

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID



Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática

Control y optimización del seguimiento solar con dos grados de libertad para mejora del aprovechamiento energético.

Autora: Marta Salas García

Director: Bonifacio de Andrés y Toro

Trabajo académicamente dirigido

Facultad de Ciencias Físicas

Madrid, Septiembre 2009

A mi familia por su paciencia y comprensión.

A Bonifacio por brindarme esta oportunidad.

A Santiago, David, Héctor y Marcos por su tiempo y ayuda.

A Iván por confiar siempre en mí y estar a mi lado en los malos momentos.

ÍNDICE

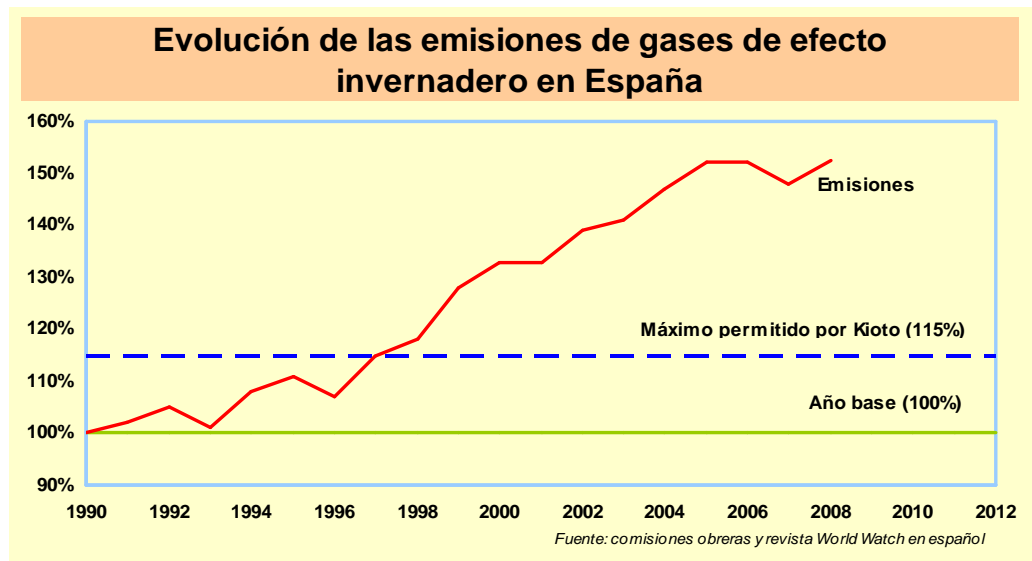
1. Introducción	1
1.1. Energía solar	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Estado del arte	4
1.4. Movimiento del sol	6
1.4.1. Trayectoria aparente del sol en el cielo del Hemisferio Norte ...	7
1.4.2. Determinación de la hora: Hora solar estándar	10
1.4.3. Posición del Sol respecto a superficies horizontales	12
2. Descripción general del sistema	14
2.1. Modulo de control	15
2.1.1. PIC18F4550.....	16
2.2. Modulo de actuación	18
2.2.1. Placa de potencia	18
2.3. Modulo de sensores	21
2.3.1. Sensor de iluminación	21
2.3.2. Sensor de inclinación	23
2.3.3. Reloj externo con alimentación independiente	25
2.4. Placa de interconexión	30
3. Funcionamiento	34
3.1. Inicialización	35
3.2. Seguimiento	37
3.2.1. Seguimiento sensorial	38
3.2.2. Seguimiento astronómico	39
3.3. Interrupciones	41
3.4. Programa de monitorización	42
4. Conclusiones y futuros trabajos	45
4.1. Futuros trabajos	46
5. Referencias	52
5.1. Introducción	52
5.2. Descripción del sistema	53
5.3. Funcionamiento	53
5.4. Conclusiones y futuros trabajos	53
6. Planificación	54

1. INTRODUCCION

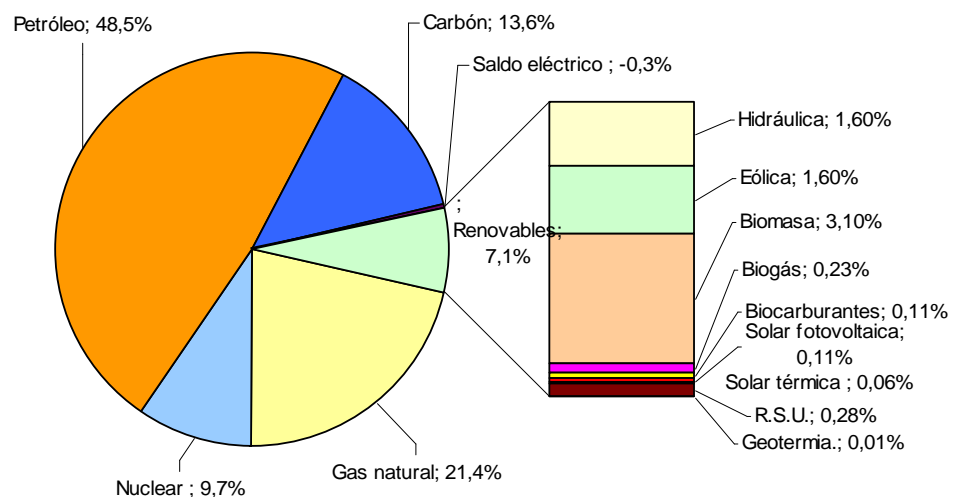
1.1. Energía solar

La generación, el transporte y el consumo de las energías convencionales tienen un impacto sobre el medio, y puede argumentarse que están en el origen de algunos de los mayores problemas ambientales que sufre el planeta como el cambio climático y la lluvia ácida.

Con el objetivo de reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6) provocadores del calentamiento global, en un porcentaje aproximado de un 5%, dentro del periodo que va desde el año 2008 al 2012, en comparación a las emisiones al año 1990, se firmó el protocolo de Kioto. La Unión Europea se comprometió a reducir sus emisiones totales medias durante el periodo 2008-2012 en un 8% respecto de las de 1990. No obstante, a cada país se le otorgó un margen distinto en función de diversas variables económicas y medioambientales según el principio de «reparto de la carga», de manera que a España le correspondió un +15%.



Como puede verse en el siguiente gráfico, en 2007 los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón) representaron más del 83% de la energía primaria. Esto hace que España sea el país con menos posibilidades de cumplir lo pactado con el Protocolo de Kioto. Las energías renovables sólo representaron el 7%, siendo el objetivo para 2010 alcanzar el 12%.



La escasez creciente de combustibles fósiles disparará el uso de las renovables que, además de ser fuentes de energía limpias, son inagotables.

Las energías renovables no sólo reducen las emisiones de gases de efecto invernadero sino que también aseguran un suministro energético autóctono y seguro, sin

dependencia de recursos o tecnologías externos y se han convertido en la mejor apuesta para conseguir cumplir con el compromiso adquirido.

En los últimos años, España y Alemania se han convertido en líderes mundiales en energías renovables. Tecnologías como la eólica y la fotovoltaica se han consolidado como punteras a nivel mundial, con empresas españolas entrando en los mercados emergentes de Estados Unidos, China o India.

El sol está en el origen de todas las energías renovables porque su calor provoca en la Tierra las diferencias de presión que dan origen a los vientos, fuente de la energía eólica. El sol ordena el ciclo del agua, causa la evaporación que predispone la formación de nubes y, por tanto, las lluvias. También del sol procede la energía hidráulica. Las plantas se sirven del sol para realizar la fotosíntesis, vivir y crecer. Toda esa materia vegetal es la biomasa. Por último, el sol se aprovecha directamente en las energías solares, tanto la térmica como la fotovoltaica.

1.2. Objetivos

Construir un seguidor solar para los paneles del grupo de Energías Renovables de la Facultad de Física. Dicho seguidor deberá ser capaz de alternar entre dos modos de funcionamiento diferentes, eligiendo según la radiación solar, el más adecuado para cada momento.

El primero, seguimiento astronómico, mueve a velocidad constante el panel realizando el recorrido del sol.

El segundo es un seguimiento solar sensorial, para lo cual se ha montado una placa provista de cuatro resistencias LDR que orientan los paneles por comparación de los voltajes de las resistencias dos a dos.

El cambio de un seguimiento sensorial a uno astronómico se realiza cuando la irradiancia solar que llega a las placas es un 25% menor de la esperada (por ejemplo, en caso de nubes), en esta situación resulta más ventajoso que las placas se orienten en la

posición por la que reaparecerá el sol, en lugar de mantener un seguimiento sensorial que podría llevar a los paneles a retroceder en busca del sol.

En ambos modos de funcionamiento los paneles se colocaran cada mañana por la posición de salida del sol, permitiendo el máximo aprovechamiento de la energía.

1.3. Estado del Arte

Básicamente existen cinco tipos de seguimiento solar:

- En dos ejes.
- Un eje Norte-Sur horizontal.
- Seguimiento en eje polar. (Un eje Norte-Sur inclinado a la latitud del lugar)
- Un eje Este-Oeste horizontal.
- Azimutal.

Podemos ver en las siguientes imágenes algunos de estos tipos de seguimiento.



Figura 1.1. Tipos de seguimiento. Por orden de izquierda a derecha: Dos ejes. Un eje Este Oeste horizontal, en eje polar.

En el mercado abundan los seguidores de dos ejes, ya que estos proporcionan un mayor aprovechamiento energético, si bien es cierto, que aunque son ligeramente más costosos que los que llevan implantado un seguimiento a un eje, consiguen mayor captación.

Los dos que más impacto están teniendo actualmente son los seguidores solares con seguimiento en dos ejes y los seguidores con seguimiento en eje polar, presentando estos últimos un 96% de captación respecto a los primeros.

En la Facultad de Física de la Universidad Complutense de Madrid se encuentra instalado un seguidor de dos ejes de la compañía Artysol que presenta el siguiente aspecto:



Figura 1.2. Seguidor solar Artysol (instalado en la facultad de Física de la UCM.)

Este seguidor dispone de un seguimiento sensorial de dos ejes, orientándose hacia la zona del cielo con mayor claridad.

Los seguidores solares son tan precisos como la tecnología permita. La trayectoria solar está perfectamente definida y los errores de cálculo no llegan a 1° y los paneles están desde el amanecer hasta el anochecer perpendiculares a la incidencia de los rayos solares. El sistema que consigue hacer esto de la forma más barata y efectiva, es el que se lleva el mercado. Por ello, las investigaciones no invierten demasiado en el tipo de seguimiento sino en los paneles solares, materiales semiconductores y sus propiedades ópticas, mediante la modificación de las cuales, se obtiene mayor captación. Entendiendo el seguimiento solar como sistema externo de optimización que

queda fuera de estudios de materiales y sus propiedades, podemos encontrar sistemas que mediante agentes externos, consiguen una mejor captación.

Así vemos en el mercado e instalaciones sistemas con espejos concentradores como el de la siguiente imagen, que aumentan la captación solar mediante las reflexiones de los rayos solares en los espejos.



Figura 1.3: Sistemas fotovoltaicos con espejos para concentrar la radiación solar.

También podemos encontrar sistemas sin espejos concentradores, pero que usan recubrimientos plásticos sobre la célula solar que hacen el mismo efecto. Hay que tener cuidado con este tipo de optimizaciones ya que la captación de radiación solar de los paneles solares tiene un límite, perdiendo rendimiento y perjudicando físicamente el material, si se supera ese límite.

1.4. Movimiento Solar

La órbita de la Tierra alrededor del Sol es una elipse (muy poco excéntrica), ocupando el Sol uno de los focos; por ello el movimiento aparente del Sol alrededor de la Tierra no es igual todo el año. El Sol parece moverse más rápido cuando la Tierra está más cerca de él.

El tiempo que la Tierra tarda en completar una vuelta alrededor del Sol es de 365.25 días (traslación). La Tierra completa una revolución sobre su propio eje en 24 h (rotación). El plano del ecuador no es el mismo que el plano de la órbita de la Tierra alrededor del Sol, sino que está inclinado respecto de ella un ángulo de $23^{\circ} 27'$ (oblicuidad de la eclíptica).

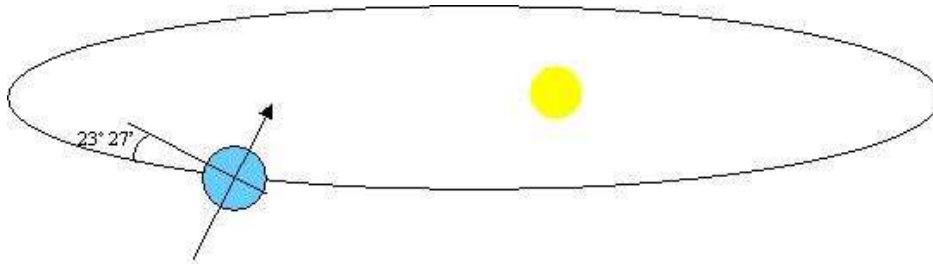


Figura 1.4. Oblicuidad de la eclíptica

1.4.1. Trayectoria aparente del sol en el cielo del Hemisferio Norte

Los puntos de corte de la eclíptica con el plano del ecuador se conocen como Equinoccios – de primavera y otoño - mientras que los puntos en los cuales el sol tiene una declinación máxima o mínima de 23.45° - en valor absoluto - respecto al plano del ecuador se denominan Solsticio – de verano e invierno - (figura 15..).

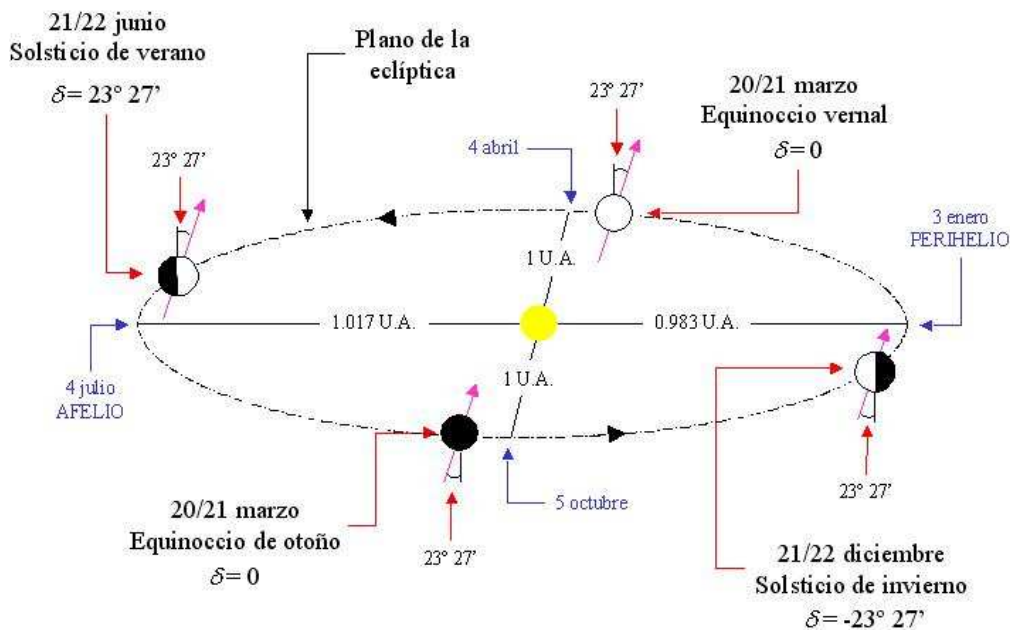


Figura 1.5. Estaciones del año

Observando el movimiento del Sol visto desde el Hemisferio Norte, el día del Equinoccio de primavera, el sol sale exactamente por el este y se pone exactamente por el oeste, estando 12 horas sobre el horizonte, siendo su declinación 0, trayectoria amarilla de la *figura 1.6.*

A partir de este momento y hasta el Solsticio de verano, el Sol sale un poco más al norte del punto cardinal Este, poniéndose entre el Norte y el Oeste. Como se ve en la figura, la trayectoria del Sol sobre el horizonte es más larga, durando el día más de doce horas, con una declinación positiva. El día de Solsticio de verano, trayectoria en azul de la *figura 1.6.*, el Sol presenta una declinación máxima positiva de 23.45° . Desde entonces y hasta el Equinoccio de otoño, la declinación solar va disminuyendo hasta cero y cada vez los días tiene menos horas de luz.

Desde el Equinoccio de Primavera hasta el de Otoño, el sol se encuentra sobre el Hemisferio Norte y a partir del de Otoño, pasa al Hemisferio Sur, describiendo cada día una trayectoria sobre el horizonte más corta, haciendo que los días tengan menos horas de luz, saliendo entre el Este-Sur y poniéndose entre el Oeste-Sur, siendo su declinación negativa, trayectoria verde de la *figura 1.6.* . En el Solsticio de invierno, el sol culmina más bajo presentando una declinación máxima negativa de -23.45° .

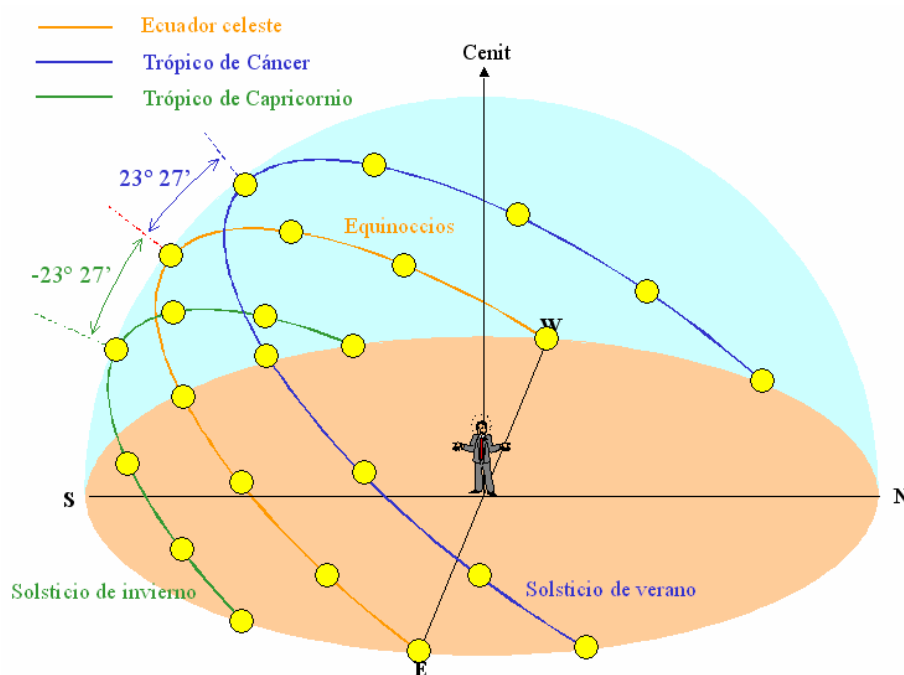


Figura 1.6. Trayectorias solares

Se puede calcular la declinación solar δ , en radianes, mediante la fórmula de Spencer:

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 \cdot \cos\Gamma + 0.070257 \cdot \sin\Gamma - 0.0067 \cdot \cos 2\Gamma + 0.0009907 \cdot \sin 2\Gamma - 0.002697 \cdot \cos 3\Gamma + 0.00148 \cdot \sin 3\Gamma) \frac{180}{\pi} \quad [\text{Ecu1.1}]$$

donde Γ es el ángulo diario, en radianes, se puede calcular:

$$\Gamma = \frac{2\pi}{365} (d-1) \quad [\text{Ecu1.2}]$$

donde d es el día natural, donde el 1 de enero es $d=1$, el 2 de enero $d=2$ y así sucesivamente.

En la siguiente figura se puede ver la evolución de la declinación en un año.

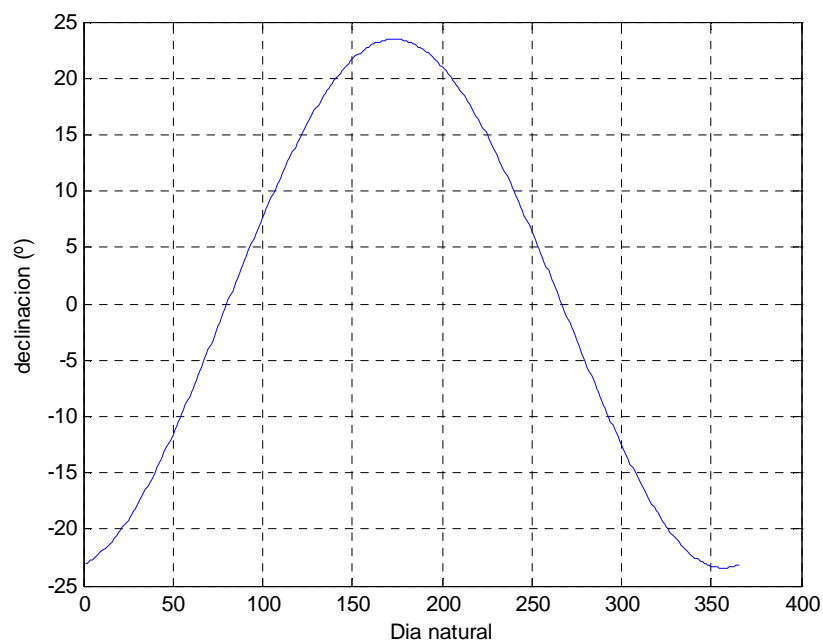


Figura 1.7. Evolución de la declinación

1.4.2. Determinación de la hora: Hora solar estándar

Día solar es el intervalo de tiempo en que el Sol realiza una revolución completa alrededor de un observador estacionario situado en la Tierra. Este intervalo no es necesariamente de 24 horas.

Un observador situado en el hemisferio Norte mirando hacia el sur que ponga en hora a mediodía solar (cuando el sol está directamente sobre el meridiano local) un reloj que marcha uniformemente, puede encontrarse con que cuando el reloj indique de nuevo que es mediodía, el sol no está exactamente sobre el meridiano local.

El día solar varía a lo largo del año por dos razones: La tierra barre áreas desiguales en el plano de la eclíptica a medida que se mueve en torno al Sol. La segunda razón es que el eje de la Tierra está inclinado respecto al plano de la eclíptica.

Día solar medio es el promedio de la duración de los días solares y corresponde al movimiento de un Sol ficticio (el Sol medio) cuyo movimiento aparente discurrese en el plano del ecuador y alrededor del cual la Tierra describiese una órbita con velocidad constante. Todos los días solares medios son de igual duración.

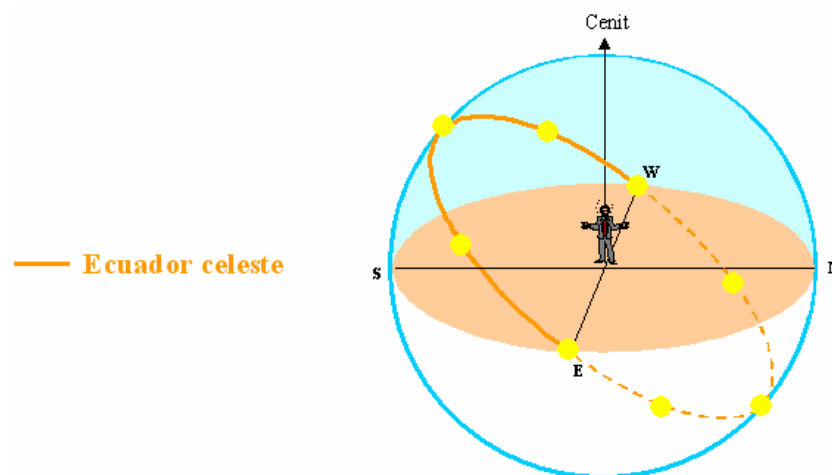


Figura 1.8. Día solar medio

La discrepancia entre el movimiento del Sol medio (perfectamente uniforme con intervalos de 24 horas entre dos pasos consecutivos del Sol por el meridiano local) y el

movimiento aparente del Sol verdadero, se llama Ecuación de Tiempo. El valor máximo de la ecuación de tiempo es de unos 16 minutos (octubre / noviembre). El cálculo de la Ecuación de Tiempo se hace mediante la fórmula de Spencer

$$E_t = (0.000075 + 0.001868 \cdot \cos \Gamma - 0.0320777 \cdot \text{sen} \Gamma - 0.014615 \cdot \cos 2\Gamma - 0.04089 \cdot \text{sen} 2\Gamma) (229.18) \quad [\text{Ecu1.3}]$$

donde 229.18 es un factor de conversión de radianes a minutos. La evolución de la ecuación de tiempo se ve en la *figura 1.9*.

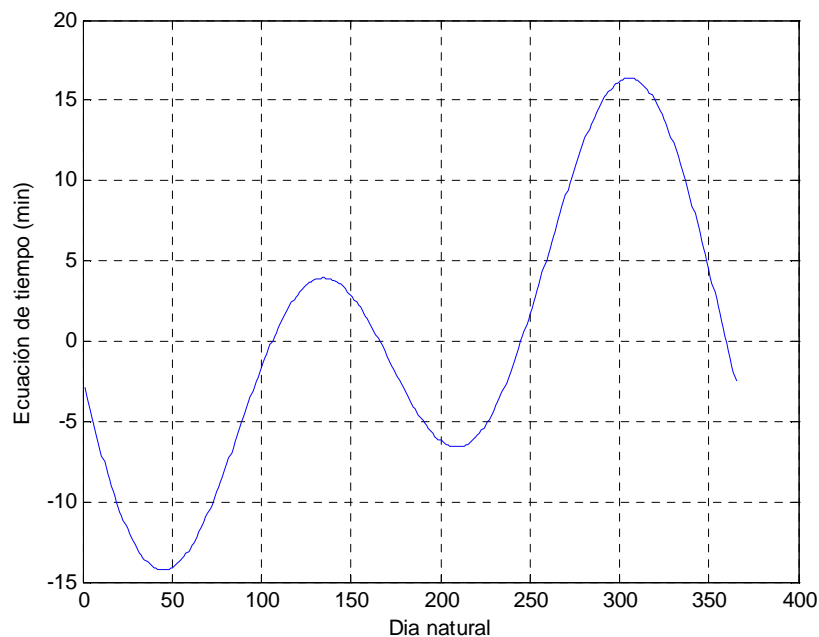


Figura 1.9. Evolución de la ecuación de tiempo en un año.

Como hemos visto antes la Ecuación del tiempo nos relaciona el tiempo solar verdadero o ángulo solar horario, ω , y el tiempo oficial, TO.

$$\omega = \text{TO} + 4(L_{\text{st}} - L_{\text{loc}}) + E_t \quad [\text{Ecu1.4}]$$

Esta ecuación nos proporciona el ángulo horario solar en cada momento del día. L_{st} es la longitud del meridiano estándar (Greenwich) y L_{loc} , la longitud del meridiano local. La corrección por longitud es positiva si el meridiano local está al Este del meridiano estándar, siendo negativa si se encuentra al Oeste.

El ángulo horario, *figura 1.10.*, varía de 0° (Sol culminando el meridiano) a un valor que depende del día del año y la latitud. Signo positivo antes del mediodía solar y negativo después del mediodía solar.

1.4.3. Posición del Sol respecto a superficies horizontales

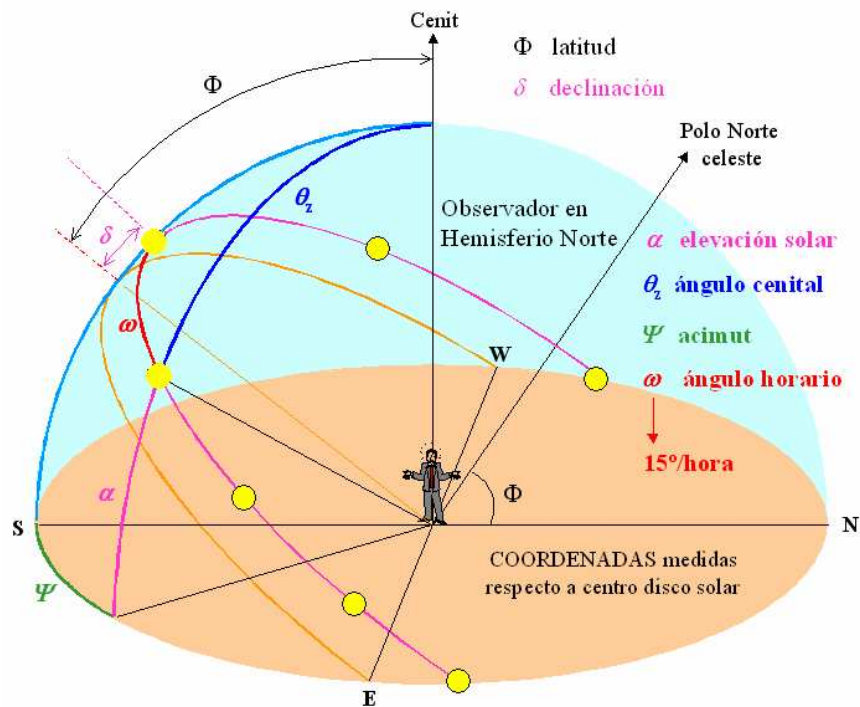


Figura 1.10. Posiciones del Sol respecto a plano horizontal

α : elevación solar, depende de la declinación, la latitud y del ángulo horario. Este ángulo varía de 0° (horizonte) a 90° (cenit). Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\alpha = \text{sen}^{-1}(\text{sen}\Phi \text{ sen}\delta + \text{cos}\Phi \text{ cos}\delta \text{ cos}\omega) \quad [\text{Ecu1.5}]$$

θ_z : ángulo cenital, varía entre 0° (cenit) a 90° (horizonte)

$$\text{cos}\theta_z = \text{sen}\Phi \text{ sen}\delta + \text{cos}\Phi \text{ cos}\delta \text{ cos}\omega \quad [\text{Ecu1.6}]$$

Ψ : acimut, varía de 0° (sur) a 180° (norte). Signo positivo hacia el Este y negativo hacia el Oeste

$$\text{cos}\Psi = \frac{\text{sen}\alpha \text{ sen}\Phi - \text{sen}\delta}{\text{cos}\Phi \text{ cos}\alpha} \quad [\text{Ecu1.7}]$$

ω_s : ángulo horario a la salida del sol, su valor depende del día del año y la latitud.

$$\cos \omega_s = -\tan \Phi \tan \delta \quad [\text{Ecu1.8}]$$

El máximo de horas de sol al día es : $\frac{2\omega_s}{15}$ donde el 15 es para transformar los radianes en horas y el 2 es debido a que ω_s cuenta de la salida del sol al mediodía, suponiendo el día simétrico, del mediodía a la puesta del sol también transcurre ω_s .

Finalmente se calcula la hora de salida de puesta del sol mediante las siguientes fórmulas:

$$H_{\text{orto}} = 12 - \frac{2\omega_s}{15} + (L_{\text{st}} - L_{\text{loc}}) + E_t \quad [\text{Ecu1.9}]$$

$$H_{\text{ocaso}} = 12 + \frac{2\omega_s}{15} + (L_{\text{st}} - L_{\text{loc}}) + E_t \quad [\text{Ecu1.10}]$$

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

El sistema de seguimiento solar diseñado se compone de los siguientes módulos que se detallaran en los sucesivos apartados:

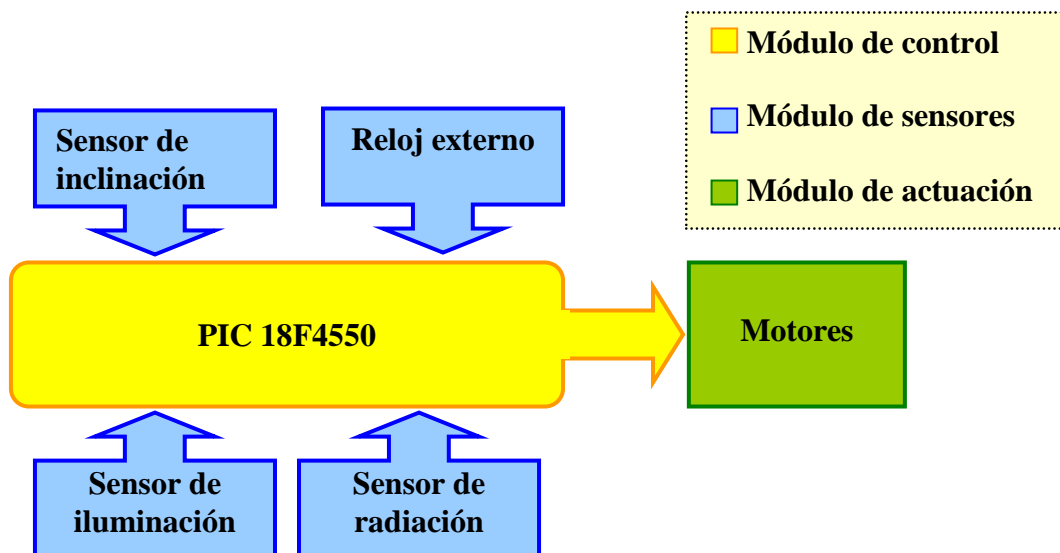


Figura 2.1. Diagrama de bloques del sistema

2.1. Modulo de control

Para el control del seguidor se utiliza una USBLab. Esta placa ha sido diseñada por el grupo ISA, Ingeniería de Sistemas y Automática. Contiene como componentes principales un microcontrolador PIC18F4550, un convertor analógico/digital MCP4921, un reloj externo, un conector de 40 pines y un conector USB.

Esta placa se ha utilizado debido a que permite una serie de facilidades:

En primer lugar la comunicación PC-microcontrolador es rápida y sencilla gracias al puerto USB. Esta comunicación permite la programación del PIC, un control manual de los paneles y facilita las actualizaciones de software. Además el conector de 40 pines nos facilita la incorporación de los diferentes sensores y actuadores a los puertos del PIC.

Además este PIC tiene la ventaja de poder ser programado en lenguaje C, dejando un lado el lenguaje ensamblador y haciendo la programación más sencilla.

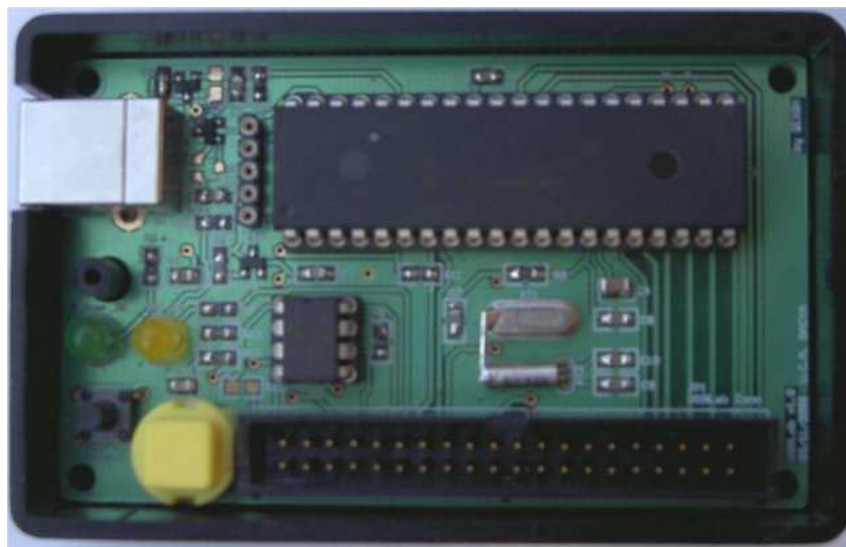


Figura 2.2. USBLab

2.1.1 PIC18F4550

El PIC empleado pertenece a la gama de microcontroladores programables 18F de gama media/alta de 8 bits y 40 pines.

Sus características generales son las siguientes:

Memoria Flash:	32Kbytes
Máximo número de instrucciones simples:	16384
Memoria SRAM:	2048 bytes
Memoria EEPROM:	256 bytes
Entradas / Salidas:	35
Número de entradas A/D:	13
Número de CCP:	1
Número de ECCP:	1
Soporta SPP:	Si
Soporta SPI:	Si
Soporta master I2C:	Si
Número de EAUSART:	1
Número de comparadores:	2
Número de temporizadores de 8 bits:	1
Número de temporizadores de 16 bits:	3
Universal Serial Bus (USB) module:	Si

Tabla 2.1. Características general del PIC 18F4550

40-Pin PDIP

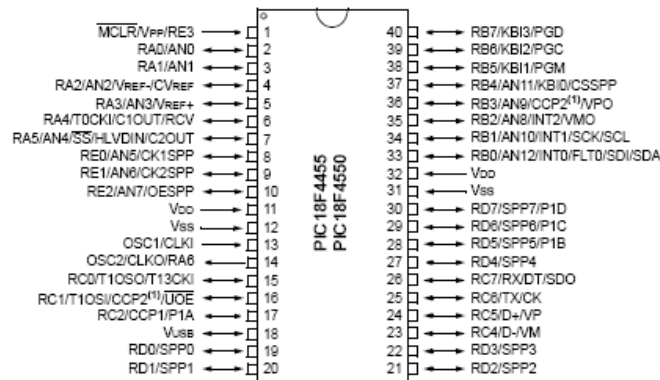


Figura 2.3. Diagrama de pines

Dicho dispositivo será programado mediante el entorno de programación facilitado por microchip *MPLAB v7.60*, con el compilador *C18* para lenguaje C.

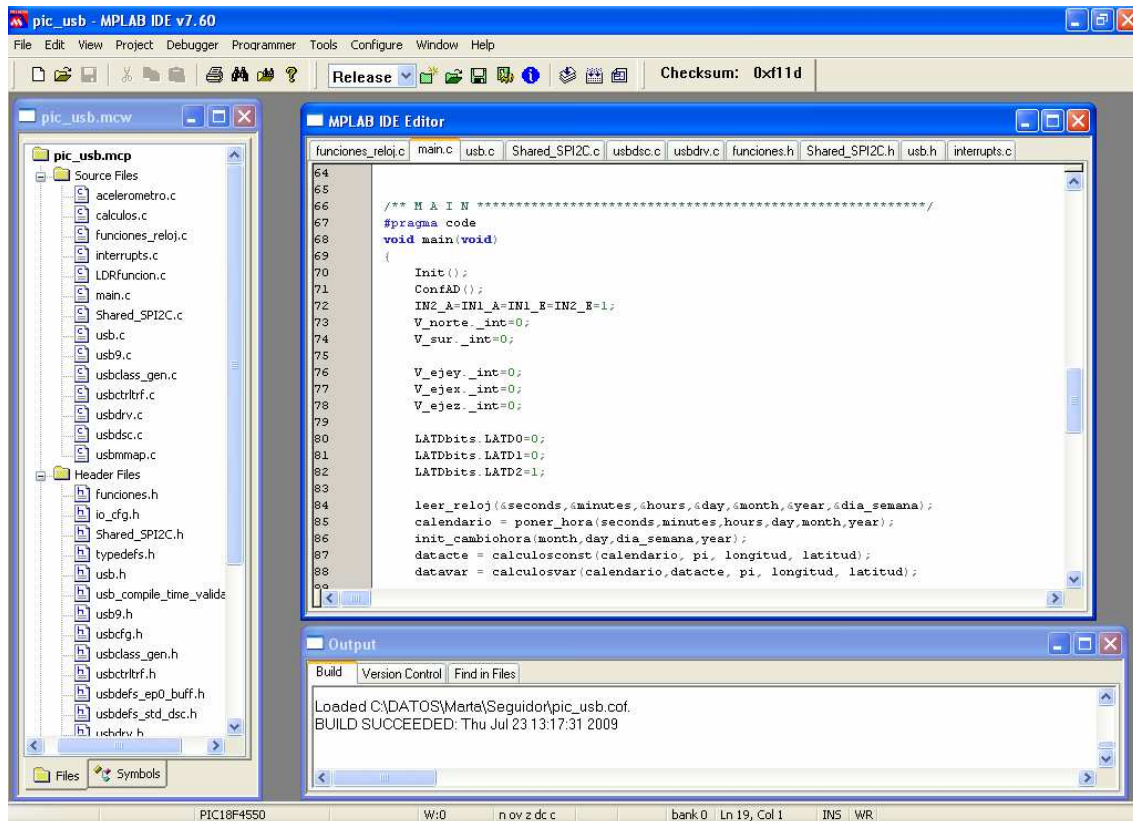


Figura 2.4. Entorno de programación MPLAB v7.60

La programación del PIC será llevado a cabo por el programa *PICDEM FS USB Demo Tool - Version 1.00*

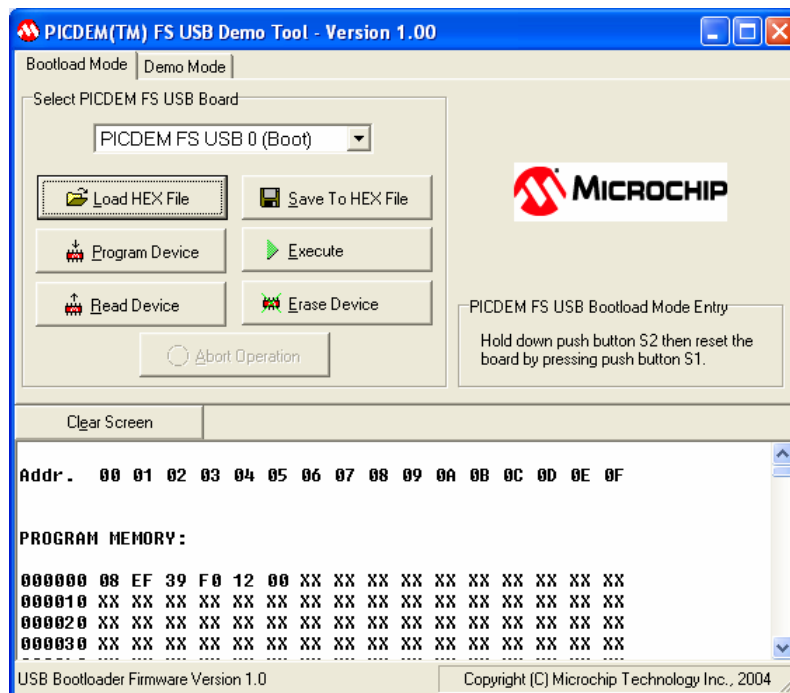


Figura 2.5. PICDEM FS USB Demo Tool - Version 1.00

2.2. Modulo de actuación

2.2.1. Placa de potencia

Esta placa debe entregar la potencia necesaria a los motores para que pueda ser orientada. La placa está diseñada para entregar 12V de corriente continua y 3A mediante un puente en H que emplea transistores MOSFET.

El circuito está compuesto por dos transistores canal P (SFP9540) y dos canal N (IRFZ24N) que permiten el paso de hasta $-17A$ y $17A$ respectivamente. Los diodos que se encuentran alrededor son para proteger el circuito de las corrientes inversas debidas al arranque y parada de los motores. A continuación una imagen del circuito:

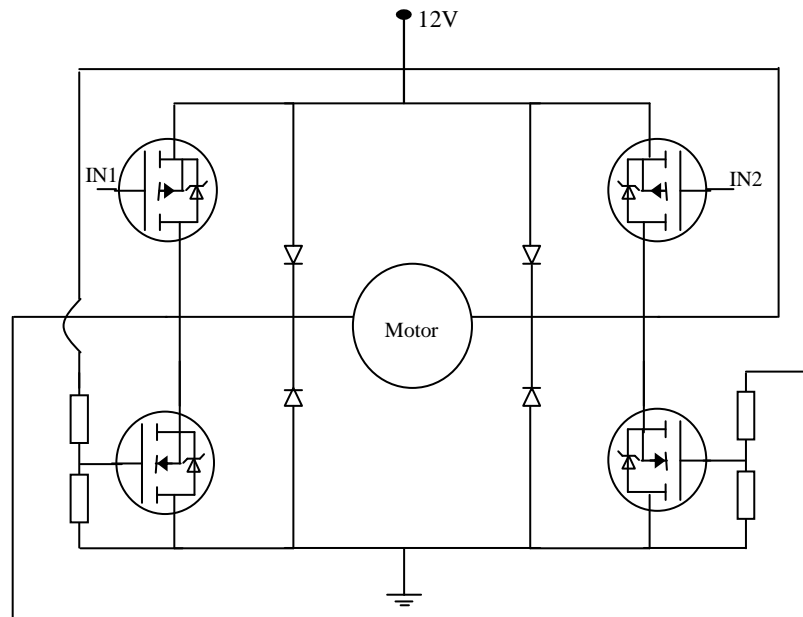


Figura 2.6. Puente en H

Las entradas IN1 e IN2 controlan el sentido de giro de los motores, debido a que variando su valor abriremos un camino a tierra u otro.

IN1	IN2	Estado del motor
1	1	Parado
1	0	Giro a la izquierda
0	1	Giro a la derecha
0	0	Configuración prohibida

Tabla 2.2. Valores de las entradas del puente H

El funcionamiento del puente H es el siguiente, si las entradas tuvieran un valor de $(IN1, IN2)=(1,1)$ ambos transistores NMOS estarían cerrados, por lo que no pasaría corriente de drenador a fuente y el motor se mantendría parado. Si la entrada fuera $(0,1)$ o $(1,0)$ uno de los caminos entre V_{cc} y tierra se abriría, permitiendo el paso de corriente a través del motor y haciéndolo girar en un sentido u otro dependiendo de la configuración, estas situaciones podemos observarlas en la *figura 2.7*. la configuración $(1,0)$ se muestra en color rojo, y la $(0,1)$ en verde. Por último, la configuración $(0,0)$ está prohibida porque ambos transistores NMOS estarían dejando pasar corriente a través de ellos lo cual haría que se quemara el motor, por lo que debe evitarse siempre introducir esta combinación en las entradas.

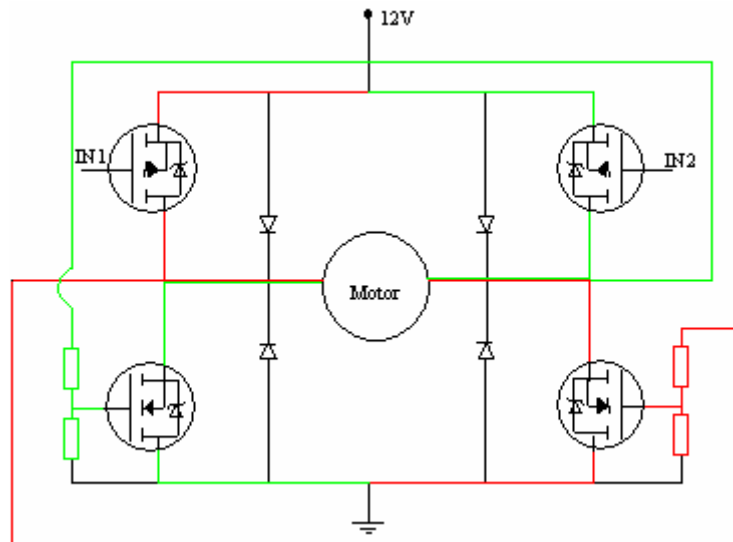


Figura 2.7. Configuraciones de las entradas y funcionamiento del puente H

El PIC no puede entregar más de 5V, y los motores necesitan 12V para funcionar, por lo que es necesario un comparador LM393 que se encargará de dar 12V cuando la entrada del PIC sea 5V. El LM393 presenta el siguiente patillaje:

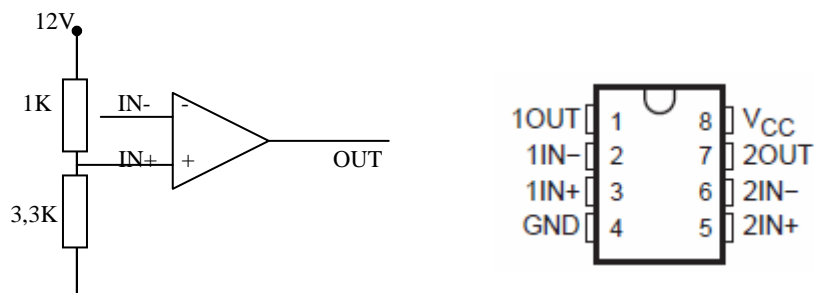


Figura 2.8. Diagrama de pines del LM393

Como se ve en la *figura 2.8.* el circuito para el comparador, se ha puesto un voltaje de referencia de unos 2,5V, cuando la señal que procede del PIC no supera ese voltaje de referencia, la señal que saca el comparador es nula, cuando el PIC manda un uno, la señal que saca el comparador son 12V que es el voltaje que está alimentado el comparador.

En la *figura 2.9.* se ve una imagen completa de la placa. Se ha colocado un diodo de 6A para proteger la placa en caso de que se conecten mal los cables de fuente y tierra, y un condensador que estabiliza y filtra la señal.

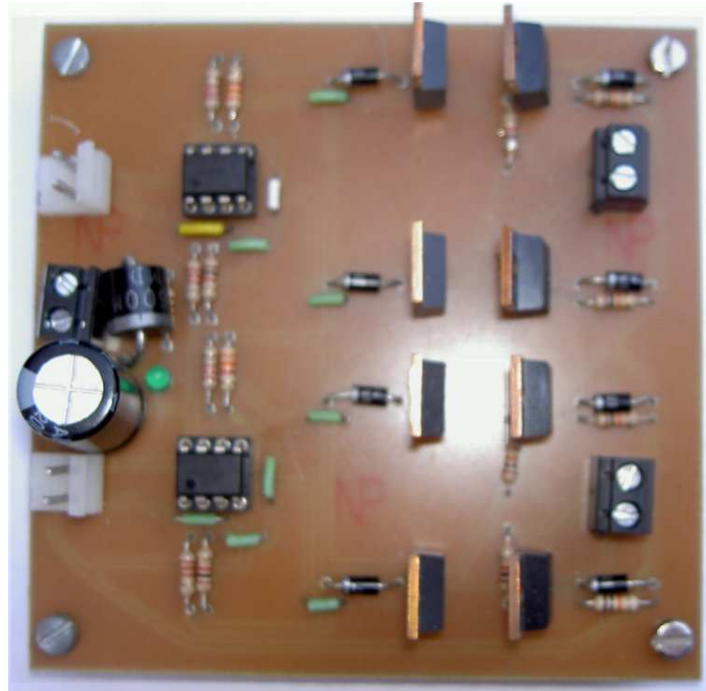


Figura 2.9. Placa de potencia

2.3. Módulo de sensores

2.3.1. Sensor de iluminación

Este sensor consta de cuatro fotorresistencias (LDR, Light Dependent Resistor), situadas en los puntos cardinales. Las LDR son un tipo de resistencias que varían su valor en función de la cantidad de luz que les llegue, en el caso de las utilizadas en este trabajo varía de $28\text{ K}\Omega$ a $4.2\text{ M}\Omega$.

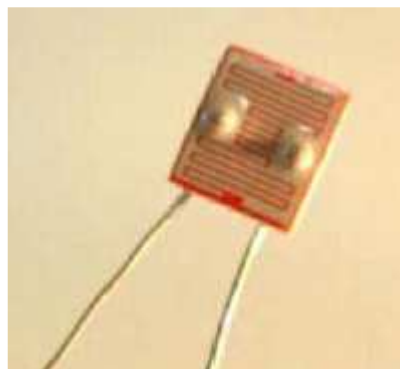


Figura 2.10. LDR

El valor de la resistencia es mayor cuanto menor luz le llegue y presentan un retardo de milisegundos al cambiar la intensidad luminosa que reciben, aunque este retardo no es significativo en la aplicación que nos ocupa.

El montaje de las LDR podemos verlo en la *figura 2.11*. Esta placa se coloca en el mismo plano que los paneles fotovoltaicos a controlar. El objetivo es que las LDR tengan el mismo valor de resistencia dos a dos, lo que significará que la luz está llegando perpendicular a las placas. El motivo de poner paneles opacos (de unos 2.5 cm de altura) entre las LDR es proyectar sobre cuando los paneles no se encuentren perpendiculares.

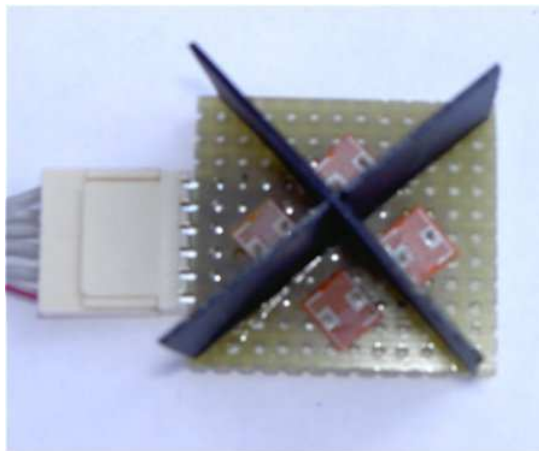


Figura 2.11. Sensor de iluminación

El funcionamiento de este dispositivo se puede ver en la *figura 2.12* a) Los paneles fotovoltaicos están perpendiculares a la dirección de los haces, por lo que ambas fotorresistencias tendrán el mismo valor. Sin embargo, en b) los paneles forman un ángulo con la horizontal y se observa fácilmente que a una de las LDR le llega más luz que a la otra, por lo que la primera presentará un valor menor de resistencia que la segunda.

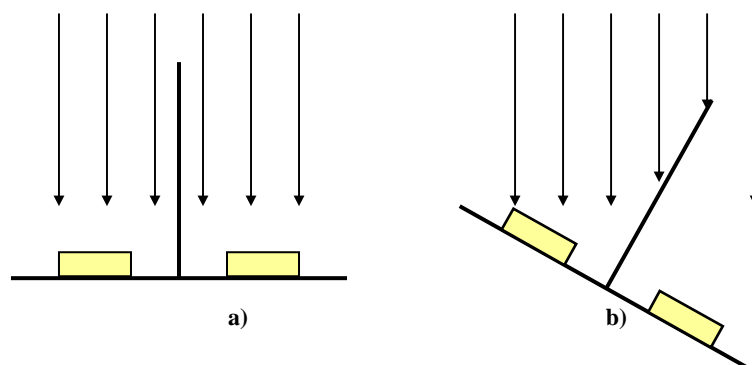


Figura 2.12. Funcionamiento del sensor de iluminación.

2.3.2. Sensor de inclinación

Es necesario saber la posición de la plataforma para poder llevarlo a la posición deseada, se ha tenido que buscar una forma alternativa a los encoders del prototipo ya que el seguidor carece de ellos, por lo que se ha optado por un acelerómetro de 3 ejes.

El acelerómetro usado es el MMA7260QT de Freescale Semiconductor, que se puede observar en la siguiente imagen:

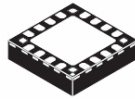


Figura 2.13. Vista desde arriba MMA7260QT

Acelerómetro capacitivo con compensación en temperatura y selector de g para elegir entre 4 tipos de sensibilidad. El acelerómetro mide la aceleración de la gravedad en los tres ejes, X, Y, Z. De esta forma, midiendo las componentes de la gravedad en cada eje, se determina el ángulo de inclinación que tiene el seguidor. En la siguiente *figura 2.14*, proporcionada por el fabricante, vemos las medidas en distintas posiciones:

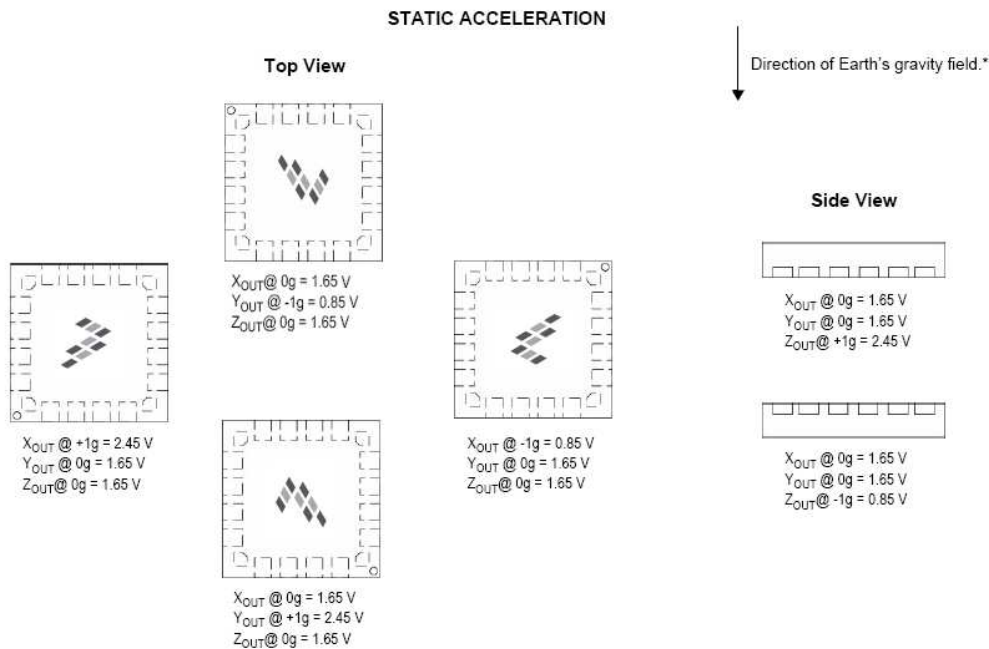


Figura 2.14. Respuesta del acelerómetro

En la figura se observa que los voltajes varían entre 2.45V y 0.85V en función de la orientación del eje respecto a la dirección de la aceleración de la gravedad terrestre. Si está orientado en la misma dirección y sentido que \bar{g} el resultado será 2,45V, si está en la misma dirección pero en sentido contrario 0.85V. Por último si la dirección del eje es perpendicular a la gravedad la salida será 1.65V.

La figura 2.15 muestra el montaje empleado para el circuito. Se tendrá en cuenta que el voltaje de alimentación de este circuito es 3.3 V, se usará un regulador LM3940.

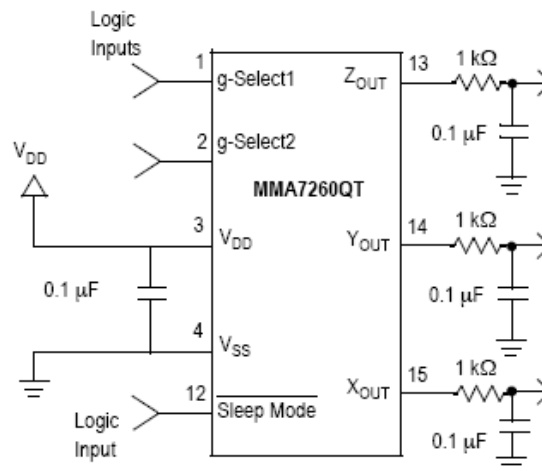


Figura 2.15. Montaje del acelerómetro

Las patillas 1 y 2 seleccionan la sensibilidad del acelerómetro, en la siguiente tabla se muestran los valores que pueden tomar las entradas y la sensibilidad a la que corresponde.

g-Select2	g-Select1	Rango	Sensibilidad
0	0	1.5g	800mV/g
0	1	2g	600mV/g
1	0	4g	400mV/g
1	1	6g	200mV/g

Tabla 2.3. Sensibilidad del acelerómetro

Para esta aplicación se ha seleccionado la configuración (0,0) que permite el rango de variación de 800mV/g el mayor rango de sensibilidad que permite el dispositivo.

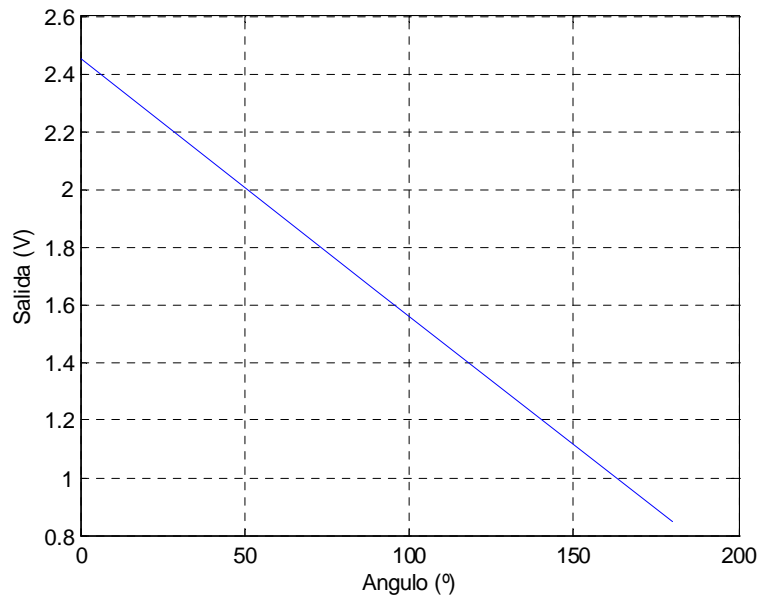


Figura 2.16. Recta de calibración

La recta de calibración que se obtiene es: $\text{Salida (V)} = -0.0089 \cdot \theta + 2.45$ donde θ representa el ángulo del eje con respecto al sentido de la gravedad terrestre.

En la siguiente figura se ve una imagen del circuito real montado.

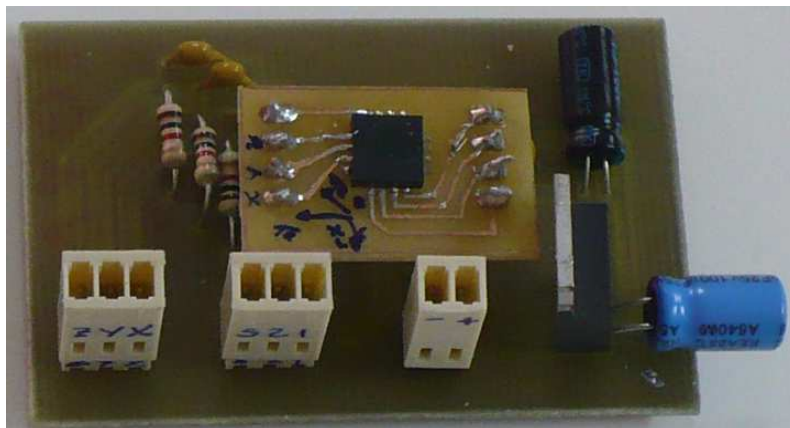


Figura 2.17. Circuito del acelerómetro

2.3.3. Reloj externo con alimentación independiente

Este dispositivo se encargará de mantener almacenada la fecha y la hora, por si el PIC pierde la alimentación y el programa se reinicia. Es importante que la fecha y la hora sean siempre correctos puesto que el seguimiento astronómico necesitará de estos datos para su correcto funcionamiento.

Para este propósito se ha elegido el reloj en tiempo real DS1307 de Dallas Semiconductor. Éste incluye compensación para meses de menos de 31 días y saltos de año y se le puede conectar una batería de 3V para mantenerlo en funcionamiento cuando la alimentación principal falle.

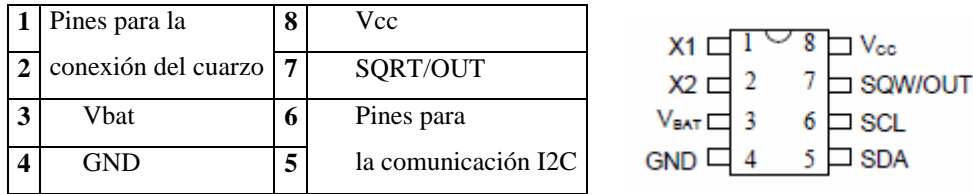


Figura 2.18. Diagrama de pines del RTC

Entre los pines 1 y 2 se conectará un cuarzo estándar de 32768kHz. En el pin 3 se conectará la batería auxiliar de 3V. El pin 7 sirve para generar una onda cuadrada de frecuencia variable, en esta aplicación no será necesario, por lo que se colocará una resistencia a pull-up para deshabilitarla. Finalmente la comunicación con el PIC se realizará por I2C, protocolo serie de comunicación que emplea dos líneas, SCL y SCA, pines 5 y 6 del integrado.

El reloj contiene un registro de control, que sirve, básicamente para configurar el puerto SQW. Y una memoria RAM de 56bytes. Las direcciones de memoria son los que se muestran en la *figura 2.19*.

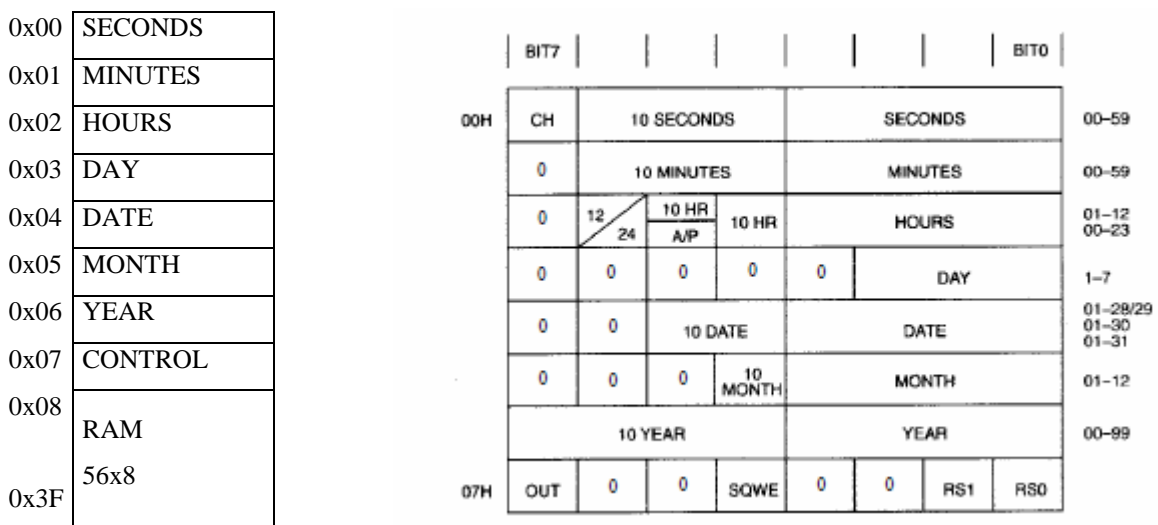


Figura 2.19. Posiciones de memoria del RTC

Hay que destacar que la información que guarda el reloj en sus registros está codificada en BCD, los 4 bits menos significativos del registro guardan las unidades del número y los 4 bits superiores guardan las decenas del número.

El bit más significativo de los segundos (posición 0x00) debe estar a cero para que el reloj comience a funcionar. Además se configurará de tal manera que el reloj funcione en modo 24 horas. En el registro de configuraciones (posición 0x07) se pondrán todos los bits a cero para desactivar la opción de que genere una onda cuadrada en el pin SQRT.

En la *figura 2.20* se muestra un esquema de las conexiones del reloj con el microcontrolador y una imagen del circuito.

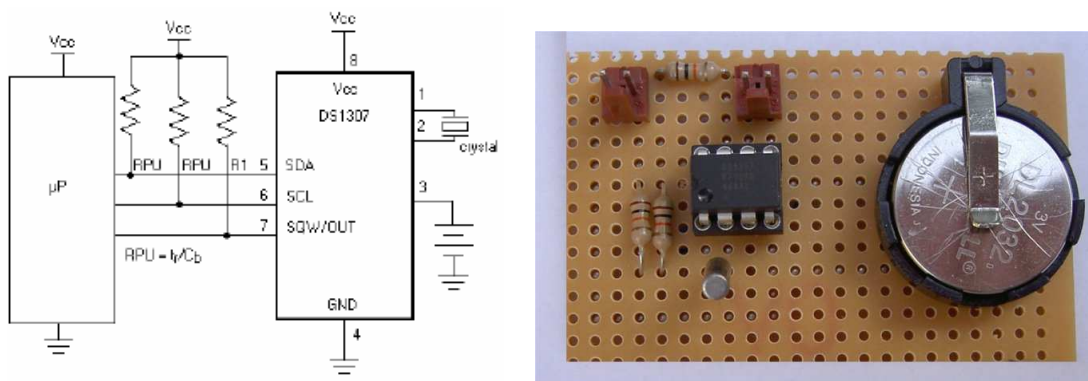


Figura 2.20. Esquemático y circuito del RTC

Protocolo de comunicación I2C

Protocolo serie, bidireccional de dos hilos, SDA es la línea de datos y SCL es la línea de reloj que permite sincronizar los periféricos con el microcontrolador. La velocidad de es de 100Kb/s. El maestro genera la señal de reloj en la línea SCL, controla el acceso al bus y genera la señales de START y STOP.

El bus está controlador por el microcontrolador como maestro, mientras que los dispositivos se conectan como esclavos. Cada uno de ellos tiene una dirección asociada para que sepa cuando el maestro está comunicándose con él. La dirección del RTC

DS1307 es 0x0Db, el último bit (b) cambia según se quiera leer o escribir; cero para escritura y uno para lectura.

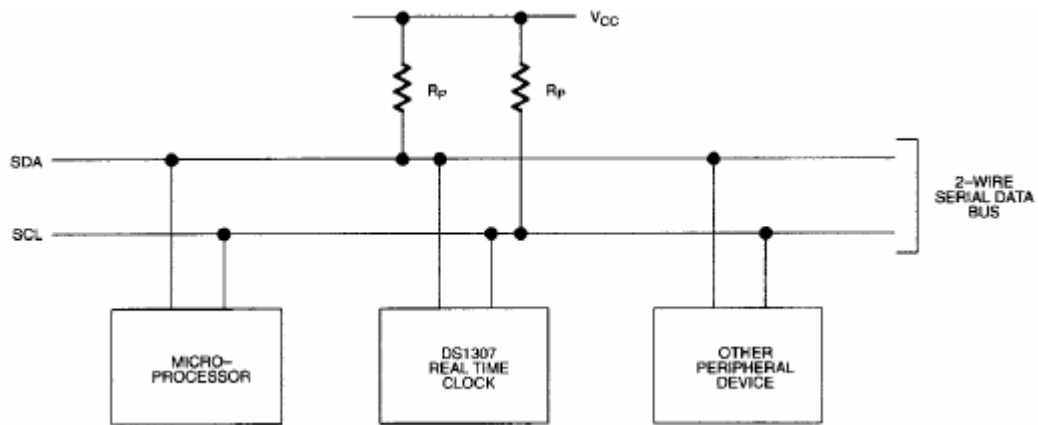


Figura 2.21. Configuración típica del bus

Los datos se transfieren únicamente cuando el bus está libre. Durante la transferencia de datos, la línea de datos (SDA) tiene que permanecer estable mientras la línea de reloj (SCL) está en alta. Cambios en SDA durante el periodo en alta de reloj podrán interpretarse como señales de control.

Se definen las siguientes condiciones para el bus:

- **Bus libre:** Ambas líneas SDA y SCL permanecen en alta.
- **Condición de inicio (START):** El maestro cambia la línea SDA de alta a baja mientras SCL permanece en alta.
- **Condición de parada (STOP):** El maestro cambia de baja a alta la señal de SDA mientras SCL permanece en alta.
- **Dato válido:** El estado de SDA representará un dato válido cuando, después de la condición de START, SDA se mantenga estable durante el periodo en alta de SCL. El dato en la línea SDA debe cambiar mientras el reloj está en baja. Habrá un pulso de reloj por bit de dato.

Cada transferencia de dato se inicia con la condición de START y se termina con la de STOP. El número de bytes transferidos entre el START y el STOP es ilimitado, y lo determina el master.

- **Reconocimiento:** Cada esclavo, cuando reconoce su dirección, es obligado a generar un bit de reconocimiento (ack) después de cada byte recibido. El master debe generar un pulso extra de reloj el cual está asociado al bit de reconocimiento. El esclavo pone a cero la línea SDA durante el pulso extra de reloj. El master debe señalar el final del dato al esclavo para que no genere el bit de reconocimiento en el último byte, y dejar la SDA en alto para permitir que el master genere la condición de STOP.

Modos de funcionamiento de DS1307:

1. Escritura

El PIC envía un START. A continuación envía la dirección del esclavo con el último bit a 0 por tratarse del modo escritura: 0b11010000. Se recibe un bit de reconocimiento, y entonces el PIC comienza enviando la dirección de registro donde va a escribir. Tras recibir el bit de reconocimiento, comienza a enviar los bytes de información y se recibe por cada uno de ellos un bit de reconocimiento. Se termina la transmisión con el PIC enviando un STOP.



Figura 2.22. Secuencia de escritura

2. Lectura

El PIC envía un START, para generar en primer lugar una secuencia de escritura, donde se le indica al esclavo la dirección donde se va a leer. Tras estos dos bytes (el de dirección del dispositivo y el de la dirección de lectura) se genera un STOP y un nuevo START para comenzar la lectura. El PIC envía la dirección del esclavo acabada en 1 por ser lectura: 0b11010001 y el esclavo contesta con el bit de reconocimiento. A continuación el esclavo envía los bytes de información mientras que el master genera los bits de reconocimiento entre byte y byte de información recibida.

Para que el esclavo termine de enviar el master genera un “no reconocimiento” y envía un STOP.

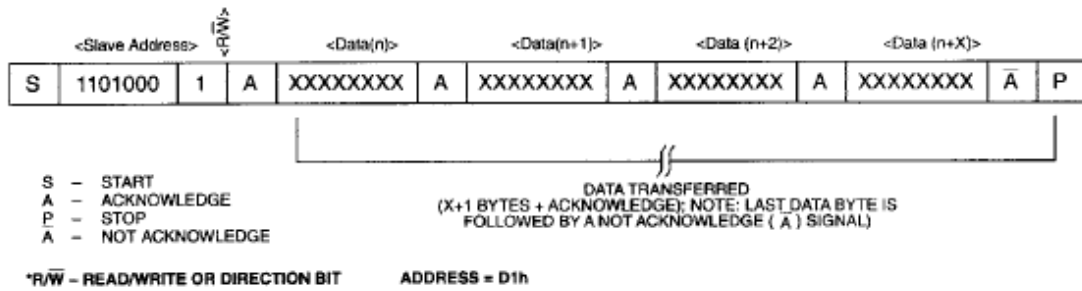


Figura 2.23. Secuencia de lectura

2.4. Placa de interconexión

A continuación *figura 2.24* se muestra la placa de interconexión de la placa USBLAB que contiene el PIC con el resto de módulos descritos en este capítulo. A lo largo de esta sección se muestra y se explica cada una de las partes que la contienen.

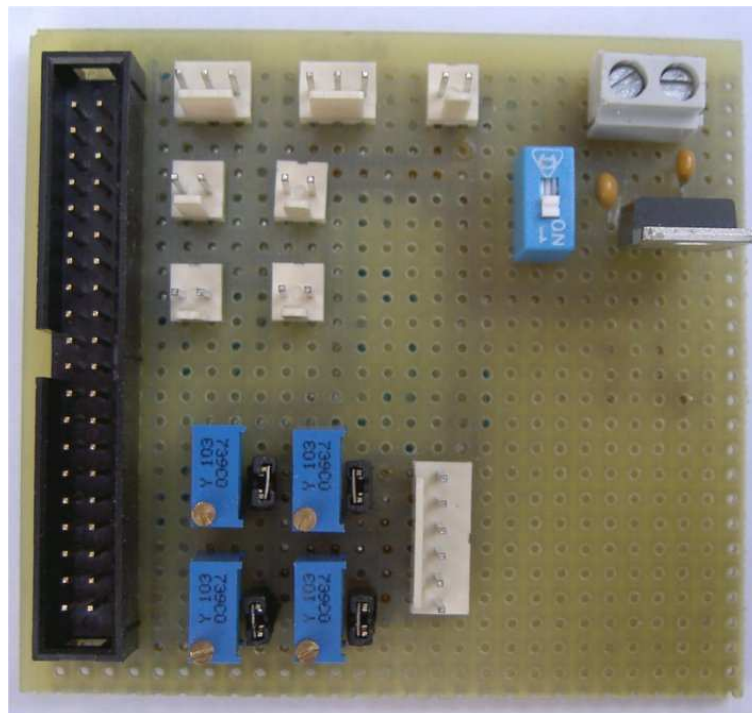
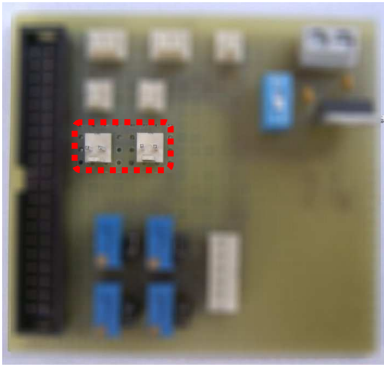
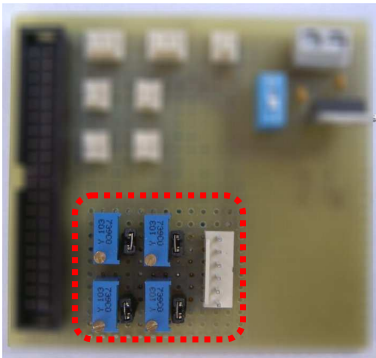


Figura 2.24. Placa de interconexión



Conexión de las salidas de control del microcontrolador con los motores. Dos conectores de dos hilo, uno por cada motor, para poder introducir las tres combinaciones permitidas de entrada al puente H. El conector lleva las salida de los pines <4:7> del puerto D.



Conexión para el sensor de iluminación. Un conector para 6 hilos, 4 potenciómetros y 4 jumpers. El conector lleva a las entradas analógicas A0, A1, A2 y A3 del PIC, la caída de tensión de las LDRs, para que se actúe en consecuencia. Los otros dos hilos son tierra.

Los potenciómetros y los jumpers, hacen la función de calibrar la sensibilidad del sensor, haciéndolo más o menos sensible a las variaciones de luz. Los potenciómetros se han ajustado a $10K\Omega$. Los jumpers cumplen la misión del posible ajuste posterior de los potenciómetros, aislándolos del resto del circuito. El circuito de conexión se puede ver en la *figura 2.25*.

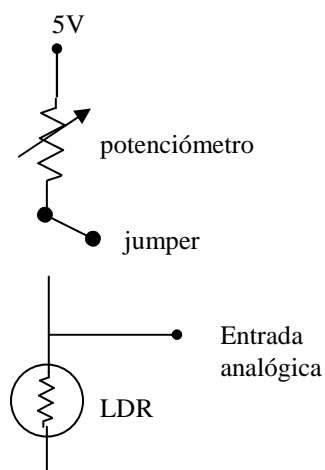
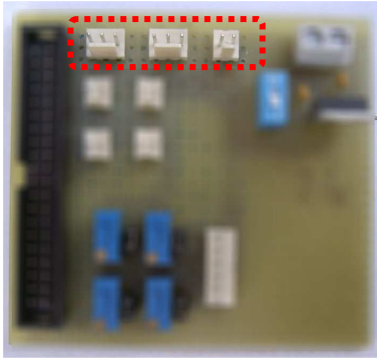
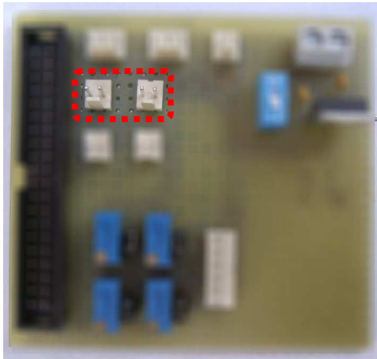


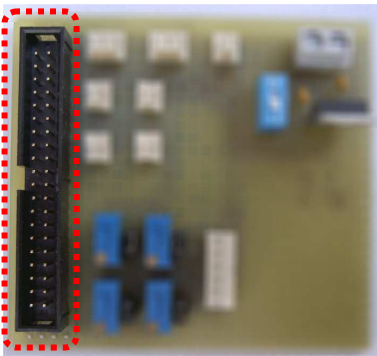
Figura 2.25. Conexión al PIC del sensor de iluminación



Conexiones del inclinómetro. Hay tres conectores, el que tiene dos hilos es para la alimentación, ya se comentó que se emplea un regulador LM3940 porque de la placa salen 5V y el acelerómetro necesita 3.3V. De los otros dos, uno es para seleccionar la sensibilidad y el modo sleep, y el otro son las salidas analógicas de los tres ejes.



Conexión del reloj. Tienes dos conectores uno que le llevan la alimentación principal, y los otros son los dos hilos de la conexión I2C. La línea de datos SDA se conecta al B1, la línea de reloj SCL se conecta con el B0.

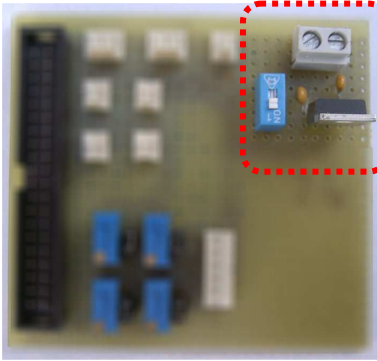


Conector macho de 40 pines que conecta la placa principal con los pines del microcontrolador. Esquema de correspondencia entre los pines y los puerto, se puede ver en la siguiente figura.

marca & muesca

B0	1	2	D0
B1	3	4	D1
B2	5	6	D2
B3	7	8	D3
B4	9	10	D4
B5	11	12	D5
B6	13	14	D6
B7	15	16	D7
GND	17	18	GND
A0	19	20	E0
A1	21	22	E1
A2	23	24	E2
A3	25	26	NC
A4	27	28	NC
A5	29	30	NC
DAC	31	32	C7
VCC	33	34	C6
RESET	35	36	GND
??	37	38	GND
??	39	40	GND

Figura 2.26. Pines del conector



Alimentación de la placa principal. El regulador 7805 transforma los 12V que vienen de la placa de potencia en 5V para alimentar la parte digital del circuito. Los condensadores filtran y estabilizan la señal. Se puede ver el circuito en la *figura 2.27*.

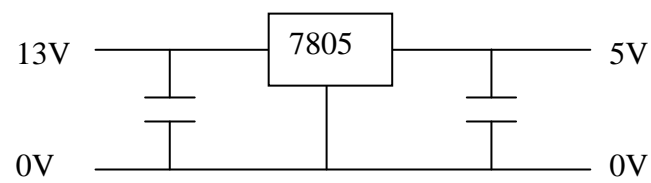


Figura 2.27. Circuito del 7805

3. FUNCIONAMIENTO

El sistema dispone de dos modos de funcionamiento:

Modo astronómico: En esta forma de funcionamiento el seguidor se mueve de forma constante a lo largo del día situándose en la posición que le corresponda según la hora del día. Emplea el inclinómetro para saber en qué posición se encuentra y a cual debe moverse.

Modo sensorial: El seguidor se mueve comparando los voltajes de las LDR, colocando las placas perpendiculares al sol.

Actualmente el seguidor emplea el modo astronómico para colocarse en la posición por la que sale el sol cada mañana (a la hora del ocaso) y emplea el seguimiento sensorial a lo largo del día.

Además dispone de un modo manual que se activa cambiando el estado de una variable de cero a uno. Este modo podrá ser activado en cualquier momento y suspenderá la actividad del seguimiento sensorial.

En la siguiente figura se muestra un diagrama de flujo de funcionamiento general del sistema, que se detallará en los siguientes apartados de este capítulo.

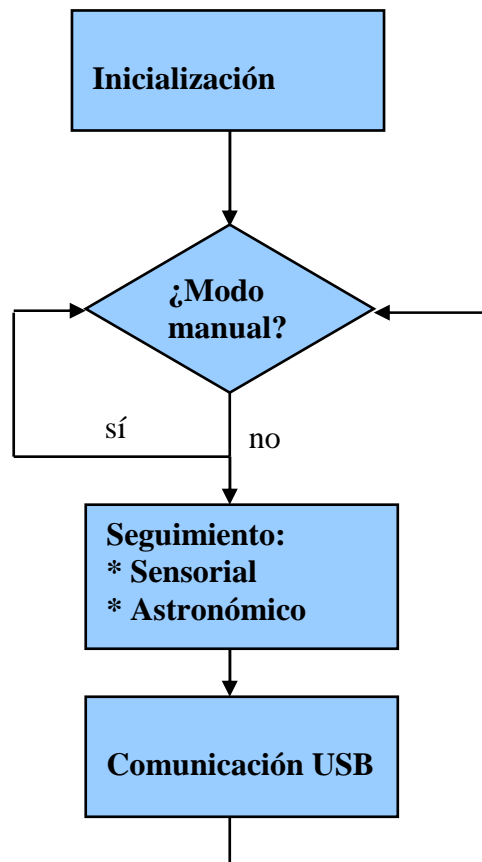


Figura 3.1. Diagrama de flujo del sistema

3.1. Inicialización

En esta fase del programa se inicializan los valores de las variables que se van a usar en el resto del programa. Además se ejecutan una serie de subrutinas que inicializan los puertos, las comunicaciones UBS, los puertos analógicos, las interrupciones y el reloj interno se sincroniza con el externo.

A continuación se detallan las subrutinas:

- **mInitializeUSBDriver():** Inicializa y configura el USB para permitir la comunicación entre el PC y el microcontrolador. El código base, lo facilita

MICROCHIP y ha sido modificado para ajustarlo al uso de la USBLAB por Santiago Cifuentes.

- **InitTris():** Los TRIS se emplean para iniciar los puertos como entradas o salidas. A continuación se detallan el contenido de esta función:
Los bits <7:4> del puerto A como bits de escritura, del <3:0> se inician como bits de lectura (TRISA=0b00001111). Estos 4 últimos bits se emplean como puertos analógicos para las LDR.
Los bits <7:1> del puerto B como bits de escritura, mientras que <1:0> se inician como bits de lectura (TRISB=0b00000011). Los bits <1:0> se emplean en la comunicación I2C, como línea de datos (SCA) y línea de reloj (SCL) respectivamente.
El puerto D se inicia por completo como puerto de escritura (TRISD=0b00000000). Los bits <7:4> se emplean para controlar los motores.
Los bits <2:0> del puerto E se inician como bits de lectura y el resto de escritura (TRISE=0b00000111). Los bits <2:0> son bits analógicos donde se encuentra conectado el inclinómetro, cada uno de estos nos da uno de los ejes.
- **Init_Interrupts():** Configura las interrupciones del PIC18F4550. Es necesario modificar algunos registros de configuración del microcontrolador para activar o desactivar ciertas interrupciones. Las interrupciones que se tiene activadas para esta aplicación son las interrupciones externas de los temporizadores.
- **ConfAD():** Configura los registros de control de los conversores A/D. El microcontrolador dispone de 13 entradas analógicas para convertir este tipo de señales en digitales de 10 bits. Se han configurado AN7:AN0 como entradas analógicas y AN12:AN8 como entradas digitales.
- **Sincronización del reloj externo con el interno:** para este fin se han creado varias funciones. Una que lee el reloj externo, otra que inicia la variable que contiene la hora del reloj con los datos leídos del reloj y la última calcula los cambios de hora según la fecha del año.

- **leer_reloj:** Lee del reloj externo hora, minutos, segundos, día, mes, años y día de semana.
- **poner_hora:** Guarda los datos que se han leído anteriormente en una variable de tipo HORA que es un estructural de la siguiente forma:

```
typedef union HORA {
    struct {
        unsigned char anio;
        unsigned int dia;
        unsigned char hora;
        unsigned char minuto;
        unsigned char segundo;
        unsigned char cambiohora;
    };
} HORA;
```

La variable cambiohora sirve para almacenar un uno o un dos. Esto se empleará para sumarlo a los cálculos de la hora de orto y del ocaso, todos estos cálculos me devuelven la hora solar, y para compararla con la hora del PIC, habrá que pasarla a hora civil, sumando uno si nos encontramos en horario de verano y dos si nos encontramos en horario de invierno.

- **init_cambiohora:** Calcula si hay que hacer una corrección de hora por el cambio de horario de verano y de invierno. Calcula si estando en el mes de marzo u octubre la fecha coincide con el último sábado y añade una hora en octubre y la quita en marzo.

3.2. Seguimiento

Se tienen programados dos tipos de seguimiento, uno mediante el sensor de iluminación y otro mediante el inclinómetro. A continuación se detallan cada uno de ellos y las funciones que emplean.

3.2.1. Seguimiento sensorial

A continuación se muestra un diagrama de flujo del programa principal para el seguimiento sensorial, *figura 3.2*. En el diagrama se muestra la lectura de sensores y los controles para la actuación sobre el motor de elevación. El esquema para el motor de azimutal es el mismo, cambiando norte por oeste y sur por este.

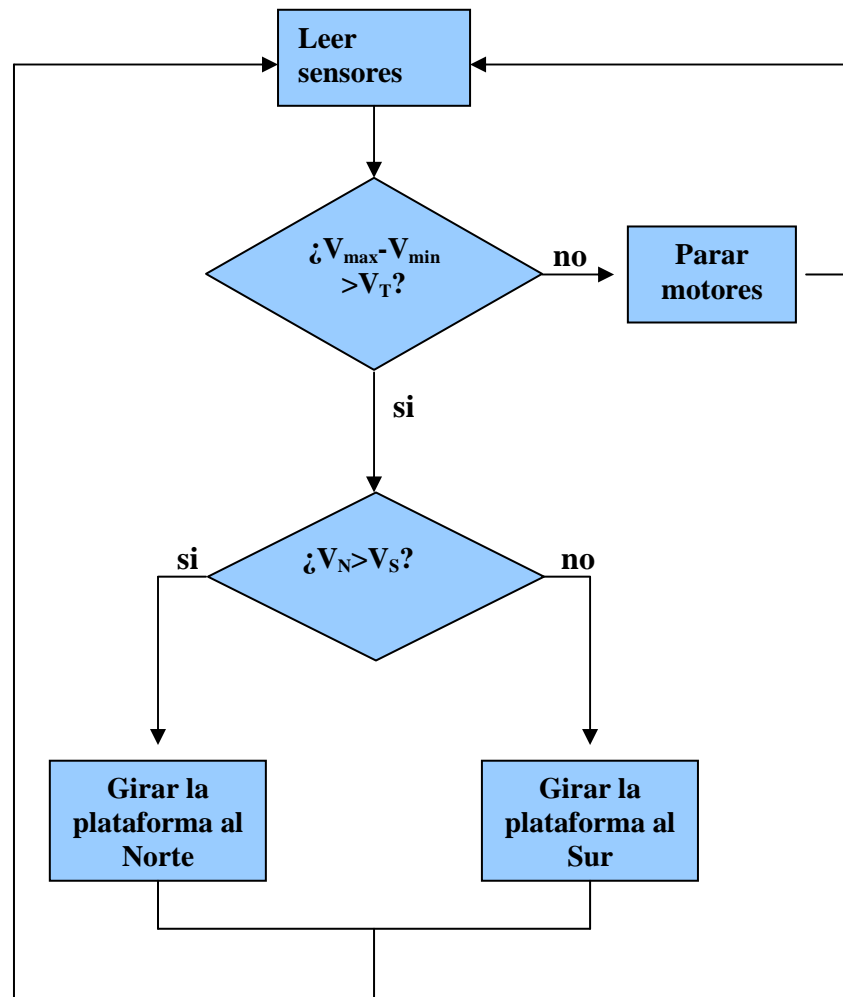


Figura 3.2. Diagrama de flujo del seguimiento sensorial

La rutina para leer los sensores sigue los siguientes pasos:

Configura los registros de control para la conversión A/D. Los registros ADCON1 y ADCON2, se configuraron en la inicialización, estos registros configuran las 7 entradas como analógicas y los voltajes de referencia sean V_{dd} y GND. El registro ADCON0 configura la entrada de la que se van a tomar los datos analógicos.

El bit `ADCON0bits.GO` se borra cuando se ha terminado de leer el puerto, por lo que, se espera a que este bit se borre para almacenar el resultado de la lectura en una variable.

Los datos se almacenan en los registros `ADRESL` y `ARDESH` de un byte cada una. Para terminar se almacenan estos dos bytes en una variable tipo entero. Para leer otra entrada analógica basta con volver a configurar el `ADCON0` y empezar el proceso.

El voltaje umbral se establece como la quincuagésima parte del voltaje mayor de los dos que se hayan leído.

3.2.2. Seguimiento astronómico

En la *figura 3.3.* se muestra un diagrama de flujo del programa de seguimiento sensorial, a continuación se detallan las partes.

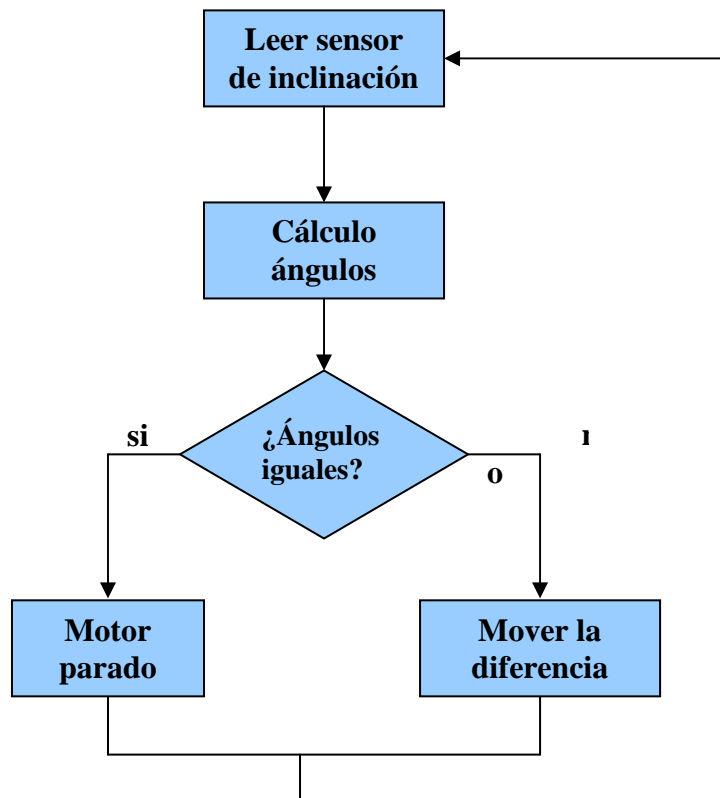


Figura 3.3. Diagrama de flujo del seguimiento astronómico

La lectura del sensor de inclinación se realiza de la misma manera que la lectura del sensor de iluminación.

A continuación se muestra una lista de funciones para el cálculo teórico de los ángulos, estas funciones están basadas en las ecuaciones que se explicaron en el capítulo 1.4. Movimiento solar.

- **DATOSVARIABLES calculosvar (HORA reloj, DATOSFIJOS dataf, float const pi, float const longitud, float const latitud).** Esta función está compuesta a su vez, por:
 - *float calculaanghorario(unsigned char h,unsigned char m,unsigned char s, float const longit, float Ectiempo)* (contiene la Ecu1.8. capítulo 1.4. Movimiento solar)
 - *float calculaelevacion(float const latitud, float declinacion, float anghorario, float const pi)* (contiene la Ecu1.6. capítulo 1.5. Movimiento solar)
 - *float calculaazimutal(float const latitud, float declinacion, float anghorario, float elevación, float const pi)* (contiene la Ecu1.7. capítulo 1.4. Movimiento solar)

- **DATOSFIJOS calculosconst (HORA reloj, float const pi, float const longitud, float const latitud).** Formada a su vez por:
 - *float calculadeclinacion(unsigned char dia, float const pi)* (contiene la Ecu1.1. capítulo 1.4. Movimiento solar)
 - *float calculacenitmaximo(float const latitud, float declinacion, float const pi)* (contiene la Ecu1.6. capítulo 1.4. Movimiento solar)
 - *float ecuaciondetiempo(unsigned char dia, float const pi)* (contiene la Ecu1.3. capítulo 1.4. Movimiento solar)
 - *float ocase(float ws, float const longitud, float Et, unsigned char horario)* (contiene la Ecu1.10. capítulo 1.4. Movimiento solar)
 - *float orto(float ws, float const longitud, float Et,unsigned char horario)* (contiene la Ecu1.9. capítulo 1.4. Movimiento solar)

Las variables DATOSFIJOS y DATOSVARIABLES, son dos estructurales compuestos por varias variables de tipo coma flotante. Los datos fijos se refieren a las

variables que se calculan una vez al día, mientras que los datos variables cambian su valor a lo largo del día.

A continuación se muestra la estructura de las variables ya mencionadas:

```
typedef union DATOSFIJOS {  
    struct {  
        float declinación;  
        float ecuaciontiempo;  
        float cenitmax;  
        float amanece;  
        float anochece;  
    };  
} DATOSFIJOS;
```

```
typedef union DATOSVARIABLES {  
    struct {  
        float angulohorario;  
        float elevacion;  
        float azimutal;  
    };  
} DATOSVARIABLES;
```

Actualmente este tipo de seguimiento sólo está programado para que el seguidor se coloque por la hora del ocaso de la mañana siguiente. En el capítulo 4 Conclusiones y futuros trabajos se hablará de la posibilidad de aplicar este tipo de seguimiento en combinación con el sensorial.

3.3. Interrupciones

El programa tiene una interrupción programada por desbordamiento del contador. Cada segundo el contador se desborda y se da la interrupción, tiene programado un reloj. Para este fin se ha configurado el temporizador 1 del microcontrolador.

Este reloj además se actualiza en horario de verano y de invierno gracias a las funciones mencionadas en el apartado de inicialización de este mismo capítulo. Y una vez al día calcula las variables fijas que necesita para los cálculos de los ángulos de elevación y azimutal, a saber, declinación, ecuación de tiempo, cenit máximo, hora del amanecer y hora del anochecer.

3.4. Programa de monitorización

En este capítulo se presenta la ventana programada en matlab para el control manual del seguidor. En la *figura 3.4.* se ve completa y a continuación se detalla cada parte y su funcionalidad.

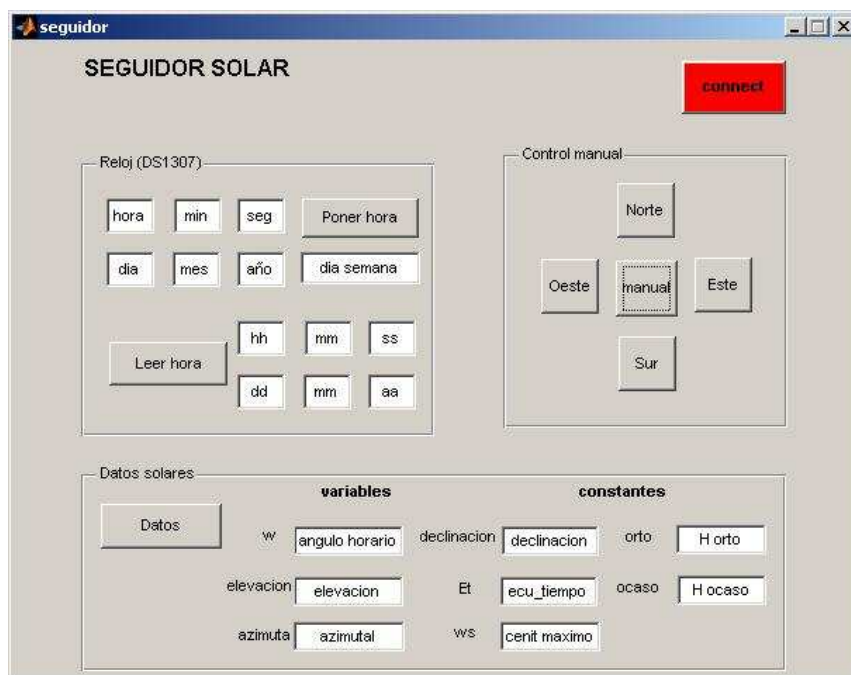


Figura 3.4. Ventana de control manual, gui de matlab.

En primer lugar está el botón de conexión, este sirve para conectar el PIC con el programa (*figura 3.5.*)



Figura 3.5. Botón de conexión

A continuación la agrupación de botones con el nombre de Reloj (DS1307) esta parte del programa sirve para poner en hora el reloj, y para comprobar la hora del reloj. Este reloj es externo al PIC y se comunica con él con I2C (*figura3.6.*).



Figura 3.6. Control del reloj externo

En esta parte de la gui encontramos dos partes diferenciadas, en la de arriba, se ha que introducir los números en las cajas: hora, min, seg... y pulsar el botón “Poner hora” para poner la fecha y la hora deseada en el reloj *figura 3.7.a*. Mientras que en la de abajo, pulsando el botón el programa devuelve la hora y la fecha almacenadas en el reloj en las cajas correspondientes: hh, mm, ss... *figura3.7.b*.



Figura 3.7. a. Agrupación de botones para poner la hora; b. Agrupación de botones para leer la hora

En la agrupación de control manual (*figura 3.8.*), se tienen 5 botones, uno central que sirve para poner el seguidor en modo manual, abandonando el seguimiento sensorial, este botón se mantendrá rojo mientras el control manual esté activo. Cuando se quiera parar el control manual basta con volver a pulsar el mismo botón que volverá al estado inicial (*figura 3.9.a*)

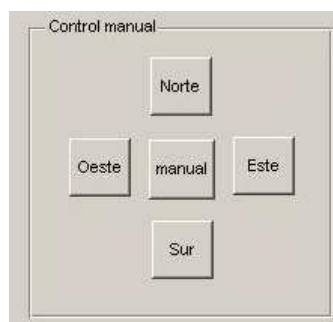


Figura 3.8. Control manual

Además tenemos 4 botones etiquetados con los puntos cardinales, estos botones sirven para hacer que el seguidor se mueva en esa dirección. Mientras el seguidor se esté moviendo en una dirección permanecerá de color azul, cuando se quiera parar el movimiento bastará con volver a pulsar el botón (*figura 3.9.b*).

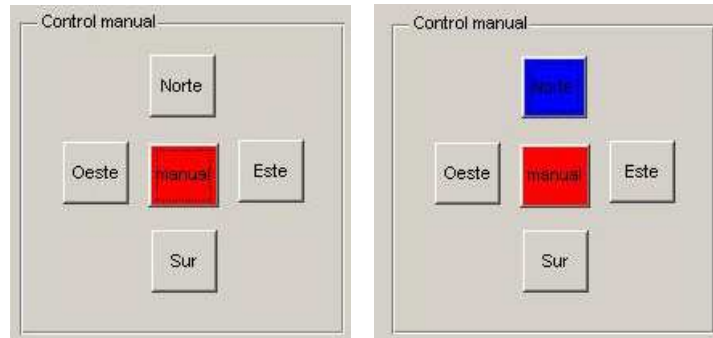


Figura 3.9. a. Control manual activo; b. Movimiento norte activo

Finalmente tenemos las variables que determinan la posición del sol en el cielo, estos datos son los que calcula el PIC a lo largo del día, *figura 3.10*.

Figura 3.10. Datos solares

Pulsado el botón datos las cajas se rellenan con los valores almacenados en el PIC, *figura 3.11*.

Figura 3.11. Datos solares almacenado en el PIC

4. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

Se ha desarrollado un seguidor solar con dos modos de funcionamiento, uno sensorial y otro astronómico. Actualmente el modo astronómico únicamente está disponible para colocar el sistema en la posición de salida del sol una hora después de la puesta del sol, en este capítulo se citará una aplicación más útil de este modo de seguimiento que ya se ha comenzado a desarrollar.

Además el dispositivo dispone de un modo manual que se controla por USB y para el cual se ha desarrollado una aplicación en Matlab para su motorización y control.

Se han fabricado las diferentes placas y se ha programado el PIC para albergar las funcionalidades mencionadas en los capítulos anteriores.

Por problemas técnicos en el seguidor de la facultad, y por problemas debidos a que los motores de la instalación son de 24 V y las placas se han desarrollado para un funcionamiento de 12V, no se ha podido dejar instalado. Subsananando dichos errores, el

seguidor funcionará correctamente, y para muestra de ello se ha instalado en el prototipo de años anteriores. [13] [14]

4.1. Futuros trabajos

Para aprovechar el seguimiento astronómico se ha desarrollado un modelo teórico de la irradiancia solar recibida sobre las placas a lo largo del año para cualquier hora del día. Este modelo servirá para saber que cantidad de luz debería estar llegando a las placas en cada momento y compararlo con el flujo de energía que está recibiendo el sistema gracias a un piranómetro que se instalará a tal efecto.

De la comparación surgirá una orden de cambiar de seguimiento sensorial a seguimiento astronómico en función de si la irradiancia recibida está en una banda de $\pm 20\%$ de la irradiancia esperada por el modelo teórico. Esta comprobación se hará cada treinta segundos y serán necesarias 8 medidas fuera del rango para que el sistema cambie de seguimiento.

Esto ayudará al sistema, en caso de aparición de nubes, a no perder la posición, pues cuando el sol reaparezca los paneles ya estarán orientados a esa posición evitando que el sistema pierda tiempo en encontrar la posición correcta mediante el seguimiento sensorial y evitando además desgaste de la mecánica del seguidor.

El modelo desarrollado supone que la irradiancia a lo largo del día se puede aproximar a una gaussiana, en la *figura 4.1.* se muestra unos datos del día 5 de Septiembre. Los parámetros que se necesitan para este ajuste son:

La altura máxima de la gaussiana (A): irradiancia máxima

La posición central de la gaussiana (c): medio día solar

Anchura a medio pico (b)

El parámetro b es el único que no se puede calcular directamente de la geometría solar por lo que este parámetro se obtendrá de una serie de datos de cien días para obtener la tendencia de dicho parámetro a lo largo de todo el año.

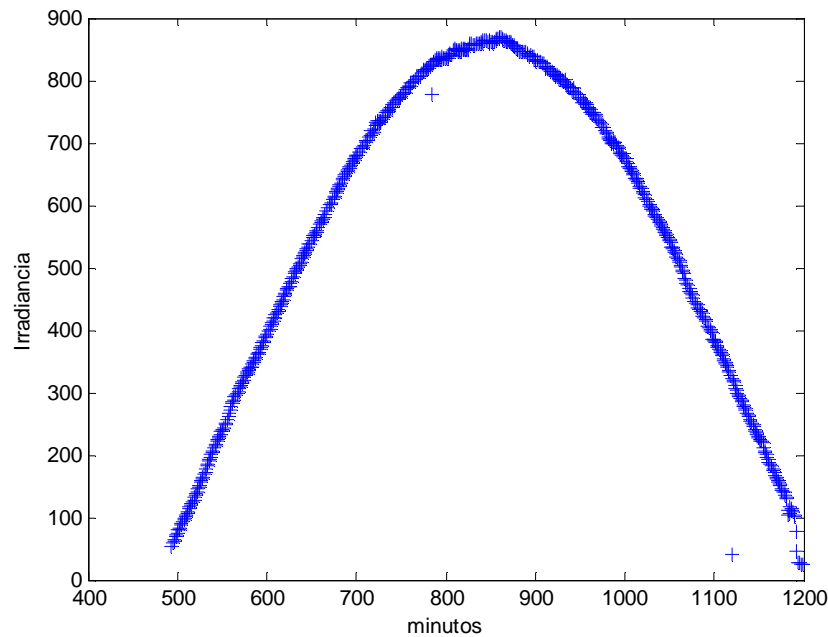


Figura 4.1. Datos de irradiancia para el día 5 de Septiembre

Por lo tanto, la curva a la que ajustaremos será la siguiente:

$$I = A \exp \left\{ - \left(\frac{x-b}{c} \right)^2 \right\} \text{ siendo } x \text{ los minutos del día}$$

Comencemos con c , este se obtendrá como $\frac{H_{\text{orto}} + H_{\text{ocaso}}}{2}$, sabiendo que H_{orto} y H_{ocaso} se calculan de la forma ya dicha en el capítulo 1.4 Movimiento solar. La irradiancia máxima (A) se obtendrá de la siguiente manera [24]:

El "modelo de Hottel" (1976) expresa la transmitancia atmosférica para la radiación directa, τ_b , en función del ángulo cenital, θ_z (mayor transmitancia en dirección vertical, menor hacia el horizonte), de la altura sobre el nivel del mar, A , en kilómetros, (mayor transmitancia a mayor altura) y del tipo de clima; de la forma:

$$\tau_b = a_0 + a_1 e^{\left(\frac{k}{\cos \theta_z} \right)}$$

donde a_0 , a_1 y k son parámetros ajustados empíricamente. Para el cálculo de estas cantidades, se usan las ecuaciones:

$$a_0 = r_0 \left[0.4237 - 0.00821(6 - A)^2 \right], a_1 = r_1 \left[0.5055 - 0.00595(6.5 - A)^2 \right],$$

$$k = r_k \left[0.2711 - 0.01858(2.5 - A)^2 \right]$$

Los valores de r_0 , r_I y r_k están dados en la Tabla 1, para distintos tipos de clima. Para estimar la irradiación difusa, sobre superficie horizontal, la correspondiente transmitancia está dada por una expresión debida a Liu y Jordan (1960) de la forma:

$$\tau_d = 0.2710 - 0.2939\tau_b$$

Tipo de clima	r_0	r_I	r_k
1. Tropical	0,95	0,98	1,02
2. Verano, latitud media	0,97	0,99	1,02
3. verano sub-ártico	0,99	0,99	1,01
4. Invierno latitud media	1,03	1,01	1,00

Tabla 4.1. Factores de corrección para algunos tipos de climas.

Por otro lado, para cada día del año y en determinado punto de la tierra es necesario saber cómo influye la variación anual de la distancia tierra-sol en el flujo de la radiación extraterrestre, respecto de la constante solar, G_{sc} . El valor aceptado de ésta es 1367 W/m^2 , igual a la densidad de flujo promedio anual de la energía proveniente del Sol, tomada sobre una superficie perpendicular a la dirección sol-tierra, fuera de la atmósfera. Con este dato y el hecho que la tierra experimenta un cambio anual de su distancia al sol, debido a su trayectoria elíptica, dada por:

$$r = \frac{\varepsilon d}{1 + \varepsilon \cos \theta}$$

donde, d es la distancia del sol, ubicado en el *foco* F, a la *directriz* D (Thomas, 1968); ε es la *excentricidad* o apartamiento relativo de la elipse descrita por la tierra (P) respecto de una circunferencia; y θ es el ángulo que forma el radio vector sol-tierra respecto del eje mayor; Se tiene que, como la radiación varía con $1/r^2$, resulta que tanto G_{on} (la radiación solar *extraterrestre* sobre un plano normal a la radiación) como la constante solar G_{sc} (*promedio* de G_{on}) se pueden vincular entre sí mediante el cociente. Por lo tanto, si

$$G_{on} \propto \frac{(1 + \varepsilon \cos \theta)^2}{(\varepsilon d)^2} \text{ y } G_{sc} \propto \frac{1}{(\varepsilon d)^2}$$

será $\frac{G_{on}}{G_{sc}} = 1 + 2\varepsilon \cos \theta + \varepsilon^2 \cos^2 \theta$ o bien, reemplazando datos astronómicos

conocidos, $G_{on} \approx G_{sc} (1 + 0.33 \cos \theta)$. Como el ángulo se relaciona con el día n -ésimo a

través de: $\frac{\theta}{n} = \frac{2\pi}{365}$ resulta la conocida fórmula para cada día:

$$G_{on} \approx G_{sc} \left(1 + 0.33 \cos \left(\frac{2\pi}{365} n \right) \right)$$

donde 2π no es conveniente reemplazar por 360 pues el ángulo se debe expresar en radianes. Entonces, las irradiancias directa y difusa para día claro, sobre plano horizontal, a nivel de la tierra (altura A) serán:

$$G_{cb} = \tau_b G_{on} \cos \theta_z \quad \text{y} \quad G_{cd} = \tau_d G_{on} \cos \theta_z$$

y la correspondiente irradiación total estará dada por: $G_c = G_{cb} + G_{cd}$

Finalmente el parámetro c se obtendrá de la tendencia que se observa en los datos. En conclusión, se obtiene que la curva teórica es:

$$I(\text{día}, x) = G_c(\text{día}) \exp \left\{ \left(\frac{x - \left(\frac{\text{Horto}(\text{día}) + \text{Hocaso}(\text{día})}{2} \right)}{c(\text{día})} \right)^2 \right\}$$

donde x viene dado en minutos.

Teniendo en cuenta que c seguirá la siguiente tendencia en invierno:

$$c(\text{día}) = 0.3727 \cdot \text{día} + 250$$

y durante el solsticio de verano seguirá la siguiente:

$$c(\text{día}) = -0.11 \cdot \text{día} + 250$$

En la siguiente figura se ve como funciona el ajuste para distintos días del año *figura 4.2*. los puntos azules son los datos experimentales, la línea azul es la curva teórica, y las curvas rojas son el margen del 25% de error que se admite para no cambiar de seguimiento.

Figura 4.2.a. día 5 de Abril, corresponde a un día soleado y sigue perfectamente la curva teórica, se ve como cerca de la hora de salida y de entrada no entra en el rango

de error, por lo que en este caso el seguimiento sería astronómico, pero el resto del día sería sensorial.

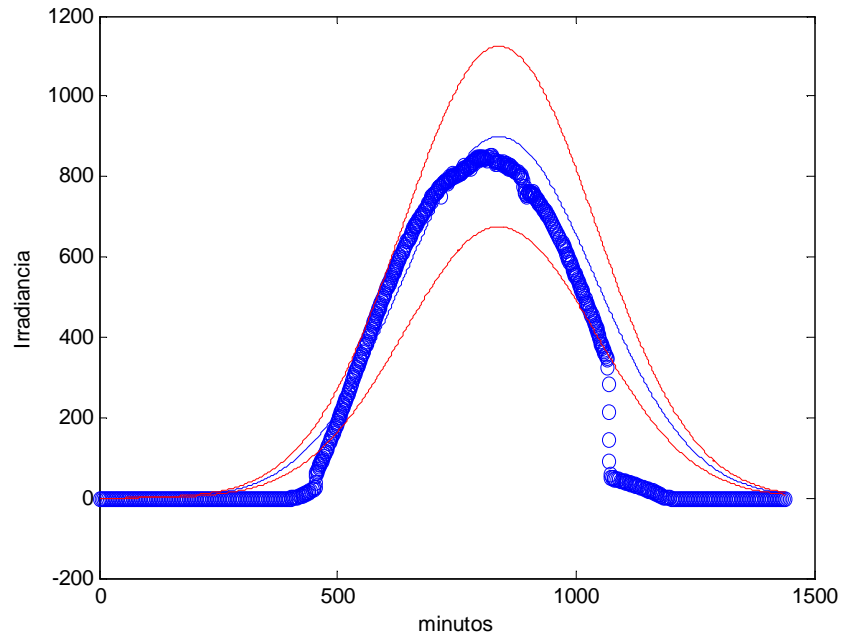


Figura 4.2.a. Curva Irradiancia frente a minutos para el día 5 de Abril

Figura 4.2.b. esta gráfica es del día 10 de abril, y representa un día nublado, vemos como los datos experimentales no entran en los rangos establecidos, por lo que el seguimiento en este día sería astronómico.

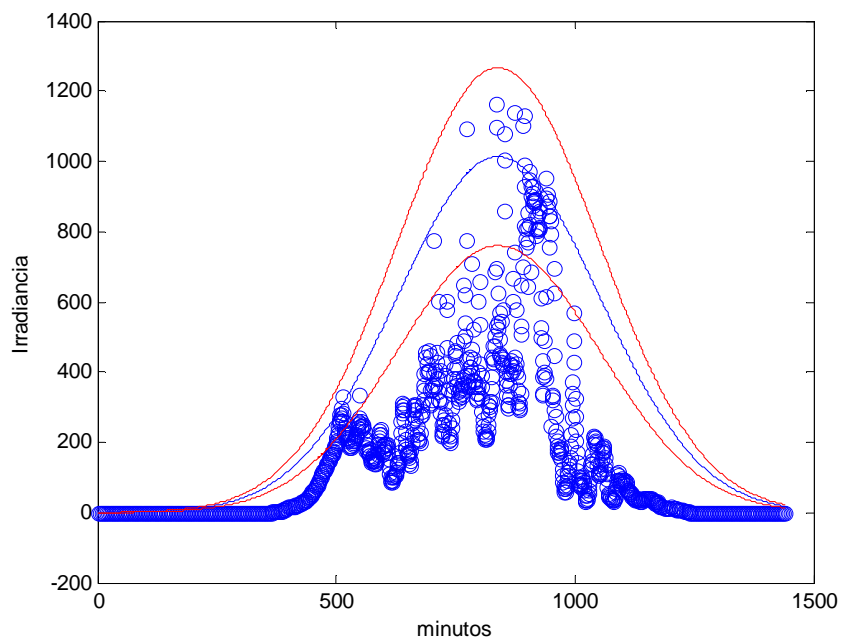


Figura 4.2.b. Curva Irradiancia frente a minutos para el día 10 de Abril

Figura 4.2.c. gráfica correspondiente al 1 de Noviembre, se ve como para el solsticio de invierno también funciona bien el ajuste.

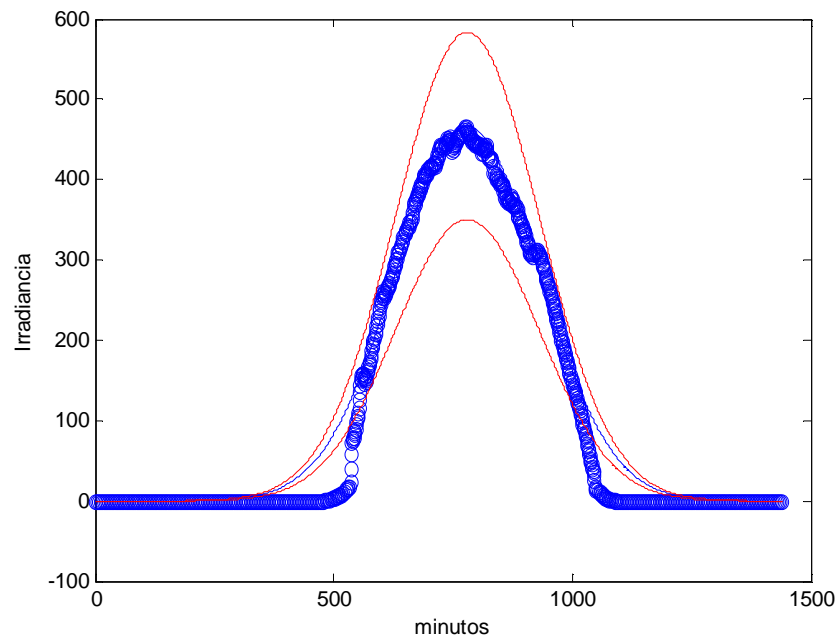


Figura 4.2.c. Curva Irradiancia frente a minutos para el día 1 de Noviembre.

Se ve como el modelo funciona bien tanto para el solsticio de verano como para el de invierno. Para días nublados como el mostrado en la *figura 4.2.b.* al no seguir el modelo teórico directamente un modo de seguimiento astronómico, mientras que para los días soleados cuando el modelo teórico funciona, el seguimiento sería sensorial a lo largo del día, a excepción de a las horas de salida y puesta de sol.

Otra mejora que se puede introducir en el sistema sería que se pudiera controlar a distancia. Para poder monitorizar las posiciones, los cálculos y demás variables del sistema desde el laboratorio sin tener que subir al tejado.

5. REFERENCIAS

5.1. Introducción

- [1].- http://co.kalipedia.com/fisica-quimica/tema/trabajo-energia-calor/consumo-energia.html?x=20070924klpcnafyq_235.Kes&ap=6
- [2].- <http://www.appa.es/01energias/01espana.php>
- [3].- <http://www.cener.com/es/index.asp>
- [4].- <http://www.wikipedia.com>
- [5].- http://www.emc.uji.es/d/IngMecDoc/344AmplDisMaq/Curso_03-04/proyecto/webs/seguidores_solares/tiposdeseguidores.htm
- [6].- <http://www.energy.iastate.edu/renewable/solar/calculator/>
- [7].- <http://www.solener.com/concent.jpg>
- [8].- <http://www.solar-solar.com/Attachments/PICT10.jpg>
- [9].- O. Rojas Lazo, J. Rojas Rojas, J. Salas Bacalla “Situación energética de los hidrocarburos en el Perú” Ind. Data 9(2) 2006
- [10].- Perfil ambiental de España 2007. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (MITyC). Secretaria general de Energía.
- [11].- Apuntes de la asignatura “Evaluación del recurso solar” del Master en Física Aplicada proporcionados por Carlos Armenta.
- [12].- “Energías Renovables para todos” www.energias-renovables.com (patrocinado por Iberdrola) Apuntes “Movimientos de la tierra(movimiento aparente del

sol, determinación de la hora y de las coordenadas geográficas)” de los profesores: Alfonso Calera Belmonte y Antonio J. Barbero (UCLM)

5.2. Descripción del sistema

- [13].-Sistemas de control para la orientación con dos grados de libertad de paneles fotovoltaicos para la mejora del aprovechamiento energético. Proyecto Feb’08. Juan Luis Cámara Garrido
- [14].-Control y optimización del seguimiento solar con dos grados de libertad para mejora del aprovechamiento energético. Proyecto Jul’08. Marcos Pérez Cáceres.
- [15].-<http://es.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>
- [16].-Data sheet del DS1307 Dallas semiconductor
- [17].-Data sheet del irf9540n International Rectifier
- [18].-Data sheet del irfz244n International Rectifier
- [19].-Data sheet del MMA7260QT Freescale semiconductor
- [20].-Data sheet del LM393

5.3. Funcionamiento

- [21].-MPLAB C18 C Compiler Getting Started Microchip
- [22].-MPLAB C18 C Compiler Libraries Microchip
- [23].-Data sheet del PIC 18F4550 Microchip

5.4. Conclusiones y futuros trabajos

- [24].-V. Passamai “Determinación de radiación solar horaria para días claros mediante planilla de cálculo” INENCO – CIUNSa - CONICET

