

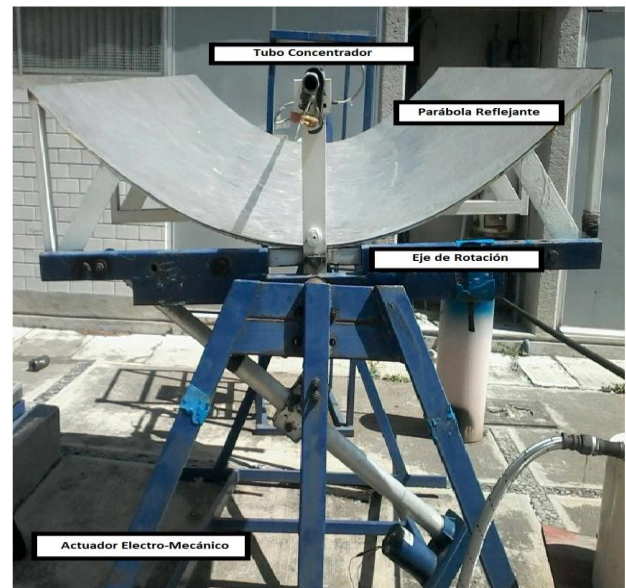


Figura 2 Vista frontal del Concentrador Cilíndrico Parabólico
Fuente: *Elaboración Propia*

El CCP fue construido por alumnos de Ingeniería Mecánica en el Centro Tecnológico Aragón; y cuenta con una parábola reflejante de aluminio, un chasis de hierro y un tubo concentrador de cobre, en la figura se indican puntos relevantes para la implementación del sistema electrónico de seguimiento solar, como el eje de rotación de la parábola y el actuador electro-mecánico, el cual es un motor de corriente directa acoplado mecánicamente a un tornillo sin fin por medio de un motor reductor. Este motor se detalla en capítulos posteriores de esta tesis.

1. Seguidor solar

Ya que los concentradores cilíndricos parabólicos, solo pueden aprovechar la radiación solar directa, exige que estos cuenten con un sistema que les permita el seguimiento de la trayectoria aparente del sol. El sistema más común para el seguimiento solar es un dispositivo que los posiciona en el punto óptimo por medio de un solo eje. (Hernández, Pérez & Bravo, 2009). Los sistemas de seguimiento solar tienen como objetivo, permitir que el colector se sitúe en la posición óptima para captar la mayor irradiación solar, que siga la trayectoria aparente del sol tanto en condiciones climáticas favorables como desfavorables (por ejemplo días nublados), que permita que el concentrador se sitúe en su posición inicial al final del día, y que funcione como un sistema de seguridad, manteniendo el equipo dentro de ciertos límites de movimiento.

Para ello se requiere de un sistema electrónico, a palabra sistema tiene un sinnúmero de interpretaciones, en aspectos generales concuerdan con que es un conjunto de elementos interactuantes con un propósito en común. Por su parte la electrónica ha tenido un gran avance en los últimos años y de alguna forma se ha vuelto vital para la vida cotidiana. Al desarrollar y evolucionar el uso de semiconductores para crear los dispositivos electrónicos discretos de estado sólido, las dimensiones de los sistemas se redujeron y se obtenían velocidades de operación extraordinarias.

Al analizar cualquier diseño de un sistema electrónico con una función específica, se puede representar con el diagrama de la figura 2.4.

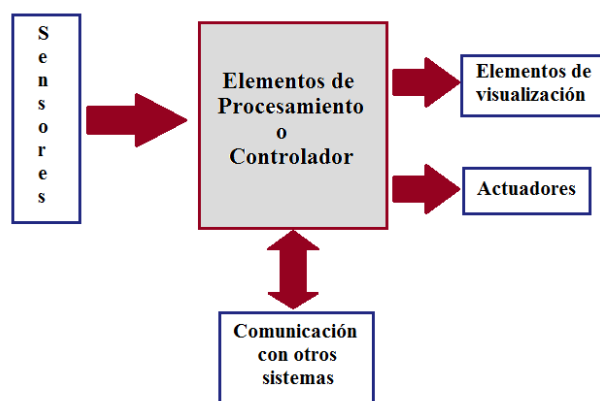


Figura 3 Diagrama a bloques de un Sistema electrónico
Fuente: Adaptado de SANTIAGO E (2012)

La funcionalidad que se le da al sistema viene definida por la necesidad del cliente, al plantear el diseño se toma en cuenta el contexto definido del problema. Al tener que solucionar alguna problemática el sistema tiene que tener entradas que lo relacionen con el medio ambiente lo cual se hace por medio de sensores.

El sensor tiene la finalidad de generar un formato reconocible para los elementos de procesamiento de la información que está en estudio. Tanto los actuadores como los elementos de visualización son las salidas de nuestro sistema. Los elementos de visualización son aquellos que muestran el estado actual y permiten tomar una decisión o recolectar datos. Por su parte los actuadores son aquellos que al analizar la información entrante permiten realizar una acción y modificar el ambiente.

Cuando un sistema es complejo se puede solucionar dividiendo este, de tal forma que se crean subsistemas más sencillos, que por medio de la comunicación permitirá la creación de interrelaciones entre estos. (SANTIAGO E, 2012). Utilizando el seguimiento, la energía total recibida en un día puede ser del orden de un 35% mayor que para el mismo colector estático.

Aunque este rendimiento se ve reducido en los casos de frecuentes nublados y en todas aquellas condiciones climatológicas en las que la relación entre la energía recibida por radiación directa y la recibida por radiación difusa tienda a disminuir, el aumento de energía así conseguido compensa sobradamente en muchos casos prácticos el consumo de energía y el costo de los propios mecanismos de seguimiento.

2. Trabajo previo al diseño del seguidor

De acuerdo con las necesidades del sistema mecánico para el cual se desarrolló el seguidor se deben mencionar los siguientes puntos:

Primero: el sistema de seguimiento solar funciona durante largos periodos de tiempo, de manera completamente autónoma.

Segundo: el sistema cuenta con un actuador electro mecánico el cual provee de movimiento a la parábola en determinados grados de libertad.

Tercero: el dispositivo se encuentra en la intemperie, por lo cual las condiciones atmosféricas afectan directamente al mismo, estas mismas nunca son idóneas y el sistema debe funcionar de manera constante sin importar los eventos climatológicos adversos.

En el diseño del seguidor solar se utilizó la agenda de alba y ocaso, en la cual se predice la fecha de amanecer y ocaso de un punto geográfico en base a sus coordenadas, Utilizando la localización más cercana al centro tecnológico para generar la agenda.

Por lo cual se utilizó la página www.sunearthtools.com (Francia) que es una página la cual cuenta con funciones como calculadoras de retorno de inversión fotovoltaica, calculadora de posición solar, convertidor de medidas y agenda de alba y ocaso, estas herramientas están basadas en las ecuaciones de J.J. Michalsky expuestas en el texto “Astronomical Algorithms, Meeus Jean (1991)”.

Cuando la herramienta terminó de realizar el cálculo genera una serie de tablas en la cual se muestra la hora de amanecer y ocaso de cada día del año, siendo un total de 2 datos por día, 720 datos totales por año, por lo cual se decidió realizar un promedio de las horas por mes para tener una menor cantidad de valores.

Al ser demasiados datos lo ideal es utilizar la media aritmética de los valores para cada mes, y así trabajar con solo 2 datos; la hora de amanecer y de ocaso promedio por mes (Tabla 1 ejemplo del mes de junio 2017).

Promedios junio 2017	
amanecer	ocaso
06:58:19	20:15:38

Tabla 1 Amanecer y ocaso promedio del mes de junio
Fuente: Adaptado de: *Sunearthtools*. (2009)

Posterior al cálculo de la hora de amanecer y ocaso promedio fue necesario el cálculo de la desviación estándar de dicho conjunto de datos, para simplificarlo fue necesario convertir cada dato de hora a segundos para así poder operar con números enteros; utilizando la ecuación para el cálculo de la desviación estándar.

Al sustituir los datos del amanecer para el mes de junio se obtuvo una desviación estándar de **3.399192** segundos, al realizar el proceso para la hora de ocaso se obtuvo **5.835063** segundos, y valores similares para otros conjuntos de datos correspondientes a otros meses del año. Por lo se decidió despreciar estos valores en el algoritmo.

3. Algoritmo de posicionamiento solar

Al conocer la hora de amanecer y ocaso de cada mes se logra proponer un algoritmo que permita saber la posición del sol durante el día, partiendo de la premisa en la que; nuestro concentrador solar parabólico se mueve en un único eje y describiendo una trayectoria de Este a Oeste, podemos determinar que tiene una exposición solar durante el día de 180° .

Lo primero que se necesita conocer son las horas totales de luz solar durante el día, este valor se calcula restando la hora de amanecer de la hora de ocaso.

$$h_{tl} = h_o \quad (1)$$

donde:

h_{tl} : son las horas de luz totales

h_o : la hora de ocaso

h_a : la hora de amanecer

Tomando el caso del mes junio del 2017; el valor de h_{tl} sería el siguiente:

$$h_{tl} = (20:15:38) - (06:58:19)$$

Sustituyendo horas a segundos y minutos a segundos:

$$h_{tl} = (20 * 3600 + 15 * 60 + 38) - (06 * 3600 + 58 * 60 + 19)$$

$$h_{tl} = (72938 \text{ segundos}) - (25099 \text{ segundos})$$

$$h_{tl} = 47839 \text{ segundos}$$

Se determinó que el sol se mueve 180° en función a un observador durante estas horas de luz de la siguiente manera:

$$t_{1^\circ} = \frac{h_{tl}}{180^\circ} \quad (2)$$

donde:

t_{1° : es el tiempo en el cual el sistema debe desplazarse 1°

Por lo cual si se aplican los valores obtenidos para h_{tl} en el ejemplo anterior:

$$t_{1^\circ} = \frac{47839 s}{180^\circ}$$

$$t_{1^\circ} = 257.7722 \text{ segundos}$$

Lo siguiente fue conocer la hora actual para poder asignar el angulo en el cual deveria estar posicionado el dispositivo en cada momento del dia, por lo cual se deben realizar lecturas del reloj de tiempo real (RTC) conectado al microcontrolador.

Suponiendo que la hora actual es 14:13:06 se realizó la conversion a segundos como se muestra en los ejemplos anteriores, por lo que:

$$h_r = (14 * 3600 + 13 * 60 + 6)$$

$$h_r = (51186 \text{ segundos})$$

Al realizar la lectura del reloj de tiempo real y obtener la fecha y hora actual en segundos es posible continuar con el calculo del angulo actual, entonces:

$$\alpha = \frac{h_{to} - h_r}{t_{1^\circ}} \tag{3}$$

Donde:

α es el angulo en el que debe situarse el dispositivo en la hora actual

h_r es la hora actual leida del RTC

Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuacion 3 se obtubo:

$$\alpha = \frac{72938 \text{ segundos} - 51186 \text{ segundos}}{257.7722^\circ}$$

$$\alpha = \frac{72938 \text{ segundos} - 51186 \text{ segundos}}{257.7722^\circ}$$

$$\alpha = \frac{21752 \text{ segundos}}{257.7722^\circ}$$

$$\alpha = 84.3853^\circ$$

Finalmente al conocer el angulo generado por el algoritmo anteriormente descrito, se pudo utilizar las diversas funciones del microcontrolador para poder proveer al dispositivo mecanico de un control de posicion; el cual permita seguir la trayectoria solar a lo largo del dia.

4. Diseño del seguidor solar

Una vez desarrollado el algoritmo el cual regira el funcionamiento del dispositivo microcontrlado se propone el siguiente sistema por etapas.

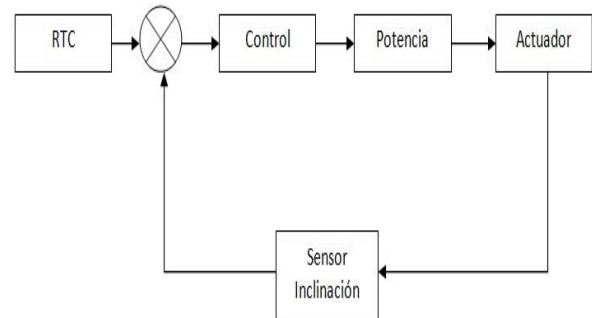


Figura 4 Diagrama de bloques del sistema electrónico de seguimiento solar

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 4 se observa que el reloj de tiempo real y el sensor de posicion proveen de variables, con las cuales la etapa de control realiza las configuraciones y calculos necesarios para proveer de señales de control a la etapa de potencia, la cual que dota de movimiento al actuador electro-mecanico.

4.1. Etapa de control

Esta es la etapa en la cual se realizan los calculos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema, durante el desarrollo del proyecto se indican una serie de puntos relacionadas a esta etapa, los cuales determinarian la composicion del sistema.

- a. El sistema necesita un dispositivo el cual provea de la hora y fecha actual para el calculo del angulo.
- b. El dispositivo debe contar con una interfase simple que permita la configuracion del mismo.
- c. El sistema debe de proveer señales de control las cuales permitan elegir la direccion de giro de un motor de CD.
- d. Para obtener la inclinacion de la parabola es necesario utilizar un sensor de inclinacion.

Por lo anterior es posible invertir el giro del motor para determinar el angulo en el cual se posicionara la parabola haciendo uso de 2 pines de entrada y salida digital del microcontrolador y de esta manera elegir la direccion en la que gira el motor con señales digitales las cuales cumplan con la siguiente tabla de verdad. (Tabla 2).

Salida microcontrolador		Accion del motor
Pin 0	Pin 1	
0	0	detenido
0	1	Giro izquierda
1	0	Giro derecha

Tabla 2 Tabla de funcionamiento del motor
Fuente: *Elaboración Propia*

Como se observa en la tabla anterior se describe un funcionamiento característico en el control de motores de corriente continua por lo cual lo adecuado es la implementación de un puente H, el cual es un circuito que nos permite controlar la dirección de un motor de estas cualidades con señales digitales de baja corriente. El cuarto punto indica la necesidad de conocer la posición de la parabola para poder realizar una comparación entre el ángulo que provee el algoritmo y el ángulo actual del dispositivo mecánico; y así poder elegir la dirección en la que debe girar el motor, hasta ajustarse en un punto en el cual estos ángulos sean iguales.

Existen múltiples dispositivos los cuales cumplen la función de sensor de inclinación, los cuales pueden ser analógicos o digitales, durante el proceso de desarrollo del proyecto se consideraron múltiples opciones, como sistemas resistivos acoplados mecánicamente al eje de rotación de la parabola del concentrador solar, esta opción fue considerada para el desarrollo de los primeros prototipos del circuito y la realización de pruebas de funcionamiento.

Para esto se optó por el uso de un sensor de aceleración micromecanizado capacitivo, el cual auxiliado de las funciones del microcontrolador como el convertidor Analógico-Digital y los puertos digitales del mismo, nos permita realizar el control de la posición del eje rotacional del mecanismo. Por último atendiendo a los cuatro puntos anteriores se utilizó el microcontrolador ATMEGA328P, debido a que cuenta con periféricos como: el puerto I²C ubicado en los pines 4 y 5 del puerto C el cual nos permitiera conectar el RTC, así mismo en dicho puerto conectaremos las terminales de nuestro sensor de posición; en los canales 0 y 1 del convertidor analógico a digital, el puerto B en el cual conectaremos el Display LCD y el puerto D en el cual conectaremos los controles que nos permitan modificar la fecha y la hora del RTC y las salidas que nos permitan controlar la dirección del giro del motor. Lo anterior se muestra en la siguiente figura 5.

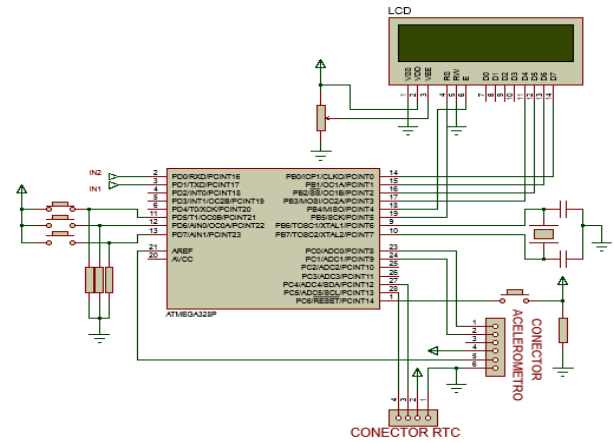


Figura 5 Diagrama de conexiones de la etapa de control
Fuente: *Elaboración Propia*

Controles

Los pines 11 (PD5), 12 (PD6) y 13 (PD7) funcionan como entradas digitales y a estas se conecta al módulo de controles (figura 7), conformado por pulsadores “push button” normalmente abiertos (B1, B2, B3), conectados a la fuente de alimentación Vcc. Cada uno de estos cuenta en su respectiva resistencia de “PULLDOWN” (RB1, RB2, RB3), que regulan la corriente que será recibida por los pines digitales del microcontrolador, cuando uno de estos pulsadores es presionado.

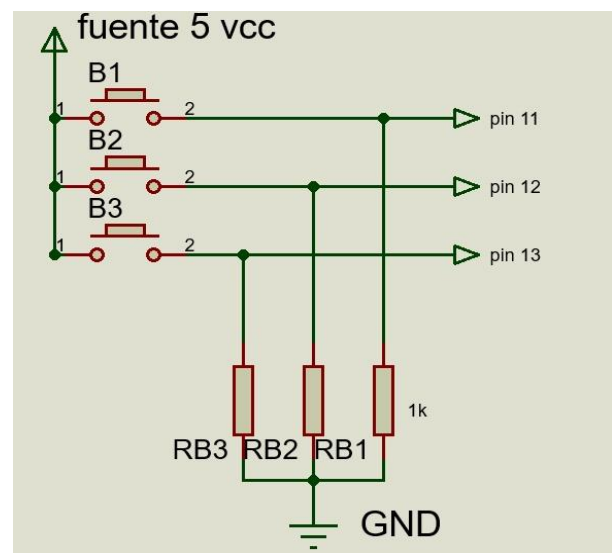


Figura 6 Diagrama de conexiones de los controles
Fuente: *Elaboración Propia*

4.2. Etapa de potencia

El microcontrolador cuenta con una salida de corriente en los pines de entrada y salida de 40 mA por lo cual al ser una corriente insuficiente para energizar el actuador electro-mecánico del dispositivo.

Es necesario implementar un circuito el cual suministre voltaje y corriente en magnitudes superiores a las que utiliza el microcontrolador, y necesarias para el funcionamiento del motor. Para ello se debe utilizar circuitos más robustos como transistores de potencia, transistores MOSFET, darlington, relevadores, etc.

Puente H

Un puente h es un circuito el cual permite determinar la dirección de giro de un motor eléctrico, existen circuitos integrados que cumplen con esta función, los cuales cuentan con uno o más puentes h dentro de ellos, algunos de estos son los circuitos L293d y el L298 los cuales permiten controlar motores con corrientes nominales de 2 y 4 amperes respectivamente, o bien pueden ser construidos con dispositivos como transistores (figura 7) o inclusive relevadores.

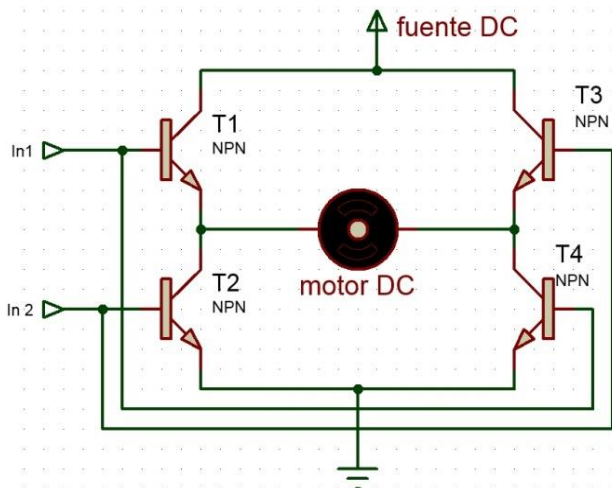


Figura 7 Circuito característico de un puente h realizado con transistores npn

Fuente: *Elaboración Propia*

El circuito con transistores permite determinar el sentido en el que energizamos el motor; al administrar un voltaje lógico en la entrada In1 los transistores T1 y T4 pasarán a modo saturación mientras T3 y T2 se mantendrán en corte permitiendo el giro del motor hacia el lado izquierdo, y al alimentar las bases de los transistores T2 y T3 estos pasarán a saturación mientras T1 y T4 se mantendrán en corte permitiendo el flujo de la corriente en sentido contrario, haciendo girar el motor hacia la derecha.

Puente H L298

Durante el desarrollo del prototipo se usaron ambos tipos de puentes h, de manera experimental se implementó una etapa de potencia basada en el circuito integrado L298 (Figura 8) el cual permite operar con corrientes de 2 amperes conectado de manera normal y hasta 4 amperes conectando en paralelo los 2 puentes con los que cuenta el circuito.

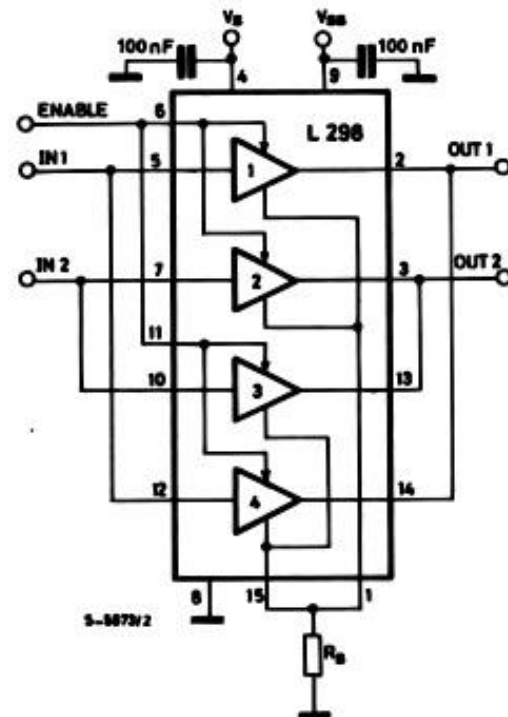


Figura 8 Circuito L298 conectado en paralelo para trabajar mayores corrientes

Adaptado de: *STMicroelectronics. (2000)*

Sin embargo durante la construcción y la evaluación de esta etapa, se encontraron errores de diseño los cuales fueron cruciales para determinar la opción de utilizar una etapa de potencia basada en componentes electrónicos de potencia, por lo cual se implementó un puente h con transistores darlington de propósito general TIP 142.

Tomando en cuenta el funcionamiento del puente h ilustrado en la figura 7 y las características eléctricas del motor se realizó el circuito de potencia con las características mostradas en la Figura 9

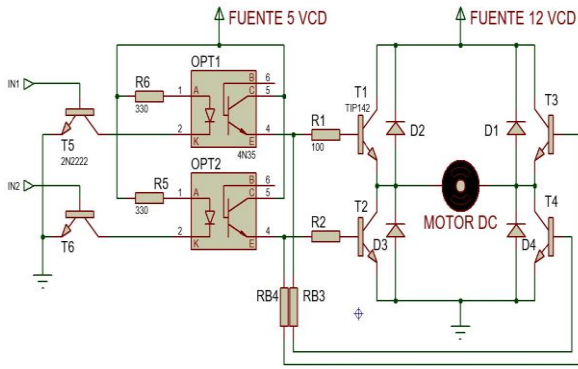


Figura 9 Diseño esquemático de la etapa de potencia

Fuente: *Elaboración Propia*

Al alimentar el motor directamente con una fuente se realizaron pruebas para conocer la corriente nominal del mismo, estas lecturas se realizaron con un multímetro conectado como amperímetro en serie entre la fuente de alimentación y el motor, al cerrar el circuito obtuvimos una corriente de 1.6 Amperes esto es comparable al valor obtenido bajo la ley de watt de la cual:

$$P = V \cdot I \tag{4}$$

Donde:

P es la potencia en watts

V el voltaje en volts

I la corriente en amperes

Despejando y sustituyendo por los valores de nuestro motor

$$I = \frac{P}{V} = \frac{18 \text{ watts}}{12 \text{ volts}} = 1.5 \text{ Amper} \tag{5}$$

Sin embargo este valor de corriente se eleva hasta 3 veces durante el arranque y los cambios de dirección del motor, así mismo cuando el motor presenta una carga mecánica alta por lo cual suponemos una corriente de arranque de 4.5 Amper. Al realizar pruebas para encontrar la corriente de arranque durante los cambios de dirección del motor se conectó de nuevo el amperímetro entre el motor y la fuente, esta vez elegimos la opción MAX/MIN del multímetro para determinar el valor más grande de corriente que circule en la bobina del estator del motor obteniendo una corriente de 5.15 Amper.

De esta manera se comprueba que no es posible utilizar un puente h que permita operar con corrientes menores a 6 Amperes, por lo cual se descarto la idea de utilizar el circuito L298 y se justifica la necesidad de usar transistores de potencia tales como el TIP 142 (Figura 10), el cual permite la circulación de corriente del colector a emisor de hasta 10 Amper, y un voltaje colector emisor de hasta 100 volts de corriente directa a continuación se presenta la tabla de valores máximos (Tabla 3).

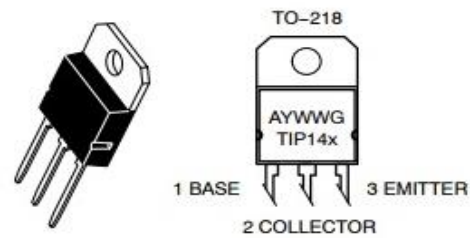


Figura 10 Transistor tip142 con distribución de pines

Adaptado de: *ON Semiconductor (2012)*

Rating	Symbol	TIP140 TIP145	TIP141 TIP146	TIP142 TIP147	Unit
Collector- Emitter Voltage	V_{CEO}	60	80	100	V_{dc}
Collector-Base Voltage	V_{EB}	60	80	100	V_{dc}
Emitter-Base Voltage	V_{EB}	5.0			V_{dc}
Collector Current Continuous	I_C	10			A_{dc}
Peak		15			
Base Current-Continuous	I_B	0.5			A_{dc}
Total Power Dissipation @ $T_c = 25^\circ C$	P_D	1.25			W
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_j, T_{stg}	-65 to +150			$^\circ C$

Tabla 3 Valores de corriente y voltaje máximos del tip 142

Adaptado de: *ON Semiconductor (2012)*

Mientras que la corriente de base como podemos observar es de 0.5 Amper por lo cual no es posible conectar el transistor en configuración colector común debido a la elevada corriente que suministra la fuente de 12 Volts, a si mismo la corriente suministrada por los pines digitales del microcontrolador es insuficiente. Esto hace necesaria la utilización de un circuito de acoplamiento el cual permita activar la base de transistor con la corriente de la fuente de nuestro circuito. El cálculo de la resistencia de base se realizó de acuerdo a esta ecuación:

$$R_b = \frac{V_b - 0.7}{I_c / h_{fe}} \tag{6}$$

Donde:

V_b es el voltaje en la base

I_c es la corriente de colector

h_{fe} es la ganancia de corriente

Al sustituir los datos de la hoja de datos en la ecuación y sabiendo que el voltaje aplicado a la base será de 5v debido a que es la fuente del circuito la que alimentará la base, tenemos que:

$$R_b = \frac{5 \text{ Volts} - 0.7}{10 \text{ Amper} / 500} = 215 \text{ Ohms} \tag{7}$$

Sin embargo como se observa en la figura 10 la corriente que entra en la base del transistor se divide entre 2 resistencias ya que para activar el puente “h” en una dirección es necesario alimentar 2 transistores, formando de esta manera un divisor de corriente, donde la corriente total es igual a la suma de las corrientes en R1 y R3 para el par de transistores T1 y T3, y R2 junto a R4 para los transistores R2 y R4 .

Para solucionar esto, se dividió el valor de la resistencia de base para cada transistor de manera que los 215 Ohms calculados para la resistencia de base ahora se convierten en 100 ohms para cada transistor debido a que 100 ohms es el valor comercial más cercano a los ideales 107.5 ohms. La ganancia de corriente se indica en la hoja de datos del transistor y es igual a 500, para valores de corriente de colector de 10 Amper y se muestra en la siguiente tabla 3.5.

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
DC current Gain ($I_c = 5.0 \text{ A}$, $V_{ce} = 4.0\text{V}$) ($I_c = 10.0 \text{ A}$, $V_{ce} = 4.0\text{V}$)	h_{FE}	1000 500	---	---	---
Collector-Emitter Saturation Voltage ($I_c = 5.0 \text{ A}$, $I_B = 10\text{mA}$) ($I_c = 10 \text{ A}$, $I_B = 40\text{mA}$)	$V_{CE(sat)}$	---	---	2.0 3.0	Vdc
Base-Emitter Saturation Voltage ($I_c = 10 \text{ A}$, $I_B = 40\text{mA}$)	$V_{BE(sat)}$	---	---	3.5	Vdc
Base-Emitter On Voltage ($I_c = 10 \text{ A}$, $V_{CE} = 4.0\text{Vdc}$)	$V_{BE(On)}$	---	---	3.0	Vdc

Tabla 4 Valores de corriente y voltaje de encendido del tip 142

Adaptado de: ON Semiconductor (2012)

4.3. Optoacoplamiento

En la figura 10 se observa que entre la entrada digital y las terminales base de los transistores del puente “h” se encuentran 2 circuitos OPT1 y OPT2, estos son circuitos 4N35 optoacopladores NPN, estos circuitos aíslan la etapa de potencia de la etapa de control mediante un aislamiento óptico, los pines 1 y 2 son el ánodo y cátodo (respectivamente) de un led infrarrojo, y es necesario conectar una resistencia menor o igual a 1 kΩ entre el pin 1 y Vcc, y de esta manera reducir la corriente que circula a través del led infrarrojo asegurando que no sufra daños. mientras que los pines 4 y 5 son emisor y colector de un fototransistor NPN.

El pin 3 no se conecta así como el pin 6, esta disposición de pines se muestra en la figura 11.

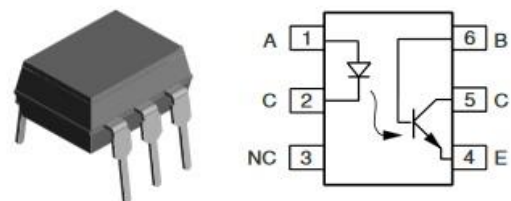


Figura 11 Optoacoplador 4n35 con distribución de pines
Adaptado de: VISHAY INTERTECHNOLOGY (2017)

En la figura 8 que muestra el diagrama de la etapa de potencia se muestran 2 transistores de propósito general T5 y T6, dispuestos a la izquierda de los optoacopladores OPT1 y OPT2, estos son transistores BJT 2n2222, los cuales cumplen la función de interruptores, permitiendo el flujo de la corriente proveniente de la fuente de 5 Vcc a través del led infrarrojo correspondiente a la entrada del optoacoplador 4n35, la base de los transistores se conecta a los pines 2 y 3 del microcontrolador, ya que la corriente de salida de dichos pines es de 40 mA no es necesario agregar resistencias de base.

En la figura 3.12 se muestra la disposición de pines y el encapsulado característico de dichos transistores. La figura 9 indica que; el Colector (pin 3) se conecta al pin 2 del optoacoplador 4n35, la Base (pin 2) se conecta a la salida (pin 2 y pin 3) del microcontrolador y el Emisor (pin 1) se conecta a tierra (GND), de esta manera al recibir una señal correspondiente a un UNO lógico el transistor pasará de corte a saturación y permitirá que el led infrarrojo del circuito 4n35 sea energizado.

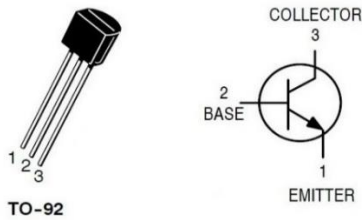


Figura 12 Transistor 2n2222 con distribución de pines
Adaptado de: ON Semiconductor (2013)

4.4. El Sensor de Inclinación

La etapa de control y la etapa de potencia conjuntamente determinan la dirección en la cual el motor gira, mientras la etapa de potencia alimenta con corriente y voltaje suficientes al actuador; la etapa de control asigna mediante salidas digitales la dirección que el dispositivo seguirá, sin embargo es necesario conocer la inclinación en la cual se encuentra el eje de rotación de la parábola y compararlo con el ángulo generado por el algoritmo de posicionamiento, y así cuando estos sean iguales detener el giro del motor ajustando la parábola al ángulo deseado.

El primer prototipo de sensor utilizado consistía en un potenciómetro rotativo, el cual se conectaría en una de las entradas analógicas del módulo ADC del microcontrolador, mientras el componente mecánico rotativo del mismo se acoplaría al eje de rotación de la parábola (figura 13) mientras el chasis del potenciómetro se encontraría fijo al armazón del concentrador solar, de esta manera el giro de la parábola permitiría variar los valores de voltaje leídos por el microcontrolador, y sabiendo que la salida del ADC entrega un dato de 10 bits, que numéricamente puede tener valores de 0 a 1023 bits. se describe en este punto un arreglo matemático sencillo para interpretar los valores entregados por el potenciómetro.



Figura 13 Eje de rotación del concentrador solar parabólico (círculo rojo)
Fuente: Elaboración Propia

Un potenciómetro comercial cuenta con 3 pines, 2 de estos son los extremos de una resistencia de carbono esta es la parte fija del potenciómetro mientras que el pin intermedio suele ser el elemento rotacional, el cual se desplaza a través de la resistencia fija, de esta manera tenemos un divisor de voltaje entre los 3 pines del potenciómetro, algunos fabricantes especifican en sus hojas de datos el ángulo de rotación mecánica, y varía de acuerdo al modelo.



Figura 14 Representación esquemática del giro de un potenciómetro

Fuente: Elaboración Propia

Teniendo así que un potenciómetro genérico cuenta con una rotación aproximada de 290° (figura 15), de esta manera los valores leídos por el módulo ADC del microcontrolador deben ser convertidos a grados mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Bits desplazados} = \frac{1024 \text{ bits}}{290^\circ} \quad (8)$$

$$\text{Bits desplazados} = 3.5310 \text{ bits} * \text{grado}$$

Donde los 1024 bits son todos los valores numéricos que puede tener el resultado de la conversión analógica-digital, y los 290° son los grados que se desplaza el elemento rotacional del potenciómetro. Por lo cual tenemos que para cada grado de movimiento que presente el potenciómetro, la conversión analógica digital sumará 3.5310 bits. De esta manera si el resultado de la conversión analógica-digital resulta ser 512 bits se tiene que:

$$\text{ángulo} = \frac{\text{valor lectura}}{\text{Bits desplazados}} \quad (9)$$

$$\text{ángulo} = \frac{512 \text{ bits}}{3.5310 \text{ bits} * \text{grado}}$$

$$\text{ángulo} = 145.00^\circ$$

Posteriormente y durante la implementación del sistema en el equipo mecánico real; se utilizó un acelerómetro MMA7361 configurado como inclinómetro, para conocer la inclinación de la parábola del concentrador solar.

4.5. Acelerómetro MMA7361 como sensor de inclinación

El circuito MMA7361 (Figura 15) es un acelerómetro micro-mecanizado de bajo consumo de celdas capacitivas el cual detecta los cambios en la velocidad del desplazamiento de una masa, la cual es un elemento móvil suspendido dentro del encapsulado. Este componente mecánico o masa inercial junto con la carcasa del circuito integrado conforman un capacitor, al desplazarse la masa inercial se modifica la distancia entre ambas placas, y así midiendo la capacitancia del condensador podemos conocer la aceleración a la cual se somete el dispositivo.

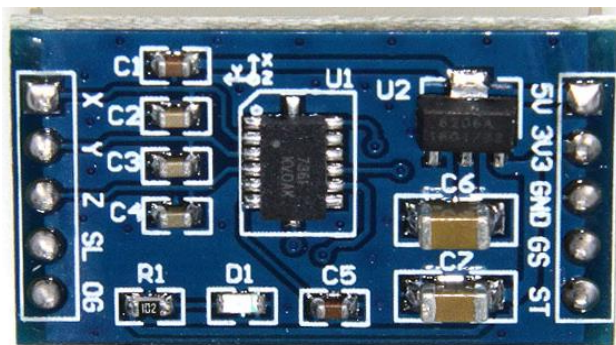


Figura 15 Acelerómetro MMA7361
Fuente: Elaboración Propia

El sensor cuenta con 3 pines de salida, correspondientes a los ejes en los que trabaja (X, Y, Z). Estos pines son salidas de señal analógica los cuales entregan valores de 0 a 3.6v y estos valores son equivalentes a aceleraciones en función de la gravedad. Dependiendo del eje en la que se desplace el circuito integrado este activará las salidas correspondientes, el circuito está construido de manera en que se puedan identificar los ejes de acuerdo a la posición del mismo y se ilustra en la figura 16.

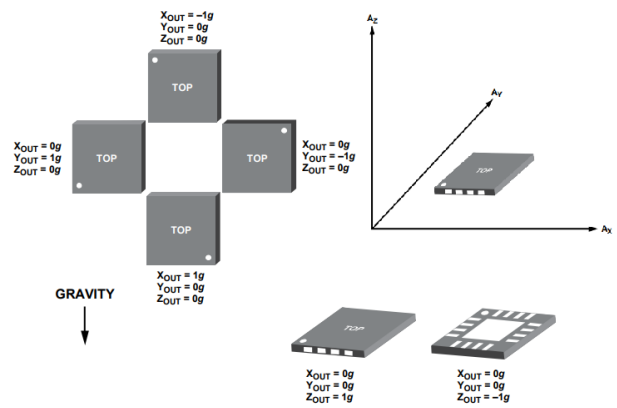


Figura 16 Respuesta de las salidas de acuerdo a la orientación del circuito MMA7361
Adaptado de: Sparkfun. (2008).

El sensor toma como referencia la aceleración de la gravedad ya que esta es primeramente a la que está sometida la masa inercial del sensor, por lo tanto el eje que se coloque de manera perpendicular a la superficie terrestre registrará una aceleración equivalente a $-1g$; donde g se refiere a la gravedad de la tierra. Si la misma cara, correspondiente a un eje se voltea 180° este registrará una aceleración de $1g$, estos valores son equivalentes a los valores máximos y mínimos del voltaje de 3.6 Volts con el que se alimenta el sensor, por lo tanto:

Para $-1g$ la salida correspondiente será de 0 Volts.

Para $1g$ la salida correspondiente será de 3.6 Volts.

Estos valores pueden ser interpretados gráficamente como vectores debido a que el sensor trabaja con una masa inercial por lo cual también pueden ser representados como fuerzas con magnitud y dirección.

Lo siguiente es asignar valores positivos y negativos mediante la programación a la magnitud de los valores leídos del sensor y mediante el cálculo trigonométrico descrito en el punto 3.4.1 determinar la dirección del vector resultante de las lecturas correspondientes al eje X y al eje Y.

Dentro de la programación se asignó un rango a los valores leídos por el ADC y se describe en la siguiente tabla 5.

Valor fuerza g	Valor Voltaje (V)	Salida ADC	Valor asignado
1g	~3.6	1023	500
0	~1.8	512	0
-1g	~0	0	-500

Tabla 5 Valores asignados a las lecturas del sensor de inclinación

Fuente: *Elaboración Propia*

4.6. Reloj de tiempo real DS1307

El modulo RTC (Figura 18) provee la hora actual, necesaria para el calculo del angulo mediante el algoritmo de posicion solar, el dispositivo cuenta con una unidad de memoria NV RAM (No Volatil Random Access Memory) en la cual se almacena y lleva la cuenta de los datos de la fecha y la hora en formato BCD (Binary Coded Decimal), el modulo se comunica mediante el puerto I^2C del microcontrolador, y mantiene el conteo de la hora durante largos periodos de tiempo gracias a la bateria de litio de 3.6V con la que cuenta. Sin embargo es necesario configurar los datos de fecha y hora del dispositivo; para esto se diseñó un menu basico similar al de los relojes digitales convencionales y auxiliado del microcontrolador junto a una serie de pulsadores es posible realizar la carga de los valores de fecha y hora.

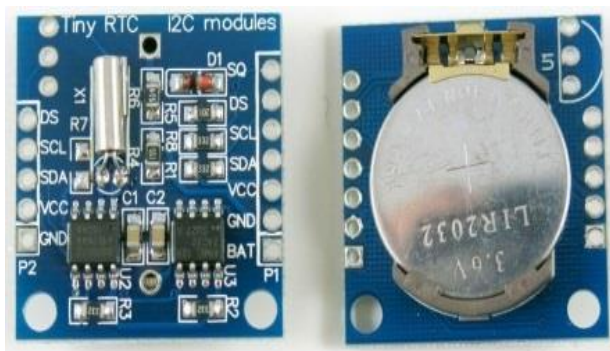


Figura 17 Modulo reloj de tiempo real (RTC) DS1307

Fuente: *Elaboración Propia*

5. Diseño del Algoritmo de funcionamiento

El objetivo del sistema electrónico es mantener la inclinación de la parábola en el ángulo calculado por el algoritmo de posición solar. Y de esta manera obtener durante la mayor porción de tiempo posible una óptima radiación solar en la superficie reflejante de la parábola.

Pseudocódigo.

Conociendo los requerimientos del sistema mencionados al principio de este capitulo,

junto con las funciones del ATmega328 se generó el siguiente pseudocódigo, el cual describe el comportamiento del algoritmo con el que funcionara el circuito seguidor.

1. Asignar variables operativas.
2. Configurar puertos entrada/salida, ADC, I^2C .
3. Inicializar RTC, LCD, comunicación I^2C .
4. Asignar valores promedio de amanecer y ocaso.
5. Leer RTC conectado a los pines I^2C .
6. Leer sensor acelerómetro conectado al canal 0 y 1 del módulo ADC.
7. Calcular posición solar.
8. Ajustar posición de la parábola mediante comparación de ambos ángulos.
9. Mostrar fecha y hora en LCD.
10. Configurar datos del RTC.

Diagramas de flujo

Previo a realizar el diseño del diagrama de flujo del algoritmo fue necesario organizar las funciones de manera modular, esto quiere decir que dentro del ciclo principal únicamente se llaman las funciones específicas, de manera que es más fácil asignar el orden en el cual se ejecutan. Debido a ello es necesario describir diagramas de flujo para cada función.

Diagrama de flujo inicial

En base al anterior pseudocódigo se realizó el diagrama de flujo inicial (Figura 18), el cual describe el programa con el que funciona el dispositivo sin embargo no es el único dentro de el mismo encontramos la función del menú principal la cual se describirá posteriormente en su respectivo diagrama de flujo.

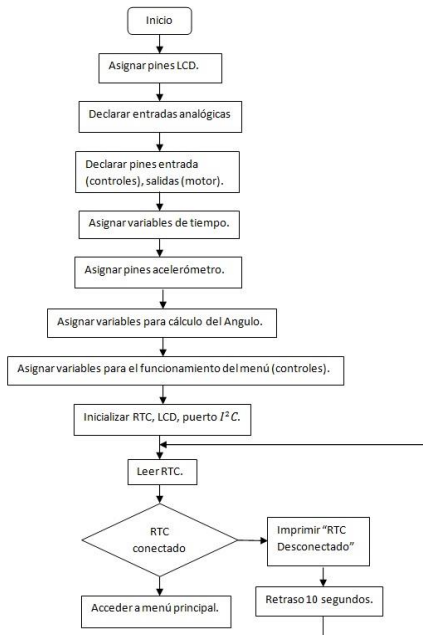


Figura 18 Diagrama de flujo inicial del programa

Fuente: *Elaboración Propia*

- Asignar pines LCD. Mediante esta función y gracias a la librería del display LCD se asignan los pines 0-5 del puerto C, en los cuales se conectara dicho dispositivo el cual funciona como interface gráfica para conocer el estado del dispositivo y configurar los valores de fecha y hora.
- Declarar entradas analógicas. Se declaran las entradas analógicas del acelerómetro.
- Declarar pines entrada, salida. Se definen los pines 0-1 del puerto D como salidas con las que se determinara la dirección de giro del motor, y 5-7 del puerto D como entradas para los pulsadores que funcionan como controles.
- Asignar variables de tiempo. Se generan variables equivalentes a la hora, minutos, segundos, día, mes, año. Las cuales nos permiten contener los valores que provee el RCT para operar con ellos y poderlos mostrar en el menú principal.
- Asignar pines acelerómetro. En esta función se asignan los pines 0-1 (ADC0, ADC1) como entradas analógicas en las cuales se conectaran las salidas del acelerómetro “X” y “Y” respectivamente.
- Asignar variables para cálculo del Angulo. Se generan las variables con las que operara el algoritmo de posicionamiento solar (mencionadas en el punto 3.2).
- Asignar variables del funcionamiento del menú. En esta función se asignan las

variables que nos permiten cambiar el estado del menú principal así como configurar la fecha y hora.

- Inicializar RTC, LCD, puerto I^2C . Mediante la librería de estos módulos se llama a inicializarlos.
- Leer RTC. Comprueba que el RTC está conectado y funcionando enviando y recibiendo datos a través del puerto I^2C .
- RTC conectado (condicional). Se comprueba la recepción de datos del puerto I^2C , a recibir respuesta se accede al Menú principal. Si no se obtiene respuesta del reloj de tiempo real se imprime en el LCD la frase “RTC desconectado” y se procede a un Retraso de 10 segundos, posterior a ello se vuelve a realizar la lectura del RTC.

Estas funciones corresponden a la configuración del dispositivo y la declaración de variables operativas, las siguientes funciones constituyen el ciclo principal del programa. Diagrama de flujo del menú principal.

La función Acceder al Menú principal. Se compone por 3 secciones, Cargar valores amanecer/ocaso, Cambio de estado pin “Modo” (condicional), y el Menú principal. Como se ilustra en el siguiente diagrama de flujo (Figura 19).

Esta sección comprende la parte del ciclo principal del programa por lo cual se ejecuta constantemente. Cargar valores Amanecer/Ocaso. En esta función se cargan los valores promedio de hora de amanecer y ocaso promedios indicados en el punto 3.1.1 de este capítulo, estos valores se determinan por medio de una función Switch/Case en la cual se evalúa el mes para determinar el valor que deben tomar las variables, que posteriormente serán utilizadas en el cálculo del Angulo mediante el algoritmo de posicionamiento solar.

Cambio de estado pin “Modo”. En esta función condicional se evalúa si existe un cambio en el estado del pin 7 del puerto D, configurado como entrada digital para el pulsador encargado de cambiar las diferentes pantallas del menú de configuración del dispositivo. Si registra un cambio incrementa en uno la variable “status menú”.

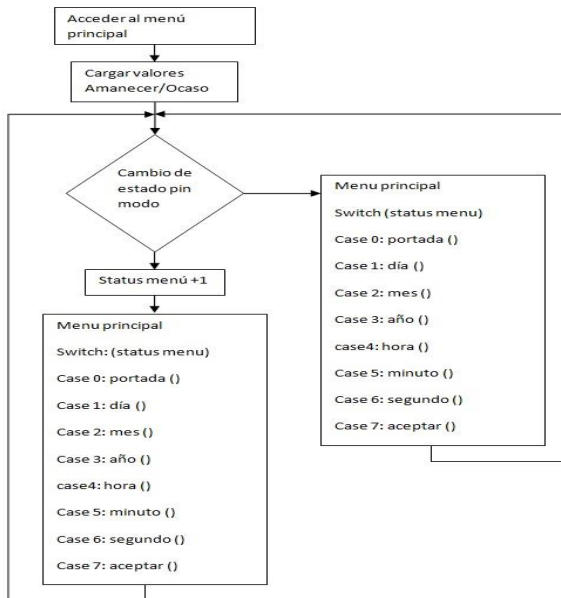


Figura 19 Diagrama del menú principal
Fuente: *Elaboración Propia*

El Menú principal. Es esencialmente una estructura Swith/Case de 8 estados, y se encuentra en función de la variable “status Menú”. De manera que al presionar el pulsador “pin modo” los valores de esta variable se incrementaran, y se accederá a las funciones contenidas en cada uno de sus “Case” a continuación se describen cada uno de estos casos:

- Case 0: se accede a la pantalla principal de la portada(), en la cual se ejecutan las funciones de lectura del RTC, lectura del acelerómetro, cálculo del Angulo de posición solar, ajuste de la parábola. Todo esto mientras se muestra la fecha y la hora en un formato de reloj, calendario.
- Case 1-6: en estos casos se accede a una pantalla en la cual se introduce manualmente el valor de los datos de fecha y hora (día, mes, año, hora, minuto, segundo), mediante un pulsador “pin más”, conectado en el pin 6 del puerto D, el cual se encuentra configurado como entrada digital, al cambiar su estado se incrementa el valor de una variable, la cual constantemente se muestra en el display LCD, y el dato se almacena temporalmente.

- Case 7: en este caso se requiere una confirmación del usuario, la función aceptar (), muestra en la pantalla la frase “¿confirmar?: más” al presionarse el “pin más” todos los valores establecidos en las pantallas anteriores se cargan conjuntamente al RTC, si se presiona el “pin modo” se incrementa la variable “status menú” y se regresa al Case 0, sin realizar ningún cambio en los valores del RTC.

Las funciones específicas correspondientes al algoritmo de posicionamiento solar, lectura de los valores del RTC, lectura del acelerómetro, ajuste de la parábola y pantalla principal se describen individualmente a continuación. Lectura de los valores del RTC. Esta función se encarga de tomar los valores contenidos en la memoria RAM no volátil del módulo DS1307, y almacenarlos en variables con las cuales se realizara el cálculo del Angulo de posición solar.

Gracias a la librería del módulo es posible extraer los valores mediante código simplificado y almacenarlos en la memoria RAM del micro controlador. A continuación (Figura 20) se ilustra mediante diagrama de flujo la manera en la que se realiza dicha lectura.

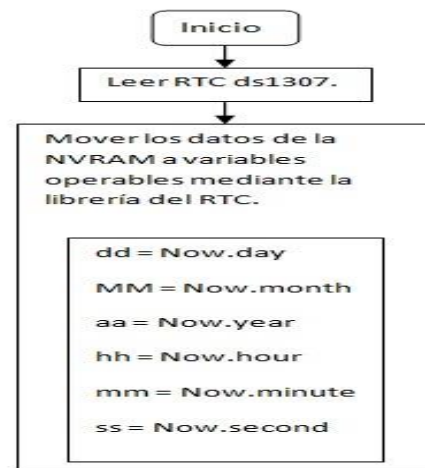


Figura 20 Diagrama de flujo de la cargar de los datos del RTC
Fuente: *Elaboración Propia*

De esta manera los valores en contenidos en las variables “dd, MM, aa, hh, mm, ss” pueden ser utilizados en las posteriores funciones.

Calculo del Angulo de posicionamiento solar

(Figura 21). Esta función calcula el ángulo en el cual debe colocarse la parábola mediante el algoritmo de posicionamiento solar que se menciona en el punto 3.2 de este capítulo, auxiliado de la función anterior es posible realizar el cálculo, para ello todos los valores deben ser convertidos a segundos.

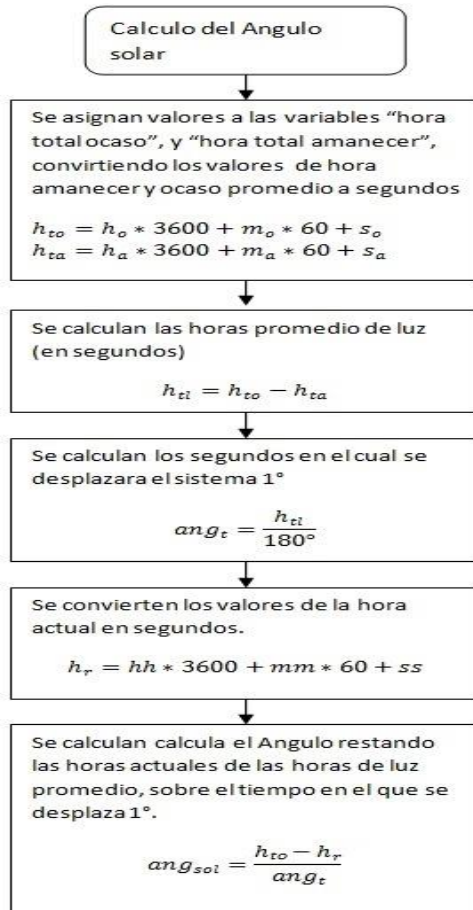


Figura 21 Diagrama del cálculo del Angulo de posicionamiento solar
Fuente: Elaboración Propia

Lectura del acelerómetro

Esta función se encarga de interpretar los valores leídos en los canales 0 y 1 del módulo ADC del micro controlador, correspondientes a las salidas X y Y del módulo Acelerómetro MMA7361, para conocer el Angulo en el cual se encuentra dirigido el eje de rotación de la parábola del concentrador. Para que posteriormente pueda ser posible su ajuste.

Como se observa en la figura 22 el resultado del cálculo de la tangente inversa esta dado en radianes, por lo cual es necesario convertir dicho valor a grados.

Así mismo como se menciona en este capítulo es necesario usar un arreglo "if" para leer las inclinaciones superiores a los 90° convirtiéndolos en valores a enteros positivos, esto se ilustra en el siguiente diagrama de flujo, donde sí los valores generados mediante el cálculo son menores a 0 es decir valores negativos, se calcula la diferencia con los 90° para posterior mente sumarse al Angulo limite leído (90°).

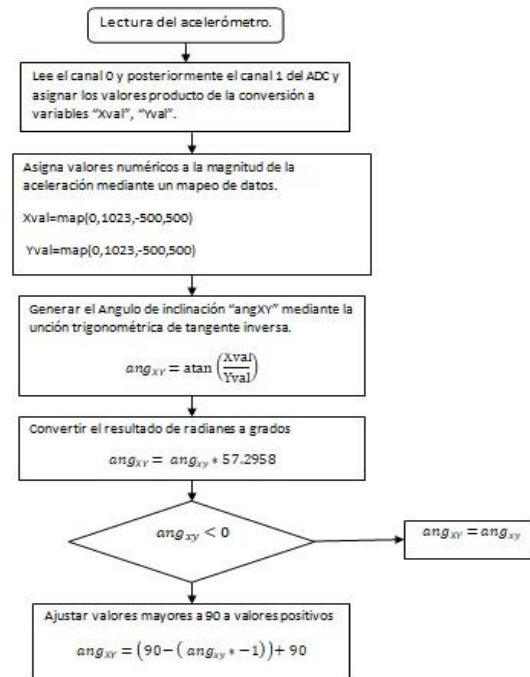


Figura 22 Diagrama de flujo de la función de lectura del acelerómetro MMA7361
Fuente: Elaboración Propia

Ajuste de la parábola

Mediante esta función se determinan bajo qué condiciones se realizara el giro del motor y hacia qué dirección girara, para ello se consideran valores como la hora actual h_r , la hora de amanecer y ocaso promedio, h_{ta} , h_{to} , los ángulos generados por el algoritmo de posicionamiento solar ang_{sol} y el Angulo leído del acelerómetro ang_{xy} . Todo bajo condicionales "if" en las cuales se determinan los horarios dentro de los cuales funcionara el seguidor, así como los grados de tolerancia que tendrá el ajuste de la parábola. El ajuste de la parábola, se compone de 2 secciones principales, la primera determina los horarios en los cuales trabajara el seguidor solar, estos horarios son las horas totales de luz, la segunda sección es el control o ajuste de la posición de la parábola, en el cual se comparan el Angulo leído del sensor y el Angulo solar.

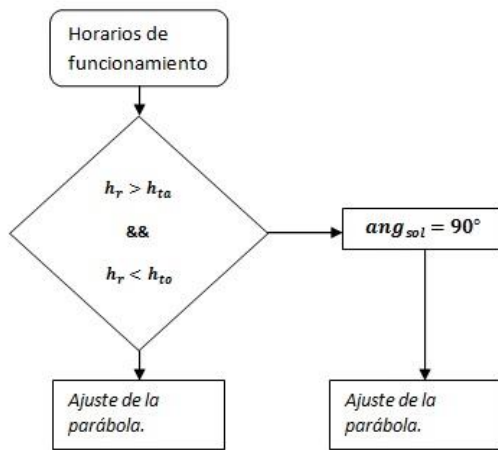


Figura 23 Diagrama de flujo del método para determinar horarios de trabajo
Fuente: *Elaboración Propia*

Como se observa en la figura 23 mediante una condición “if” se evalúa si los valores de la hora actual h_r se encuentran dentro de las horas de luz, de ser así se realiza el ajuste de la parábola, de lo contrario se iguala el Angulo solar a 90° y se realiza el ajuste de la parábola (Figura 24); de esta manera el sistema entrara en un estado de reposo en el cual no se modificara el Angulo hasta el amanecer del día siguiente.

El ajuste se realiza evaluando el Angulo ang_{xy} y el Angulo ang_{sol} mediante una condición “if”, de esta manera si el valor producido por el sensor de inclinación es menor al Angulo solar el motor girara hacia la izquierda, si no es menor se evalúa si es mayor, de ser así el giro se realizara hacia la derecha. Si ninguna de estas condiciones se cumple quiere decir que el Angulo ang_{xy} es igual al Angulo solar y por lo cual el motor se mantendrá detenido.

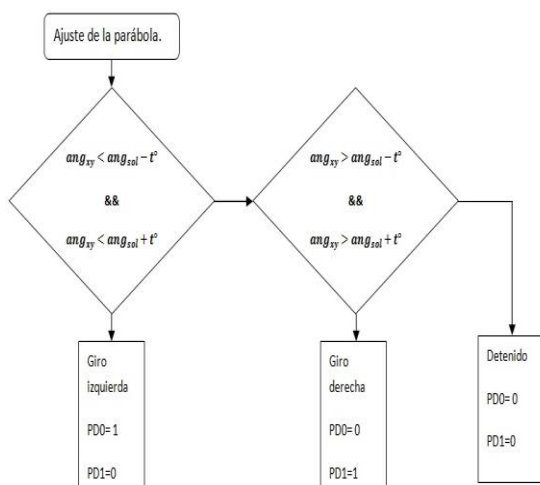


Figura 24 Diagrama de flujo del ajuste de la parábola
Fuente: *Elaboración Propia*

El ángulo t° es el número de grados de tolerancia, este valor permite a la parábola ajustarse n grados extra con relación al Angulo solar, y de esta manera evitar inestabilidad en el movimiento del dispositivo mecánico.

6. Simulación del programa

El programa se simuló en la herramienta Proteus®, este es un software de simulación electrónica el cual permite realizar pruebas de funcionamiento del programa del seguidor solar, el software cuenta con librerías de los componentes, entre ellas las del micro controlador ATmega3280p, el display LCD, el RTC ds1307.

Como se muestra en la figura 26 estos elementos se agrupan en bloques, sin embargo no existe una librería que simule el funcionamiento del acelerómetro MMA7361 por lo que el modulo correspondiente al sensor fue sustituido con 2 potenciómetros los cuales sustituyen las salidas analógicas X y Y del módulo sensor de inclinación, y se conectan a las entradas analógicas ADC0 y ADC1.

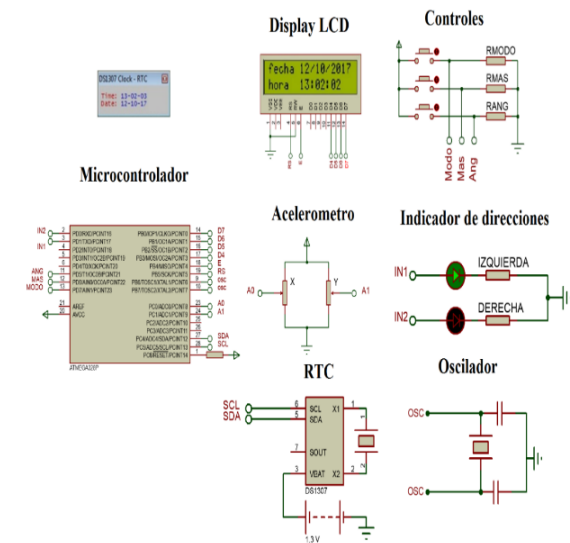


Figura 25 Simulación de la función de portada del programa del seguidor
Fuente: *Elaboración Propia*

En la figura 25 se muestra la portada principal del circuito seguidor, en el “display LCD” observamos la fecha y la hora, la cual es igual obtenida del módulo RTC, mientras el modulo “indicadores dirección” muestra una salida alta en el pin PD0 y una salida baja en el pin PD1, indicando un giro hacia la izquierda.

El modulo “controles” (Figura 26) permite navegar entre las pantallas de configuración de la fecha y la hora del RTC, con el pulsador superior es posible cambiar de pantalla, el pulsador central permite modificar de manera ascendente el valor que se carga a cada uno de los datos de fecha y hora, y por último el pulsador inferior permite visualizar el estado del Angulo de la parábola y el Angulo solar.

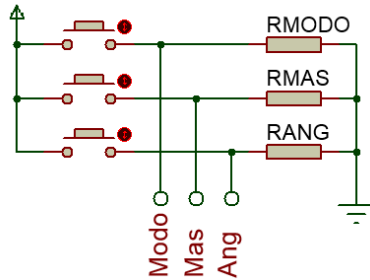


Figura 26 Simulación del módulo de controles
Fuente: Elaboración Propia

De esta manera al presionar el primer pulsador los valores de la variable “Status menú” se incrementaran y permitirá navegar en las ventanas de configuración de los datos del RTC.

El tercer y último botón permite observar brevemente los valores del ángulo de posición solar y el ángulo registrado por el sensor de inclinación (Figura 27).

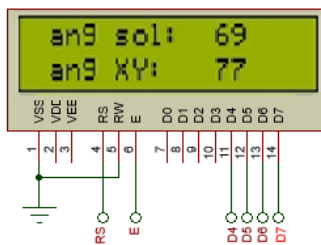


Figura 27 Simulación del indicador de los valores de los ángulos
Fuente: Elaboración Propia

Al modificar los valores de los potenciómetros en el módulo “acelerómetro” dentro de la simulación el ángulo ang_{xy} cambiará sus valores y a su vez los pines PD0 y PD1 determinaran el giro del motor cambiando su valor lógico, cuando el ángulo ang_{xy} y el ángulo ang_{sol} sean iguales ambos pines se colocaran en 0 deteniendo el giro del motor (Figura 28).

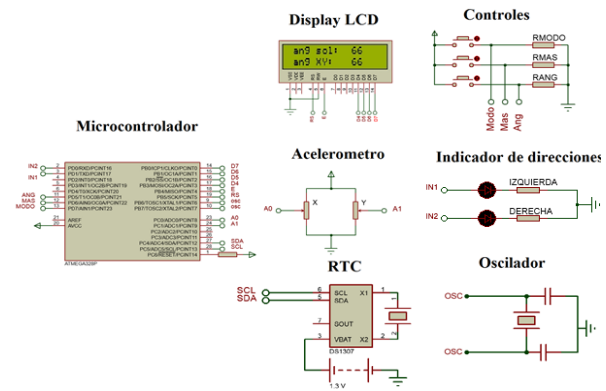


Figura 28 Simulación de la igualdad de ángulos
Fuente: Elaboración Propia

Simulación de la etapa de potencia

En la simulación de la etapa de potencia es necesario conocer el adecuado funcionamiento del puente “H” permitiendo el cambio en la dirección del motor. Sin embargo el software Proteus®, cuenta con librerías de motores que muestran de manera animada el giro del motor, para simplificar esto en el circuito correspondiente al puente “H” se agrego un voltímetro virtual conectado en paralelo al motor de corriente directa, de esta manera al girar hacia la derecha podremos ver reflejado en el voltímetro un voltaje aproximado a +12 Volts de corriente continua, esto se ilustra en la figura 30.

Para realizar la simulación de las salidas digitales del microcontrolador se conecto un doble interruptor conectado por un lado a la fuente de alimentación de 5 Volts Corriente continua y por el otro a la base de los transistores 2n2222.

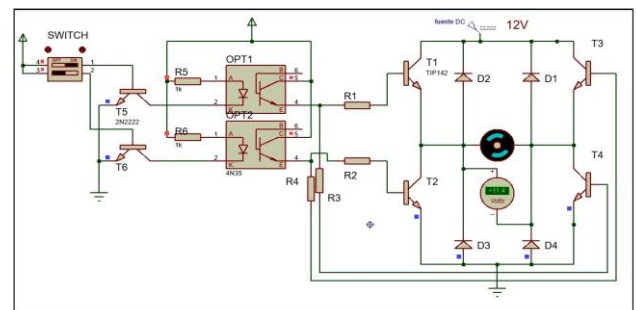


Figura 29 Simulación del giro en dirección a la derecha del motor DC por medio de la etapa de potencia
Fuente: Elaboración Propia

Cuando el motor presenta un giro en dirección a la izquierda el voltímetro conectado al motor presentara un flujo de corriente en sentido contrario por lo cual se observaran valores aproximados a -12 Volts Corriente continua. Esto se evidencia en la figura 30.

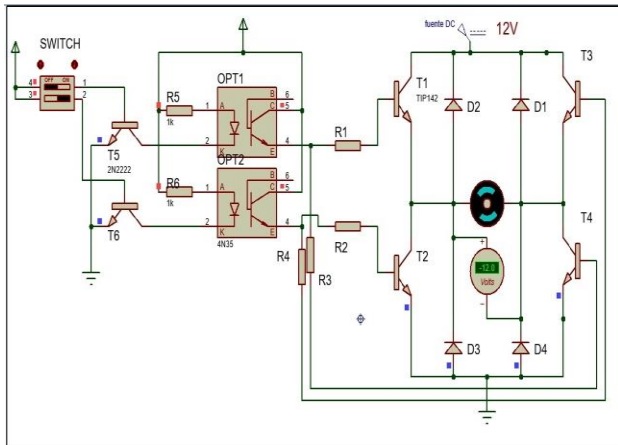


Figura 30 Simulación del giro en dirección a la izquierda del motor DC por medio de la etapa de potencia
Fuente: Elaboración Propia

Por último en la figura 31 se muestra al motor detenido y un valor registrado por el voltímetro de 0 Volts corriente continua.

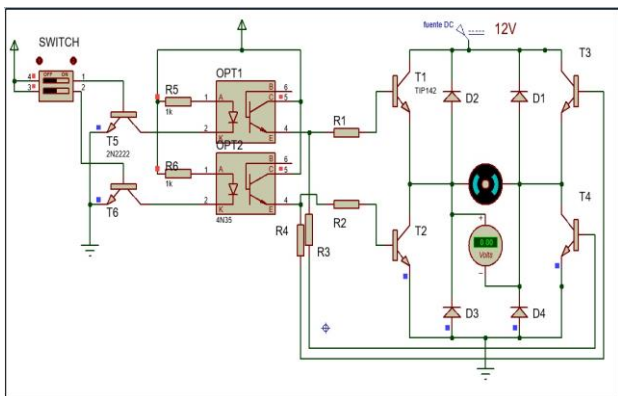


Figura 31 Simulación del estado detenido del motor
Fuente: Elaboración Propia

De esta manera se comprueba que el puente “H” de la etapa de potencia funciona adecuadamente.

Diagrama eléctrico del sistema

A continuación se presenta un diagrama eléctrico de las etapas antes descritas en este capítulo (figura 32)

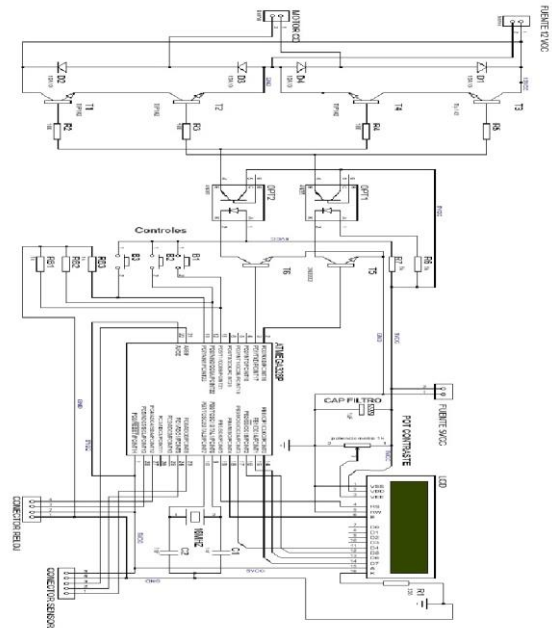


Figura 32 Diagrama eléctrico del sistema
Fuente: Elaboración Propia

7. Análisis y evaluación de los resultados obtenidos

Al tener integrado todo el equipo, fue puesto en funcionamiento el 27 de octubre del 2017 en el Centro Tecnológico de Aragón situado en la Facultad de Estudios Superiores de Aragón, ubicado en Avenida Hacienda de Rancho Seco S/N, Impulsora Popular Avícola, 57130 Nezahualcóyotl, MEX, y actualmente sigue en operación, los resultados mostrados en este capítulo corresponden a las mediciones que permitieron encontrar el mejor funcionamiento para este sistema, por lo cual se eligió dos pruebas las cuales se pueden considerar como días típicos representativos. En la figura 33 se ilustra como las pruebas pertinentes para observar el funcionamiento del sistema.



Figura 33 Pruebas al sistema
Fuente: Elaboración Propia

La tabla 6 muestre las mediciones correspondientes al 17 de noviembre del presente año, recabando la información de la temperatura de la parte inferior, media y superior del concentrador solar, así como los ángulos de inclinación de este.

Hora	Temperatura ambiente (C)	Mediciones de temperatura (C)			Ángulos	
		Inferior	Media	Superior	Teórico	Medición
11:48	17	54	81	83	114°	117°
11:51	17	63	82	95	113°	115°
11:59	17	65	122	101	111°	113°
12:02	17	78	128	103	110°	112°
12:07	17	78	133	110	109°	108°
12:11	18	88	135	113	108°	111°
12:17	19	91	137	114	106°	108°
12:23	20	96	139	119	105°	107°
12:31	20	99	138	123	103°	105°
12:41	20	100	138	123	100°	98°
12:45	20	100	138	124	99°	97°
12:55	20	101	137	123	96°	95°
13:11	20	102	137	127	91°	93°
13:18	20	101	135	126	90°	92°
13:23	20	101	134	126	89°	88°
13:28	20	100	134	126	87°	88°

Tabla 6 Medición de la Temperatura en el foco del concentrador solar (17/11/2017)
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 34 se estima una curva de las mediciones para esta prueba, los datos obtenidos nos permiten analizar su comportamiento desde un punto de vista estadístico.

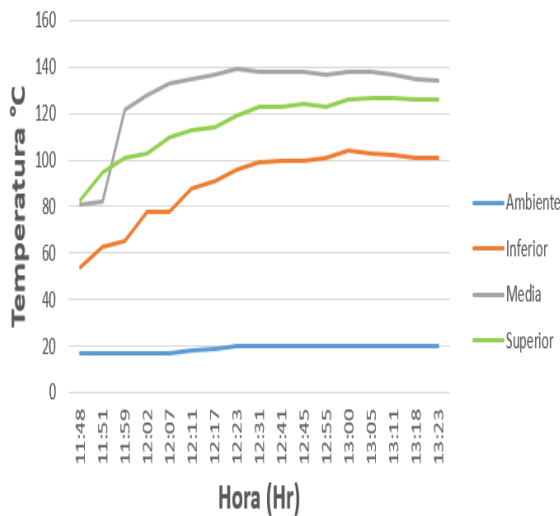


Figura 34 Temperatura vs hora del día (17/11/17)
Fuente: Elaboración Propia

Para esta población de 18 datos (medición inferior), se obtuvo un valor promedio de 90.22°C y una desviación estándar de 15.33°C (Tabla 7). EL valor promedio es la suma de todos los valores divididos entre la cantidad de valores, es decir nos indica cual es el valor que obtendríamos si se distribuyera los valores en partes iguales.

La desviación estándar se obtiene a partir de la raíz cuadrada de la varianza, a su parte la varianza es el promedio de las distancias entre de cada valor y la media.

Por lo que el valor de 15.33 nos indica la dispersión de los datos con respecto al valor promedio de este. Es decir para este caso nuestro intervalo de valores va de 74.89°C a 105.55°C, lo que nos indica es que los valores que estén entre ellos están previstos para la medición y entre más cerca se encuentren del valor promedio nos será más conveniente estos. La tabla 7 engloba el análisis de los datos obtenidos con respecto a esta prueba de temperatura.

Mediciones	Valor promedio (C)	Desviación estándar (C)	Intervalo de confianza (C)
Inferior	90.22	15.33	74.89 -105.55
Media	129.11	17.32	111.79-146.43
Superior	116.05	12.55	103.5-128.6

Tabla 7 Dispersión de los datos para la medición de temperatura (17/11/17)
Fuente: Elaboración Propia

Así mismo la figura 35, representa los ángulos obtenidos, es de suma importancia observar la relación entre los valores teóricos y los medidos, dado la estructura del concentrador solar con el que se cuenta, el foco puede tener una dispersión de ±5°.

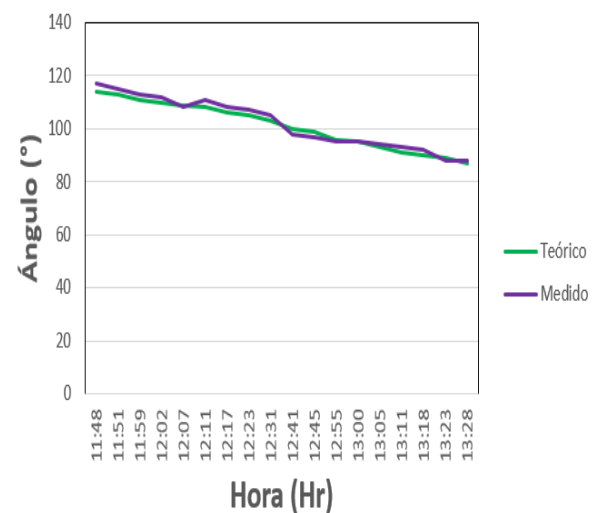


Figura 35 Angulo vs Hora del día (17/11/17)
Fuente: Elaboración Propia

Al comparar los datos se puede observar que el margen de error es de ±3° lo cual nos da una buena relación de estos ya que está dentro de los parámetros previstos, además no llega a los límites antes mencionados.

Las pruebas como tal permiten reajustar tanto parámetros, como modificar el funcionamiento, por lo cual se consideró el día 21 de noviembre del 2017 como día típico representativo y nos permitiera llegar a compararlos con los datos antes obtenidos. En la tabla 8 se recaban los datos de esta prueba.

Hora	Temperatura ambiente (C)	Mediciones de temperatura (C)				de Ángulos	
		Inferior	Media	Superior	Teórico	Medición	
12:51	21	121	159	148	97°	97°	
12:55	21	122	158	146	96°	97°	
13:00	22	118	156	146	95°	96°	
13:05	22	116	156	146	94°	97°	
13:14	22	114	153	142	91°	90°	
13:23	22	115	156	141	89°	89°	
13:31	22	114	153	142	86°	83°	
13:36	21	113	147	140	85°	83°	
13:40	21	111	147	137	84°	85°	
13:44	21	109	144	131	83°	85°	
13:49	21	104	140	128	81°	83°	
14:00	21	103	137	126	78°	78°	
14:07	21	103	136	125	77°	78°	
14:12	21	102	135	122	76°	77°	
14:20	21	102	133	120	74°	71°	
14:22	21	102	133	120	73°	71°	
14:25	21	100	133	120	72°	72°	

Tabla 8 Medición de la Temperatura en el foco del concentrador solar (21/11/2017)

Fuente: Elaboración Propia

De igual manera, analizamos los datos para poder interpretar que pasa con estos y la relación entre ellos. La figura 37 se muestra la gráfica representativa a estas temperaturas divididas por sección

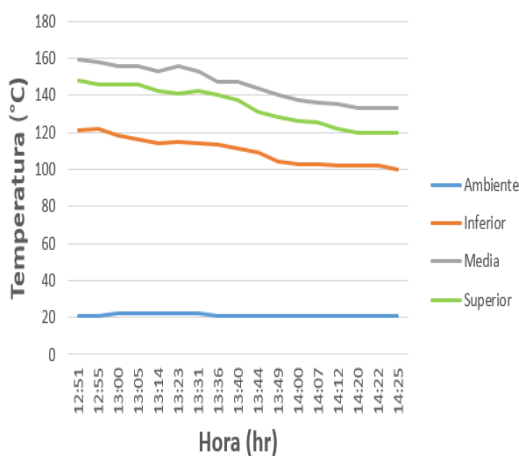


Figura 37 Temperatura vs hora del día (21/11/17)

Fuente: Elaboración Propia

De manera similar que la anterior serie de datos mostrados, se observa que la parte media de la parábola es la que posee los valores más altos de temperatura. Para esta muestra de datos se obtuvieron los siguientes valores representativos de esta población

Mediciones	Valor promedio (C)	Desviación estándar (C)	Intervalo de confianza (C)
Inferior	109.94	7.11	102.83-117.05
Media	145.65	9.58	136.07-155.23
Superior	134.12	10.21	123.91-144.33

Tabla 9 Dispersión de los datos para la medición de temperatura. (21/11/17)

Fuente: Elaboración Propia

Como se muestra en la Tabla 9, los valores obtenidos con respecto a la tabla 7, son mejores, tanto la temperatura promedio incremento y la dispersión de los datos se redujo, lo que nos indica que los valores tienden más a dicho valor promedio. Como se mencionó antes el sistema puede tener un margen de error de 5°, por lo cual se analizan los valores obtenidos en esta prueba, de manera gráfica podemos observar la dispersión de las dos curvas en la figura 38.

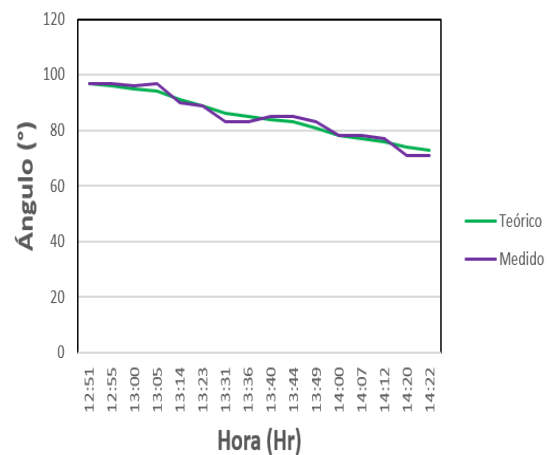


Figura 38 Angulo vs Hora del día (21/11/17)

Fuente: Elaboración Propia

De igual manera los datos muestran una pequeña separación entre sus respectivas gráficas, y sigue la tendencia de tener un error de 3°, lo cual entra dentro del intervalo estimado. Para estas pruebas encontramos algunos aspectos que modifican las mediciones, se debe tener en cuenta que el posicionamiento debe ser el correcto, es muy importante que se encuentre sobre una superficie que tenga un área de apoyo óptimo para este, y disminuir el impacto de agentes externos, las pruebas mostradas comparten las características de que el día se realizaron el clima era soleado y el viento era moderado, al revisar el impacto del viento no afectaba el posicionamiento de este, sin embargo este llevaba partículas que quedaban impregnadas en la superficie de la parábola por lo cual hay que tener una limpieza de esta ya que merma los valores obtenidos.

Es importante mencionar que los valores registrados en la tabla 4.4 tienden a descender esto es debido a que los valores máximos se alcanzaron cuando el sol se encontró en el punto más alto conocido como zenit, por ello después de este punto los valores disminuyen conforme se acerca el ocaso.

Agradecimiento

Se agradece el apoyo de: Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, al área del PAPIIT.

Conclusiones

El panorama de las energías ha evolucionado de forma paulatina, con un gran avance en el último periodo, para que estas fuentes de energía puedan competir con las convencionales se necesita un mayor impulso económico referente a su investigación, ya que se debe optimizar el proceso y reducir los costos. Desde un punto de vista optimista las energías renovables deberían ir desbancando a las generadas por hidrocarburos y con ello disminuir el daño ambiental. Para este trabajo, se contó con un concentrador parabólico, dado las especificaciones de este tipo de concentradores, para obtener buenos resultados con este equipo, se necesita de un sistema de seguimiento solar que lo posicione en el punto donde se encuentra la mayor irradiación solar.

Para llevar a cabo cualquier sistema, son esenciales la etapa de diseño y simulación, las que nos dan la pauta de visualizar el funcionamiento y el panorama de las principales problemáticas con las que nos podemos encontrar. Desde la visión del cliente, se consideró que se necesitaba un sistema funcional, de buenas especificaciones tales como son la precisión, exactitud y seguridad, sin perder de vista el menor costo posible.

Existen algunos sistemas austeros que tienen un funcionamiento basado en seguir la trayectoria solar por medio de dispositivos que reaccionan al cambio de luz, los cuales son baratos, pero no son idóneos para este tipo de equipos, dado las especificaciones de los sensores utilizados se necesita de una limpieza constante y estos tienden a estar oscilando, lo que hace que el concentrador este en constante movimiento, por lo cual se descartó la idea de emplear esta tecnología.

De igual manera cuando se estaba en la etapa de simulación, el sistema está basado en un PID (Proporcional Integrativo Derivativo), por lo cual como primer elemento de comparación se consideró colocar una resistencia variable o potenciómetro de uso convencional, como se mencionó en el capítulo III por las condiciones de este se optó por cambiar este elemento mecánico, por un acelerómetro el cual nos permite obtener mejores resultados, hay que tener en cuenta que a este dispositivo se le diseñó un chasis de tal manera que minimizara cualquier variación externa.

Las pruebas realizadas al sistema electrónico de seguimiento solar, nos arrojaron datos que permitieron retroalimentar dicho sistema hasta obtener los resultados esperados, los datos mostrados fueron aquellos donde el sistema ya estaba en un óptimo funcionamiento. Al analizar dichos valores, se observó que la temperatura obtenida es muy buena, en relación a las condiciones climáticas de esos días, esto es un aspecto muy importante a tomar en consideración ya que aunque la radiación solar este presente todos los días sin importar el clima, no se tendrán los mismo resultados en un día soleado que en un día nublado o lluvioso.

Sin incluir el sensor para ajustar el eje de la parábola, el sistema no cuenta con sensores para el seguimiento solar, si no su funcionamiento está basado en el estudio de la carta solar, es decir el circuito de control cuenta con un algoritmo que calcula los ángulos de posicionamiento, además incluye código de protección que limita el movimiento y lo coloca en su posición original al finalizar el día.

Al analizar los datos de los ángulos medidos con los calculados, se puede observar que su diferencia es pequeña, claro está que se tiene que tener un parámetro que nos indique si es correcta esta desviación, dada la estructura de la parábola y principalmente su eje, el error permisible es de 5° para que este se encuentre en el punto óptimo de radiación solar, por lo cual indica que nuestro sistema satisface las necesidades, además que reduce en 2° el error. Por lo cual el sistema propuesto es funcional y cumple con lo requerido, además mantiene un costo bajo, hay que tener en cuenta que el precio mostrado se incrementa, ya que se fabrica de manera individual.

Referencias

- Appleyard, D. (2009). Solar trackers: Facing the sun. *Renewable Energy World*, 12(3), 41-53.
- Areny, R. P. (2004). Sensores y acondicionadores de señal. Editorial Marcombo.
- Bohórquez, L., Martínez, S., & Gallego, H. A. (2012). Diseño y construcción de un prototipo autónomo para la práctica experimental de laboratorios de física. *Scientia et technica*, 17(52). Universidad Tecnológica de Pereira.
- CEMAER (2016).Energía solar en México. Revisión 08 de julio del 2017. Sitio web: <http://www.cemaer.org/energia-solar-en-mexico/>
- Corona, L., Abarca, G., & Mares, J. (2015). Sensores y Actuadores: Aplicaciones con Arduino. Grupo Editorial Patria.
- EngineersGarage. (2012). LCD. agosto 07,2017, de EngineersGarage Sitio web: <https://www.engineersgarage.com/electronic-components/16x2-lcd-module-datasheet>
- Escobar, L. G. V. (2007). Colector de canal parabólico para la generación directa de vapor para calor de proceso (Doctoral dissertation, Tesis doctoral inédita), Centro de investigación de energía. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Jaime, G. V. (2009). Energías renovables. Editorial Revert.
- Medina, V. (2016). Microprocesador vs Microcontrolador. Julio 16,2017, de Ritsa Sitio web: <http://www.ritsasv.com/tag/diferencias-microprocesador-y-microcontrolador/>
- Meeus Jean (1991). Algoritmos astronómicos, Willmann-Bell
- SANTIAGO E, F. (2012). Los Microcontroladores AVR de ATMEL. MEXICO: Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- VISHAY INTERTECHNOLOGY© (2017), 4N35, 4N36, 4N37 Optocoupler, Phototransistor Output, with Base Connection, Hoja de datos disponible en: <https://www.vishay.com/docs/81181/4n35.pdf>