



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
Facultad Regional Concepción del Uruguay
INGENIERIA ELECTROMECHANICA

PROYECTO FINAL DE CARRERA
(P F C)

Seguidor solar de dos ejes parametrizado por PC.

Proyecto N°: PFC N°1112B

Autor: Grassi, Francisco Eduardo Ariel

Tutores: Salum, Graciela

Ansaldi, Juan

**Dirección de Proyectos: Ing. Puente, Gustavo
Ing. De Marco, Luis**

AÑO 2013

DECLARACION

Yo, Francisco Eduardo Ariel Grassi, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoria; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Resumen ejecutivo

El presente proyecto, presenta soluciones técnicas creativas a la problemática que poseen los sistemas de captación de energía solar, debido la variación de rendimiento producida por el movimiento relativo entre el planeta Tierra y la fuente generadora Sol.

Si bien en el mercado hay múltiples dispositivos ya diseñados, capaces de seguir el movimiento relativo del Sol, esta se trata de una solución confiable, versátil, de fácil construcción nacional, haciéndolo competitivo en costos con los disponibles por importación.

Title

Two axis solar tracker configured by a PC

Executive Summary

The following working paper presents creative technical solutions to the problems which systems of fundraising of solar power have, due to the variation of performance caused by the relative motion between the Earth planet and the generative source Sun.

Even though there are multiple devices already designed in the market, capable of following the relative movement of the sun, this is a reliable and versatile solution, which is also of easy national building, making it competitive in cost with availabilities by means of importation.

Índice

FUNDAMENTACIÓN	7
PLANTEO DEL PROBLEMA	7
MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA Y DEL ESTADO DEL ARTE	8
ALCANCES.....	9
METODOLOGÍA DEL PROCESO	9
IMPACTO	10
OBJETIVOS.....	10
INTRODUCCIÓN TEÓRICA.....	11
1. EL SOL Y SUS FUNDAMENTOS	11
1.1 Características generales del Sol.....	11
1.2 Actividad solar	14
1.3 Ángulos solares.....	17
1.3.1 Distancia Tierra – Sol	17
1.4 Declinación solar	18
1.5 Ecuación del tiempo.....	19
1.6 Posición relativa del Sol en superficies horizontales.....	20
1.7 Radiación solar global y su aprovechamiento.....	22
1.8 Mediciones terrestres	22
1.9 Mediciones satelitales.....	23
1.10 Modelos.....	24
LA TECNOLOGÍA PIC	26
La electromecánica del seguidor solar.....	29
DESARROLLO	¡Error! Marcador no definido.
1 DIAGRAMA DE BLOQUE BASICO DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR.....	¡Error! Marcador no definido.

2	ESTRUCTURA BASICA DEL SEGUIDOR SOLAR	¡Error! Marcador no definido.
3	DESARROLLO ELECTRONICO.....	¡Error! Marcador no definido.
3.1	Elementos que componen el sistema electrónico:	¡Error! Marcador no definido.
3.2	Placa electrónica principal	¡Error! Marcador no definido.
3.3	Circuito de conexión del microcontrolador	¡Error! Marcador no definido.
3.4	Desarrollo del sistema electrónico de potencia.....	¡Error! Marcador no definido.
3.5	Desarrollo del anemómetro	¡Error! Marcador no definido.
3.6	Otros anexos electrónicos.....	¡Error! Marcador no definido.
4	DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL MICROCONTROLADOR...	¡Error! Marcador no definido.
4.1	Descripción de los bloques del diagrama de flujo:.....	¡Error! Marcador no definido.
5	DESARROLLO DEL SOFTWARE DE INTERFASE	¡Error! Marcador no definido.
5.1	Protocolo de comunicación del software de la PC con el μC	¡Error! Marcador no definido.
5.1.1	El puerto serie en la PC	¡Error! Marcador no definido.
	RESULTADOS OBTENIDOS	¡Error! Marcador no definido.
	EVALUACIÓN ECONOMICA	¡Error! Marcador no definido.
	CONCLUSION.....	¡Error! Marcador no definido.
	BIBLIOGRAFIA.....	¡Error! Marcador no definido.

Índice de ilustraciones

Figura 1.Distribución geográfica del potencial de energía fotovoltaica, considerando el efecto de la temperatura sobre el rendimiento del sistema fotovoltaico (Kawajiri y colab, 2011).	7
Figura 2.Estructura solar [2].....	12
Figura 3.Manchas y fáculas (Sánchez Chinaea).	14
Figura 4.Penumbra y umbral de una mancha solar (Beck).	14
Figura 5.Imagen de filamentos y prominencias solares.....	15
Figura 6.Imagen de espículas solares.....	15
Figura 7.Esquemas de líneas de campo magnético solar. (Sánchez Chinaea).....	16
Figura 8.Diagrama de mariposa de la posición de las manchas.	16
Figura 9.Movimiento de la tierra alrededor del sol (Iqbal).....	17
Figura 10.Esfera celestial que muestra el camino aparente del Sol (Iqbal).....	20
Figura 11.Mapa en falso color del recurso solar indicando irradiancia solar global promedio de 3 año (Loster, 2006).	24
Figura 12.Cartas de insolación solar del “Atlas de Energía Solar de la República Argentina” (Grossi Gallegos y Righini, 2011).	26
Figura 13.Representación de los accesorios que pueden vincularse con un microcontrolador PIC.....	29
Figura 14. Diagrama básico del sistema de seguimiento solar	¡Error! Marcador no definido.
Figura 15. Esquema básico de la estructura del seguidor solar visto en perspectiva.¡Error! Marcador no definido.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 16. Vista lateral de la estructura del seguidor.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 17. Vista frontal de la estructura del seguidor.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 18. Vista parcial superior de la estructura del seguidor.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 19. Vista de la ubicación de los motores, encoders y finales de carrera¡Error! Marcador no definido.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 20.Características del microcontrolador.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 21.Esquema de las conexiones del microcontrolador.	¡Error! Marcador no definido.

- Figura 22. Esquema del conexionado del CI DS1307 para la aplicación como reloj. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 23. Pin out display LCD 16x2 **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 24. Esquema del LCD 16X2..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 25. Esquema del IC máx. 232 **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 26. Detalle del potenciómetro angular. Izquierda: esquema. Derecha: vista exterior. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 27. Esquema de la placa principal realizada en Proteus..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 28. Esquema de la placa principal realizada en Ares **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 29. Pin out C I ULN 2803..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 30. Esquema de un relé simple inversor. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 31. Diagrama del driver de los motores realizado en Proteus®. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 32. Diagrama de flujo del software del microcontrolador..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 33. Software de interface de la PC..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 34. Esquemas de los puertos DB-25 y DB-9 **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 35. Descripción de los pines del conector serie **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 36. Descripción de los pines de los conectores DB-25 y DB-9 **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 37. Cable de conexión RS-232 **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 38. Grafico Seguidor solar vs. Panel fijo a 45° **¡Error! Marcador no definido.**

Índice de tablas

Tabla 1. Insolación solar promedio mensual incidente en una superficie horizontal (kWh/m^2) para la ciudad de Concepción del Uruguay, obtenida de la base de datos SSE/NASA.	24
Tabla 2. Gastos principales	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 3. Elementos electrónicos	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4. Elementos eléctricos	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 5. Trabajos de terceros.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 6. Varios.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 7. Radiación global media diaria y horas picos solares en San Miguel (Buenos Aires). ¡Error! Marcador no de	
Tabla 8. Horas picos solares y Energía total generada.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 9. VAN. Condiciones	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 10. Tabla del VAN	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 11. TIR. Condiciones	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 12. Tabla del TIR	¡Error! Marcador no definido.

ABREVIATURAS

Fotovoltaico.....	FV
Unidad Central de Procesamiento.....	CPU
Microcontrolador.....	μC
Read-Only Memory	ROM
Electrically Programable ROM.....	EPROM
Electrically Eraseable/Programable ROM.....	EEPROM
Random Access Memory.....	RAM
Universal Asynchronous Receiver/Transmitter.....	UART
Inter-Integrated Circuit.....	I2C
Analog-to-Digital.....	A/D
Width Modulation.....	PWM
Circuito Integrado.....	CI
Liquid Cristal Display.....	LCD
Software de Interface.....	SI
Asociación de Industrias Electrónicas.....	EIA
Energía Total Generada.....	ETG
Valor Actual Neto.....	VAN
Tasa Interna de Retorno.....	TIR

FUNDAMENTACIÓN

PLANTEO DEL PROBLEMA

Debido a la situación que sufre el mundo en la actualidad referente a la contaminación ambiental y a los distintos protocolos de sustitución de los combustibles no renovables en los cuales nuestro país está adherido, Argentina está comenzando a importar materiales para instalar centrales de energía solar debido a sus múltiples beneficios y a la gran predisposición que presenta el noroeste de nuestro país para tales emplazamientos. Esto puede verse en la Figura 1 (Kawajiri y colab, 2011) donde el recurso solar en nuestro noroeste (color rojo) es uno de los dos mejores en el mundo.

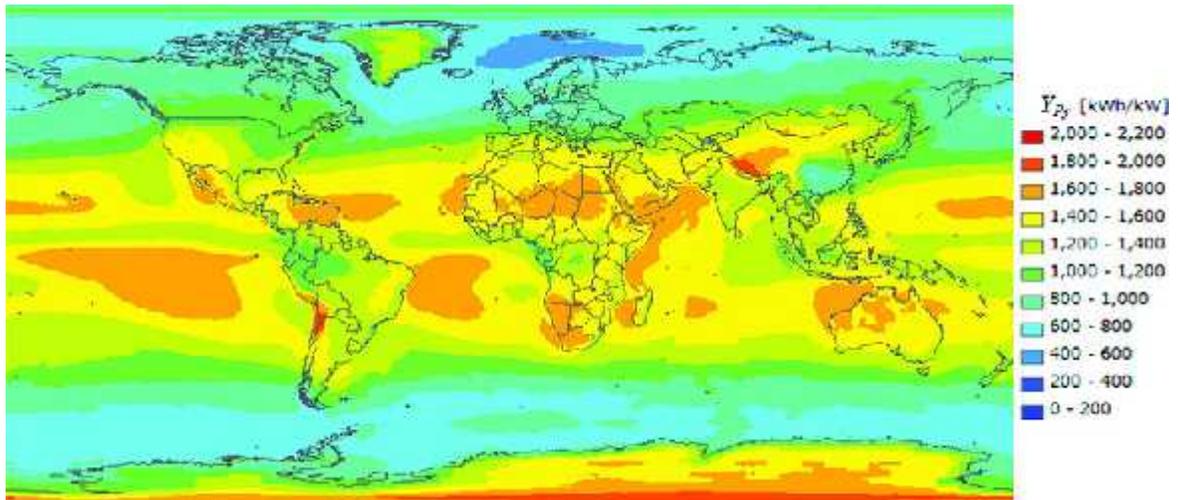


Figura 1. Distribución geográfica del potencial de energía fotovoltaica, considerando el efecto de la temperatura sobre el rendimiento del sistema fotovoltaico (Kawajiri y colab, 2011).

Es de destacar que los países latinoamericanos poseen una demanda energética típica de los países en vías de desarrollo, pero esta demanda implica problemas de contaminación y el agotamiento de los recursos energéticos tradicionales. Una forma de abastecer esta demanda es utilizar las energías renovables (Saravia, 2007).

MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA Y DEL ESTADO DEL ARTE

Los seguidores solares son dispositivos que permiten el seguimiento solar en base a la latitud y longitud del lugar, fecha y hora. Estos permiten que los paneles fotovoltaicos (FV) se encuentren siempre perpendiculares a los rayos del sol para aumentar la captación solar y lograr el consecuente incremento de la potencia de salida (y de esta manera aumentar el rendimiento).

Los seguidores solares para aplicaciones fotovoltaicas pueden clasificarse, según la cantidad y orientación de los ejes de seguimiento, en: de montaje fijo, de un eje y de dos ejes. En el caso de los seguidores de un solo eje de movimiento el incremento anual en la potencia de salida es de aproximadamente un 30% mientras que en los de dos ejes de movimiento el incremento es 6% más que los de simple eje (King, 2002).

Un seguidor de simple eje posee un único grado de libertad que actúa como un eje de rotación. Los seguidores con dos ejes poseen dos grados de libertad actuando como ejes de rotación. En general, estos ejes son perpendiculares entre sí.

Gay y colaboradores (1982) encontraron que para equiparar la cantidad de energía obtenida por un sistema de montaje fijo y uno con dos ejes de seguimiento, el primero debía incrementar en un 40% la cantidad de módulos fotovoltaicos.

Los seguidores que se encuentran en el mercado son de alto costo y no se fabrican en nuestro país. Lo que se quiere lograr con este proyecto es el desarrollo de un seguidor solar de dos ejes para paneles FV con microcontroladores de tecnología PIC, con la posibilidad de: a) desactivar uno de los ejes mediante software para reducir el consumo, b) la medición de la luminosidad para evitar desplazamientos en días muy nublados y c) la incorporación de un anemómetro para medición de vientos y cargas sobre los paneles. De esta forma, se pretende mejorar el rendimiento obtenido con paneles solares FV para reducir costos. Este

tipo de sistema se puede instalar con cualquier tipo de paneles FV y de cualquier dimensión con el único cambio de los motores que realizan los movimientos.

A tales fines, este proyecto se basará en conceptos relacionados con:

- Programación en lenguaje Visual Basic y assembler.
- Tecnologías de electrónica y microcontroladores.
- Medio ambiente y energía, y normas IRAM.

ALCANCES

Ese proyecto contempla los siguientes alcances:

- Estimación del aumento del rendimiento del sistema instalado.
- Análisis básico de la estructura de montaje.
- Implementación de la Ingeniería del sistema electrónico.
- Implementación de la Ingeniería del sistema de control del microcontrolador.
- Implementación de la Ingeniería del programa de interface PC-microcontrolador.
- Análisis económico del proyecto.

Ese proyecto no contempla ni la ingeniería de detalle de la estructura ni el montaje y puesta en marcha.

METODOLOGÍA DEL PROCESO

Se comenzará con el estudio del movimiento de la Tierra en torno al Sol en función de los días del año y el horario para distintas coordenadas geográficas (latitud y longitud). Una vez realizado dicho estudio, se analizará la manera más factible de implementar el sistema de seguimiento seleccionando el microcontrolador más adecuado y desarrollando la posterior programación del mismo.

Una vez finalizada la implementación del programa del microcontrolador se desarrollará el programa de interface PC-microcontrolador para enviar los datos al microcontrolador para poder iniciar su tarea.

Para finalizar se ensamblará la placa electrónica y se realizarán los ensayos pertinentes para poder verificar su correcto funcionamiento.

IMPACTO

Los impactos más significativos tienen que ver con tres aspectos: ambiental, económico y tecnológico. En cuanto al aspecto ambiental, se aumentará el rendimiento de los paneles fotovoltaicos para un mejor aprovechamiento de los mismos mejorando así el reemplazo de combustibles fósiles por energías renovables de calidad.

En lo referente al impacto económico, se realizará una implementación de bajo costo con elementos y materiales que se encuentran en el mercado local, que son de bajo costo y son ampliamente comercializados nacionalmente.

Por último, el impacto tecnológico estará relacionado con la producción de un desarrollo nacional de alta tecnología, apostando a la independencia tecnológica.

OBJETIVOS

- Desarrollar tecnologías para realizar el seguimiento solar con los paneles solares fotovoltaicos a fin de aumentar su rendimiento.
- Disminuir los costos comerciales de los dispositivos importados fabricándolos en el país.
- Desarrollar un software para la conexión de la PC con la placa microcontrolada del seguidor solar.
- Analizar comparativamente el rendimiento del panel fotovoltaico con y sin seguidor solar.

INTRODUCCIÓN TEÓRICA

1. EL SOL Y SUS FUNDAMENTOS

1.1 Características generales del Sol

El Sol es la estrella del sistema planetario en el que se encuentra la Tierra; por tanto, es la más cercana a la Tierra y el astro con mayor brillo aparente. Es una estrella que se encuentra en la fase denominada secuencia principal, que se formó hace unos 5000 millones de años y le restan aproximadamente otros 5000 millones de años de vida. El Sol, junto con la Tierra y todos los cuerpos celestes que orbitan a su alrededor, forman el Sistema Solar.

A pesar de ser una estrella mediana, es la única cuya forma se puede apreciar a simple vista, con un diámetro angular de 32' 35" de arco en el perihelio (punto más cercano de la órbita de la Tierra alrededor del Sol) y 31' 31" en el afelio (punto más alejado de la órbita de la Tierra alrededor del Sol), lo que da un diámetro medio de 32' 03".

El Sol está ubicado dentro de una la galaxia espiral llamada Vía Láctea, en la cual las estrellas se van desplazando alrededor de la zona central. Sus dimensiones son tales que la luz tarda 100.000 años en recorrer el diámetro del disco. La posición del Sol es cercana al plano ecuatorial de nuestra galaxia, a una distancia de unos 10 Kiloparsecs (1 parsec = 3,2616 años luz = $3,0857 \times 10^{16}$ m) de su núcleo, sobre el borde interno de uno de sus brazos espirales. Nosotros nos encontramos a $1,5 \times 10^8$ kilómetros del Sol (Sánchez China).

Las características más relevantes son comentadas a continuación:

- *Radio Solar*: Es de aproximadamente $6,96 \times 10^5$ km. (radio lineal de la Tierra = 6378 km).
- *Volumen Solar*: Es de $1,41 \times 10^{27}$ m³.
- *Masa Solar*: La masa total del astro solar es 2×10^{30} Kg. (masa de la Tierra = $5,98 \times 10^{24}$ Kg). Esto da una densidad media de 1,41 g/cm³.

- *Movimiento traslacional.* El Sol está sometido a un movimiento de traslación alrededor del centro de la galaxia, a una velocidad de 216 km/segundo, velocidad que exige 230 millones de años para una órbita completa. El movimiento del Sol en el espacio sólo puede ser evidenciado respecto a algún punto de referencia.

- *Movimiento rotacional.* El Sol experimenta una rotación sobre sí mismo alrededor de un eje inclinado con respecto a la eclíptica (se explica más adelante). Esta rotación no se efectúa uniformemente para todos los puntos del globo solar sino que es de 24,9 días en la zona ecuatorial y de 34 días en los polos.

- Se sabe también que el Sol es una estrella pulsante y que vibra (Ciencia Hoy).

Para el estudio de su constitución física, el Sol se puede dividir en tres grandes zonas: parte Interna, Fotosfera y Atmósfera (ver Figura 2).

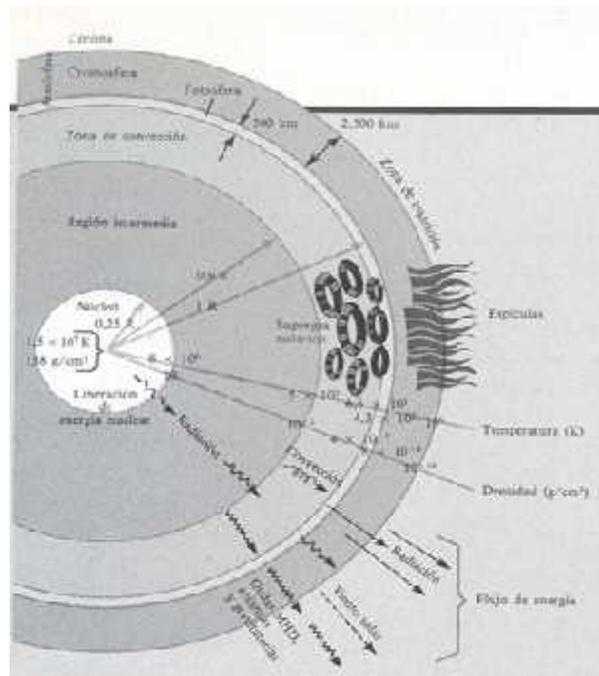


Figura 2. Estructura solar [2].

La energía que el Sol emite proviene de la fusión nuclear del hidrógeno, reacción que tiene lugar precisamente en la parte interna, que alcanza una

temperatura de 15 millones de grados y una presión que llega a los cien mil millones de atmósferas. La fusión del hidrógeno tiene lugar fusionando cuatro núcleos de Hidrógeno para formar 2 núcleos de Helio, emitiendo la energía correspondiente en forma de radiación gamma (Ciencia Hoy).

Se calcula que en la parte interna del Sol se fusionan 700 millones de toneladas de hidrógeno cada segundo, y la pérdida de masa, que se transforma en energía solar, se cifra en 4,3 millones de toneladas por segundo. A este ritmo, el Sol necesitará más de 6000 millones de años para consumir el 10% del hidrógeno que posee (Ciencia Hoy).

La parte interna se compone del núcleo, de la zona de radiación, y de la zona convectiva.

La fotosfera es una importante esfera gaseosa incandescente, que absorbe casi totalmente la radiación que emite la parte interna, lo que la mantiene a una temperatura prácticamente constante de 5800 °K. La superficie visible del Sol posee una característica granulación brillante, los llamados “granos de arroz”, y es donde pueden observarse las manchas solares, que corresponden a zonas de temperatura algo inferior (unos 1000 °K menos, y que se muestran oscuras por contraste).

Envolviendo a la fotosfera se encuentra la Atmósfera solar, en la que se distinguen dos zonas distintas: la cromosfera y la corona. La densidad tan pequeña de la cromosfera la hace prácticamente transparente a los rayos de luz. Las radiaciones que emite representan solamente milésimas de la radiación solar total. En ella tienen lugar importantes manifestaciones de la actividad solar como son las protuberancias y las fulguraciones. La corona está constituida por un gas sumamente enrarecido que alcanza temperaturas de hasta 2×10^6 °K.

Analizando las líneas del espectro de la luz solar, pueden identificarse fácilmente los elementos que están presentes en nuestra estrella. La composición química del Sol resulta ser la misma que la de otros objetos cósmicos (exceptuando la Tierra y otros planetas). De todos los elementos presentes en el

Sol, el hidrógeno es el elemento que prevalece ya que su cantidad es diez veces mayor que la de todos los demás elementos, perteneciéndole casi el 70% de la masa del Sol. Por su contenido, el helio es el segundo elemento: ocupa casi el 29% de la masa del Sol. A todos los restantes elementos, tomados conjuntamente, le corresponden algo más de un 1% (Ciencia Hoy).

Para estudiar la manera en que se manifiesta la actividad del Sol, se detallan a continuación algunos de los signos claves de la actividad del Sol (Beck).

1.2 Actividad solar

La energía procedente desde el interior del Sol llega a la fotosfera viajando en la forma de vapor de un líquido hirviendo, primero por radiación y luego por convección en los últimos kilómetros. En la fotosfera aparece en forma de burbujas o celdas, llamadas gránulos. Las fáculas son zonas más brillantes en la superficie fotosférica. También se originan en los puntos de penetración de las líneas del campo magnético distorsionadas cuando los gases que acceden a la superficie no están ionizados, ya que se acelera el proceso de convección y se origina un aumento de temperatura, al tender a salir más rápidamente la energía procedente del interior solar (Ciencia Hoy).

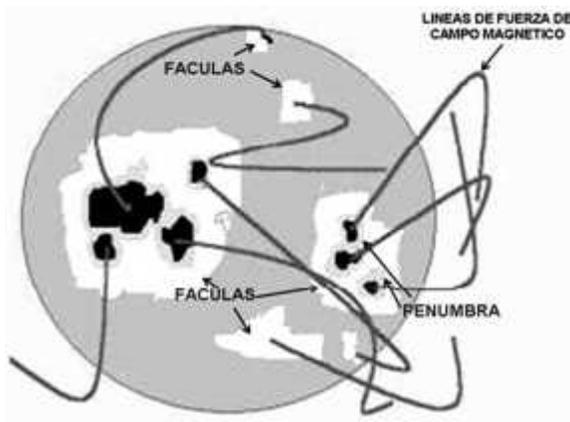


Figura 3. Manchas y fáculas (Sánchez China).

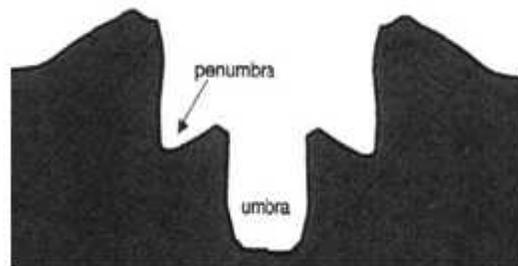


Figura 4. Penumbra y umbral de una mancha solar (Beck).

Puede suceder, y es muy frecuente, que en una corriente convectiva de gases

emergentes al exterior por el punto de tránsito de una línea del campo magnético, alguna zona del interior esté ionizada, pero el resto de los gases no. En este caso se produce una mancha (por donde aparecen los gases ionizados) dentro de una fácula (la zona exterior, por donde los gases emergentes no están ionizados) (Figura 3). Es decir, es muy usual que aparezcan las manchas dentro de zonas más brillantes, y no al revés. Las manchas solares constituyen quizás el fenómeno más observado a todos los niveles por la facilidad de observación y por considerarse siempre claramente indicativo de la mayor o menor actividad del Sol.

Las umbras son los núcleos oscuros de las manchas solares. Normalmente tienen diámetros de 10000 km aproximadamente y su color varía de blanco a marrón-colorado. Cuanto más fuertes los campos magnéticos, más oscura será la umbra. La penumbra rodea la umbra como una corona oscura con filamentos brillantes radiales a la umbra y consiste de células longitudinales (Beck) (figura 4 y 5).

Las espículas (Figura 6) son llamadas de entre 100 y 1000 km de diámetro y de hasta 10.000 km sobre la fotosfera. Pueden alcanzar una temperatura de unos 10.000 K y se desarrollan en el interior de la cromosfera.



Figura 5. Imagen de filamentos y prominencias solares.

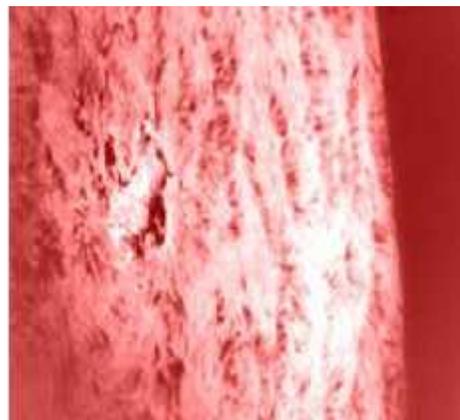


Figura 6. Imagen de espículas solares.

Mientras que el grupo de manchas solares dura solo 60 días, el campo magnético puede ser detectado por alrededor de 250 días. El campo magnético es la causa de la actividad solar. Las líneas de campo magnético con flujo tubular alcanzan la fotosfera y se expanden en forma de arco debido a la más baja presión. Los dos puntos en los que penetra a través de la fotosfera marcan los dos polos magnéticos de un grupo solar (ver la Figura 7).

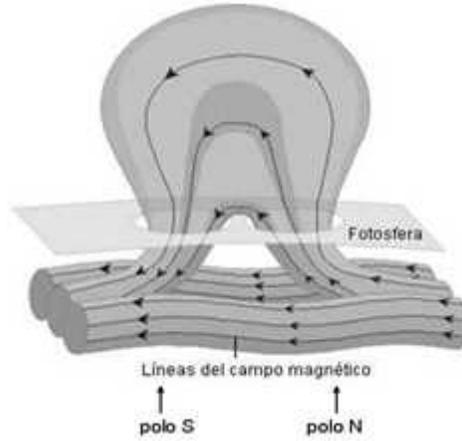


Figura 7. Esquemas de líneas de campo magnético solar. (Sánchez Chinaea).

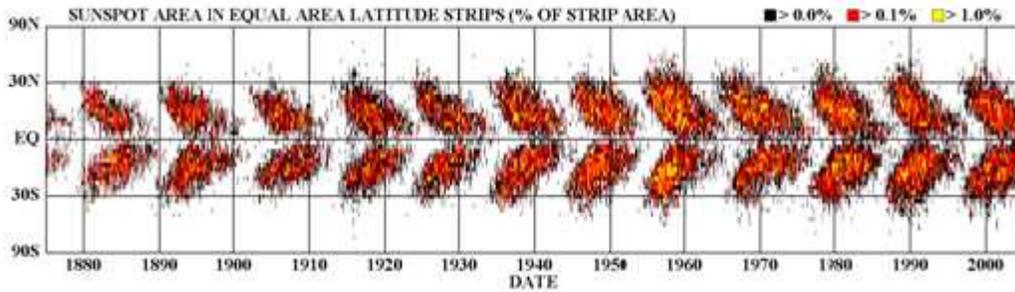


Figura 8. Diagrama de mariposa de la posición de las manchas.

Las observaciones de las manchas incluyen información de sus tamaños y posiciones como así también de sus números. Estos datos muestran que las manchas no aparecen en forma aleatoria sobre la superficie del Sol están concentradas en dos bandas latitudinales en ambos lados del ecuador solar. Un diagrama de mariposa que representa las posiciones de las manchas de cada rotación del Sol desde mayo de 1874 muestra que estas bandas primero se forman a latitudes medias, son amplias y luego se mueven hacia el ecuador a medida que el ciclo progresa. Los ciclos de manchas solares tienen una duración de 11 años aproximadamente y se solapan en el momento del mínimo del ciclo

viejo de manchas solares cerca del ecuador y el nuevo ciclo a altas latitudes (Figura 8).

1.3 Ángulos solares

1.3.1 Distancia Tierra – Sol

La Tierra gira alrededor del Sol en una órbita elíptica, con el Sol en uno de los focos (Figura 9). La cantidad de radiación solar que alcanza a la Tierra es inversamente proporcional al cuadrado de su distancia desde el Sol. La distancia media Tierra – Sol es llamada unidad astronómica, tal que $1 \text{ UA} = 1,496 \times 10^8 \text{ km}$. La mínima distancia Tierra – Sol es aproximadamente 0.983 AU , y la máxima es aproximadamente 1.017 AU .

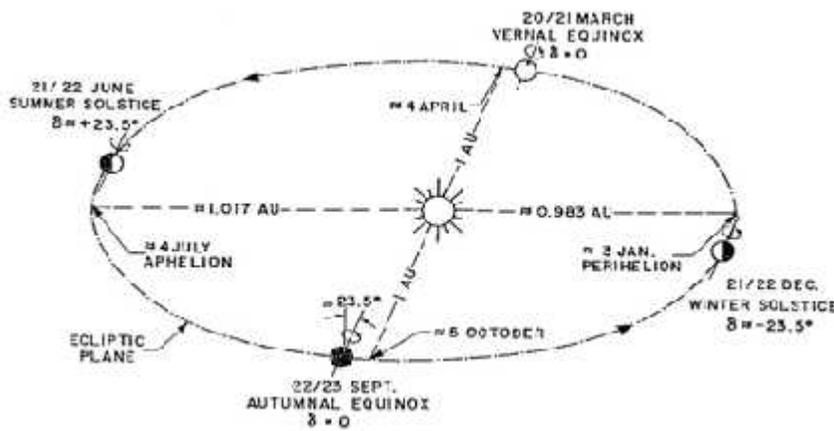


Figura 9. Movimiento de la tierra alrededor del sol (Iqbal).

Dado que es necesario contar con la distancia expresada en una forma matemática simple se utiliza tradicionalmente la distancia r expresada en término de las series de Fourier de tipo de expansión. Con un máximo de error de $0,0001$, Spencer desarrolló la siguiente expresión para el recíproco del cuadrado del vector radio de la Tierra, llamada factor de corrección de excentricidad de la órbita de la Tierra, E_0 :

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2$$

$$E_0 = 1.000110 + 0.034221 \cdot \cos \Gamma + 0.001280 \cdot \text{sen} \Gamma + 0.000719 \cdot \cos(2\Gamma) + 0.000077 \cdot \text{sen}(2\Gamma) \quad (1.1)$$

En esta ecuación el parámetro Γ , en radianes, representa el ángulo diario, representado como:

$$\Gamma = 2f \cdot \frac{d_n - 1}{365} \quad (1.2)$$

donde d_n es el número del día del año, que va desde 1, para el 1º de enero, hasta 365, para el 31 de diciembre, asumiendo que Febrero consta de 28 días. Sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones tecnológicas e ingenieriles se utiliza una expresión más simple:

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 = 1 + 0.033 \cdot \cos \left(\frac{2f \cdot d_n}{365} \right) \quad (1.3)$$

1.4 Declinación solar

El plano de revolución de la Tierra alrededor del Sol es llamado plano eclíptico. La Tierra rota sobre sí misma alrededor de un eje llamado eje polar, el cual está inclinado a aproximadamente $23 \frac{1}{2}^\circ$ desde la normal hasta el plano eclíptico (Figura 9). La rotación de la Tierra alrededor de su eje causa los cambios diurnos en la radiación entrante mientras que la posición de este eje relativo al Sol causa los cambios estacionales en la radiación solar. En cambio, el ángulo entre el eje polar y la normal al plano eclíptico y el ángulo entre el plano ecuatorial terrestre y el plano eclíptico, permanecen constantes.

La línea que une los centros del Sol y la Tierra forma un ángulo con el plano ecuatorial que cambia día a día, en cada instante. A este ángulo se lo conoce como declinación solar, δ , y es cero en los equinoccios de primavera y otoño.

Spencer presentó la siguiente expresión para δ en grados:

$$\begin{aligned}
 u = & (0.006918 - 0.399912 \cdot \cos \Gamma + 0.070257 \cdot \operatorname{sen} \Gamma \\
 & - 0.006758 \cdot \cos(2\Gamma) + 0.000907 \cdot \operatorname{sen}(2\Gamma) \\
 & - 0.002697 \cdot \cos(3\Gamma) + 0.00148 \cdot \operatorname{sen}(3\Gamma)) \cdot (180 / f)
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$

Esta ecuación estima δ con un error máximo de 0.0006 radianes ($<3'$).

1.5 Ecuación del tiempo.

El tiempo solar está basado en la rotación de la Tierra respecto de su eje polar y su revolución alrededor del Sol. Un día solar es el intervalo de tiempo (no necesariamente 24 hs) desde que el Sol aparece hasta completar un ciclo respecto a un observador estacionario en la Tierra. El día solar varía en longitud a través del año. Los dos factores principales para la variación son los siguientes: a) la Tierra barre distintas áreas en el plano eclíptico cuando rodea al Sol, y b) el eje de la Tierra está inclinada con respecto al plano eclíptico. En términos simples, significa que si un observador hoy mira al Ecuador y fija el reloj a las 12 hs, cuando el Sol está directamente sobre el meridiano local, luego de un mes a las 12hs el Sol no aparecerá exactamente encima del meridiano local. El valor máximo de esta discrepancia es de 16 minutos y a la misma se la conoce como ecuación del tiempo y es medida en relación al movimiento terrestre perfectamente exacto. La ecuación del tiempo dada por Spencer se presenta a continuación:

$$\begin{aligned}
 E_t = & (0.000075 + 0.001868 \cdot \cos \Gamma - 0.032077 \cdot \operatorname{sen} \Gamma \\
 & - 0.014615 \cdot \cos(2\Gamma) - 0.04089 \cdot \operatorname{sen}(2\Gamma)) \cdot 229.18
 \end{aligned}
 \tag{1.5}$$

El error máximo de esta serie es de 0.0025 radianes, equivalente a aproximadamente 35 segundos.

Los datos de radiación solar son a menudo registrados en términos del tiempo local aparente (LAT), también llamado tiempo solar verdadero (TSV).

1.6 Posición relativa del Sol en superficies horizontales

Para calcular la radiación solar que alcanza a una superficie horizontal en la Tierra, es necesario escribir las relaciones trigonométricas entre la posición solar en el cielo y las coordenadas superficiales en la Tierra. Por ejemplo, podemos describir a un observador en la Tierra dibujando una esfera celeste con la Tierra en el centro (Figura 10). A cualquier tiempo dado, un observador en la superficie terrestre tiene una posición correspondiente en la esfera celeste llamada zenit del observador; este es el punto de intersección con la esfera celeste de una normal a la superficie terrestre en la posición del observador. El punto diagonalmente opuesto al zenit local es llamado nadir. El horizonte del observador es, el gran círculo en la esfera celeste que corresponde al plano que pasa a través del centro de la Tierra normal a la línea que une el centro de la Tierra con el zenit. El ángulo cenital θ_z (también llamada distancia cenital) es el ángulo entre el zenit local y la línea que une al observador y el Sol. Es un ángulo entre 0° y 90° . La altitud solar α (también llamada elevación solar) es la altura angular del Sol por sobre el horizonte celestial del observador. Es un ángulo entre 0° y 90° . La altitud solar es el complemento del ángulo cenital.

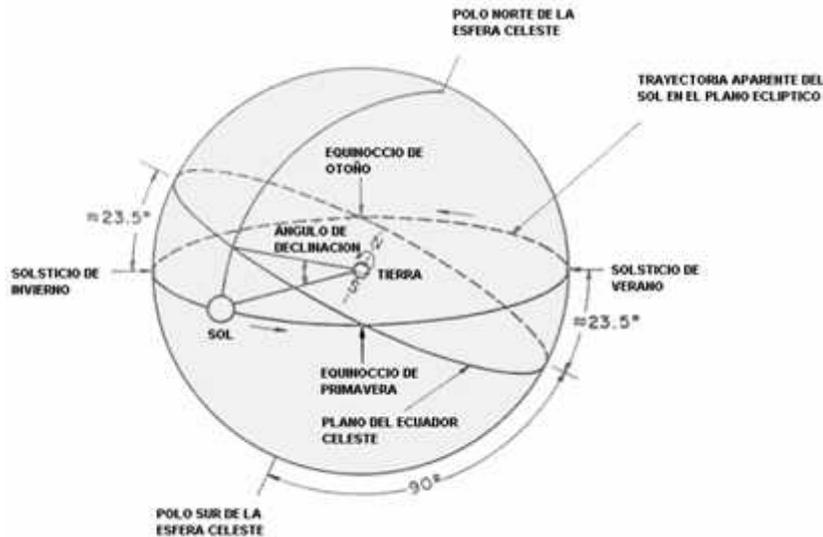


Figura 10. Esfera celeste que muestra el camino aparente del Sol (Iqbal).

El azimut solar ψ es el ángulo al zenit local entre el plano del meridiano del observador y el plano de un gran círculo que pasa a través del zenit y el Sol. Es positivo en el este, negativo en el oeste (cero al sur) y varía entre 0° y $\pm 180^\circ$. El ángulo horario ω es el ángulo medido en el polo celestial entre el meridiano del observador y el meridiano solar. Contando desde el mediodía, cambia 15° por hora.

Para una posición geográfica dada, en la ausencia de atmósfera refractiva de la Tierra, la relaciones trigonométricas entre el Sol (el centro del disco solar) y la superficie horizontal son las que siguen:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega = \sin \alpha \quad (1.6)$$

y

$$\cos \psi = (\sin \alpha \cdot \sin \phi - \sin \delta) / \cos \alpha \cdot \cos \phi \quad (1.7)$$

$$0^\circ \leq \psi \leq 90^\circ, \cos \psi \geq 0,$$

$$90^\circ \leq \psi \leq 180^\circ, \cos \psi \leq 0.$$

A veces la siguiente ecuación es usada para obtener ψ :

$$\sin \psi = \cos \delta \cdot \sin \omega / \cos \alpha. \quad (1.8)$$

Sin embargo, esta ecuación da valores impropios cuando $\psi > 90^\circ$ y debería ser evitada. Las definiciones y convenciones de signos para los ángulos son las siguientes:

- θ_z : ángulo cenital, en grados;
- α : altitud solar, o elevación solar, en grados; $\alpha = 90 - \theta_z$;
- ω : el ángulo horario, es cero al mediodía y positivo a la mañana;
- ϕ : latitud geográfica, en grados, positiva al norte;
- ψ : azimut solar, en grados, cero al sur, positivo al este; y
- δ : declinación, la posición angular del Sol al mediodía solar con respecto al plano del ecuador, al norte positivo, en grados.

Para todos los propósitos prácticos, la atmósfera refractiva de la Tierra tendrá una influencia despreciable en la altitud solar aparente, la cual es levemente más grande que la altitud calculada. La diferencia va desde 0' a zenit cero hasta aproximadamente 34' en el horizonte. Es levemente dependiente, sin embargo, de la temperatura atmosférica y la presión, y está tabulada en el Almanaque como θ_z entre 80° y 90°, donde el efecto es máximo.

1.7 Radiación solar global y su aprovechamiento

El recurso energético solar no puede ser cuantificado en la misma forma que los recursos energéticos convencionales (petróleo, gas, carbón, uranio, recursos no renovables) donde puede determinarse la cantidad de energía almacenada en los reservorios y extraíble periódicamente mediante una tecnología dada. Debe tenerse en cuenta su característica de energía renovable, inagotable pero de disponibilidad cíclica y variable.

A la parte del espectro electromagnético solar que llega a nivel de superficie terrestre (luego de haber sido atenuada por la atmósfera terrestre) se le denomina radiación solar global, cuyo rango de longitud de onda es aproximadamente de 0,3 hasta 3 μm , incluyendo parte del rango ultravioleta, el visible y parte del rango infrarrojo. Es la radiación solar global la que debe estudiarse para conocer la disponibilidad del recurso solar de cada coordenada del mapa mundial.

1.8 Mediciones terrestres

La unidad para medir la radiación solar global es la irradiancia solar que es la potencia por unidad de área (W/m^2) y esta es sensada por equipos denominados solarímetros.

Los solarímetros se dividen en dos grandes grupos: los termoelectrónicos y los fotovoltaicos, siendo los primeros los más precisos.

La variabilidad de la irradiancia solar es: a) diaria, obteniendo los mayores valores al mediodía solar (momento en que el Sol posee mayor altitud solar diaria) y b) anual donde los mayores valores se producen en días de verano con cielo claro (con nubosidad inferior al 25%) y fuertemente dependiente de la cobertura nubosa.

Al momento de la presente tesina, en la Regional de Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional hay instalados dos equipos solarimétricos, uno fotovoltaico perteneciente de dicha institución y otro termoeléctrico, propiedad de la Universidad Nacional de Luján. Este último está en calidad de préstamo, formando parte de la Red Solarimétrica Nacional.

1.9 Mediciones satelitales

A la hora del cálculo del recurso solar y para hacer el dimensionamiento de instalaciones solares (eléctricas y/o térmicas) interesa saber la energía disponible, y para ello se obtiene la insolación o irradiación solar. Esta cantidad no es más que la integral de la irradiancia solar global en cierto intervalo de tiempo, en general mensual. Las unidades más utilizadas de la insolación son: kWh/ m² o MJ/ m².

La insolación solar puede obtenerse mediante mediciones satelitales de la base de datos de la NASA denominada SSE (por sus siglas en inglés, Surface meteorology and Solar Energy) en su página web (<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>) que nos permite disponer de la insolación promedio mensual de cualquier coordenada en el mapa mundial promediado de 22 años de datos de mediciones con más de 200 satélites. Además se puede obtener otras variables meteorológicas y parámetros de energía.

En la tabla 1 se muestra la insolación promedio mensual en el año para la ciudad de Concepción del Uruguay, obtenida del SSE/NASA, para plano horizontal.

Lat.: -32.467° Long: -58.25°	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio en 22 años	6,97	6,06	5,11	3,73	2,94	2,38	2,69	3,58	4,74	5,55	6,64	7,00

Tabla 1. Insolación solar promedio mensual incidente en una superficie horizontal (kWh/m²) para la ciudad de Concepción del Uruguay, obtenida de la base de datos SSE/NASA.

1.10 Modelos

En 2006, Matthias Loster presentó un mapa del recurso solar (figura 11) basado en un promedio de tres años de irradiancia solar (incluyendo noches y cobertura de nubes). Proponía que si se instalaran células solares con una eficiencia de conversión de sólo el 8% en las zonas marcadas por los puntos negros en el mapa (6 discos de suficiente área para producir una potencia de salida media de 3 TW), se producirían 18 TW de energía eléctrica, siendo más que la potencia total disponible en todas las fuentes primarias de energía. Por ejemplo, en la Puna de Atacama (norte argentino) se requeriría un área de 136364 km² con una irradiancia media solar de 270 W/ m².

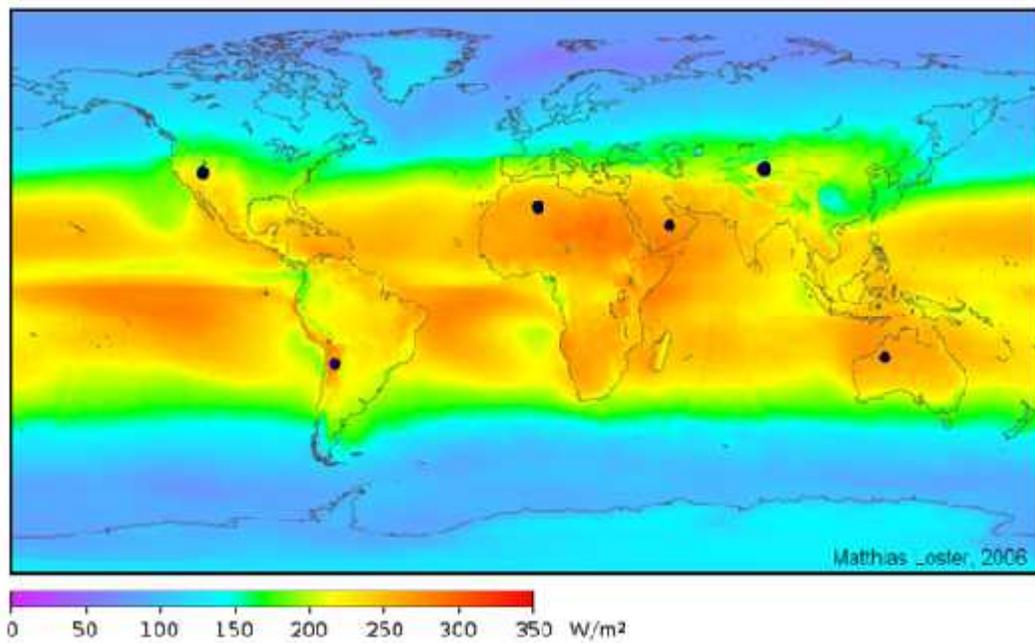


Figura 11. Mapa en falso color del recurso solar indicando irradiancia solar global promedio de 3 año (Loster, 2006).

El mapa se basa en un modelo desarrollado por el Bishop y Rossow (1991), a partir de datos disponibles a través del International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP), que proporciona datos calibrados recogidos por satélites meteorológicos geoestacionarios en todo el mundo. La insolación solar que se muestra en el mapa es una media de tres años (entre 1991 y 1993) y proporciona la irradiación total en un pixel de 2,5° en latitud y longitud.

Por otro lado, Hugo Grossi Gallegos y Raúl Righini (del Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar) de la Universidad Nacional de Luján, con quien colaboramos con datos para la Red Solarimétrica) elaboraron el primer “Atlas de Energía Solar de la República Argentina”.

Los valores de los promedios de la radiación solar global diaria están expresados en las cartas de dicho atlas en términos de la insolación solar (en kWh/m²-día) teniendo en cuenta la demanda habitual de los diseñadores de sistemas de conversión fotovoltaica y además cuentan con isolíneas.

Puede considerarse que las cartas mensuales de la distribución espacial de la radiación solar global responden adecuadamente a los datos disponibles en Argentina, dentro de las condiciones que se impusieron en la metodología, siendo compatibles con el mejor nivel del estado del conocimiento del recurso en esta parte del continente, cuya incerteza no supera el 10%.

A continuación, se reproducen las cartas correspondientes a la distribución espacial del valor medio de la irradiación solar global diaria recibida sobre una superficie horizontal en los meses del año (figura 12).

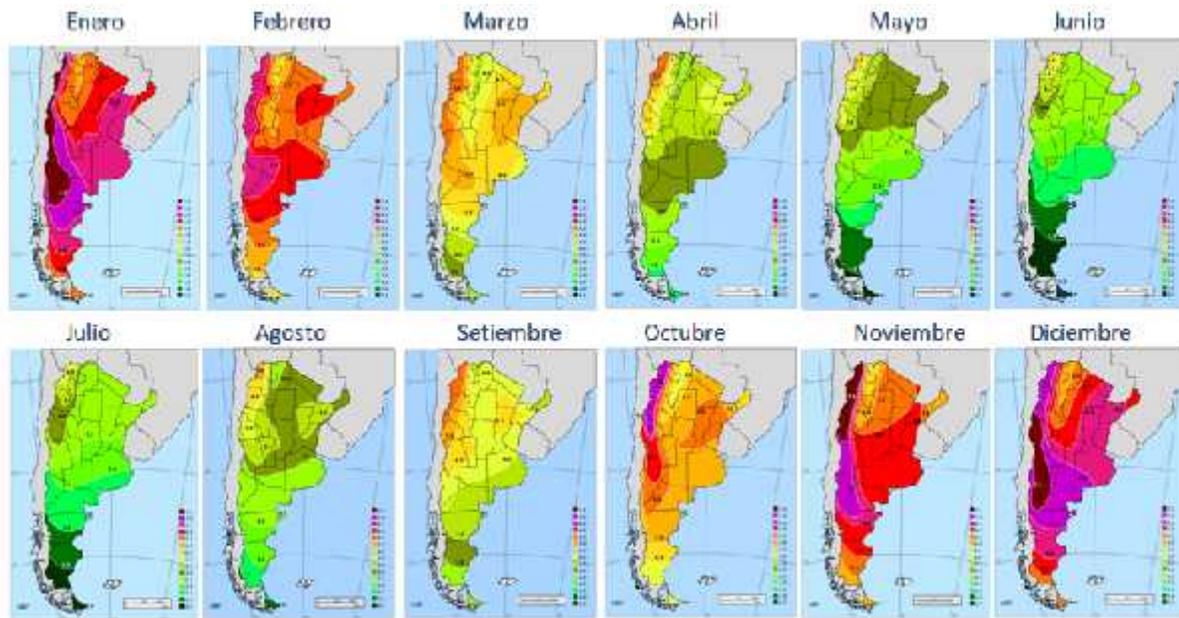


Figura 12. Cartas de insolación solar del “Atlas de Energía Solar de la República Argentina” (Grossi Gallegos y Righini, 2011).

Estas cartas son el referente nacional para la determinación del recurso solar en cualquier lugar del territorio nacional.

LA TECNOLOGÍA PIC

Los microcontroladores son computadores digitales integrados en un chip que cuentan con un microprocesador o unidad de procesamiento central (CPU), una memoria para almacenar el programa, una memoria para almacenar datos y puertos de entrada salida. A diferencia de los microprocesadores de propósito general, como los que se usan en los computadores PC, los μC son unidades autosuficientes y más económicas.

El funcionamiento de los μC está determinado por el programa almacenado en su memoria. Este puede escribirse en distintos lenguajes de programación. Además, la mayoría de los μC actuales pueden reprogramarse repetidas veces.

Por las características mencionadas y su alta flexibilidad, los μC son ampliamente utilizados como el cerebro de una gran variedad de sistemas

embebidos que controlan máquinas, componentes de sistemas complejos, como aplicaciones industriales de automatización y robótica, domótica, equipos médicos, sistemas aeroespaciales, e incluso dispositivos de la vida diaria como automóviles, hornos de microondas, teléfonos y televisores.

- Características de los Microcontroladores.

Las principales características de los μ C son:

✓ Unidad de Procesamiento Central (CPU): Típicamente de 8 bits, pero también las hay de 4, 32 y hasta 64 bits con arquitectura Harvard, con memoria/bus de datos separada de la memoria/bus de instrucciones de programa.

✓ Memoria de Programa: Es una memoria ROM (Read-Only Memory), EPROM (Electrically Programmable ROM), EEPROM (Electrically Erasable/Programmable ROM) o Flash que almacena el código del programa que típicamente puede ser de 1 KB a varios MB.

✓ Memoria de Datos: Es una memoria RAM (Random Access Memory) que típicamente puede ser de 1, 2, 4, 8, 16, 32 KB.

✓ Generador del Reloj: Usualmente un cristal de cuarzo de frecuencias que genera una señal oscilatoria de entre 1 a 40 MHz, o también resonadores o circuitos RC.

✓ Interfaz de Entrada/Salida: Puertos paralelos, seriales (UARTs, Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), I2C (Inter-Integrated Circuit), Interfaces de Periféricos.

Otras opciones:

–Convertidores Análogo-Digitales (A/D, analog-to-digital) para convertir un nivel de voltaje en un cierto pin a un valor digital manipulable por el programa del μ C.

–Moduladores por Ancho de Pulso (PWM, Pulse-Width Modulation) para generar ondas cuadradas de frecuencia fija pero con ancho de pulso modificable.

La alta integración de subsistemas que componen un μC reduce el número de chips, la cantidad de pistas y espacio que se requeriría en un circuito impreso si se implementase un sistema equivalente usando chips separados.

Un aspecto de especial interés para el desarrollador de circuitos basados en μC son las interfaces de entrada/salida. A través de los pines del chip asociados a las interfaces de entrada/salida el μC puede interactuar con otros circuitos externos enviándoles señales de comando o recibiendo estímulos correspondientes a variables externas. Por lo general varios pines de datos son bidireccionales, es decir pueden configurarse como entradas o salidas.

Las entradas, pueden adquirir datos interpretando el valor de voltaje como un valor lógico 0 o 1, mientras que las salidas pueden entregar una señal binaria de voltaje cuya magnitud dependerá del valor lógico 0 o 1. Monitoreando el valor de las entradas, el microcontrolador puede responder a eventos externos y realizar una cierta acción, como variar las señales de salida de acuerdo al valor en las entradas. Para responder a eventos externos, los μCs cuentan con un recurso conocido como interrupciones. Las interrupciones son señales que se generan internamente en el microcontrolador que detienen la ejecución normal del programa para ejecutar alguna subrutina de respuesta al evento. Una vez ejecutada la subrutina de interrupción la ejecución del programa continúa en el punto en que se encontraba antes de generarse la interrupción.

No todas las interrupciones necesariamente están asociadas al cambio del estado de los pines de entrada. También hay interrupciones que pueden estar asociadas al valor de una entrada AD, o al cumplimiento de un periodo de tiempo fijado por un timer o temporizador. Estas características dependerán del modelo de μC empleado.

Proceso de Desarrollo.

✓ El proceso de desarrollo de una aplicación basada en microcontroladores se compone de las siguientes etapas principales, las cuales se explican en más detalle en las siguientes subsecciones.

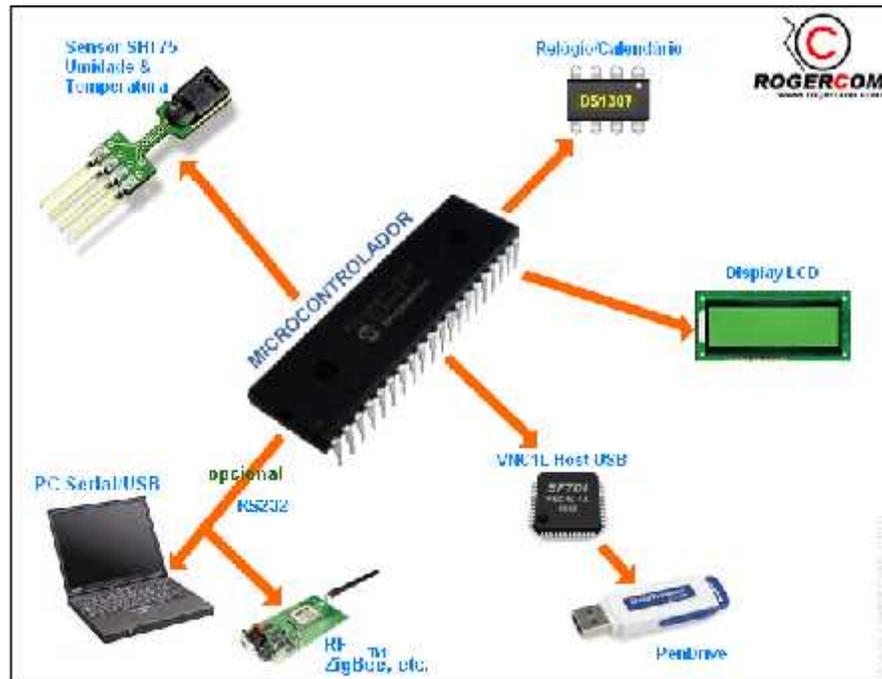


Figura 13. Representación de los accesorios que pueden vincularse con un microcontrolador PIC.

✓ Desarrollo de software: Esta etapa corresponde a la escritura y compilación/ensamblaje del programa que registrará las acciones del μ C y los sistemas periféricos conectados a este.

✓ Programación del μ C: En esta etapa el código de máquina correspondiente al programa desarrollado en la etapa anterior se descarga en la memoria del μ C.

La electromecánica del seguidor solar

Un seguidor solar es un dispositivo mecánico capaz de orientar los paneles solares de forma que éstos permanezcan aproximadamente perpendiculares a los rayos solares. Cuando esto ocurre, la radiación solar captada es máxima. Estos

dispositivos pueden aumentar el rendimiento de los paneles solares entre un 30% y un 40%.

Los sistemas de seguimiento solar pueden utilizarse para obtener calor y energía eléctrica tanto en viviendas como en grandes complejos urbanísticos o industriales. Por un lado, se pueden aprovechar para producir agua caliente de uso doméstico o para instalaciones colectivas y por otro lado, su producción energética puede servir para abastecer de electricidad a lugares sin conexión a la red eléctrica; para la extracción de agua en pozos aislados mediante bombeo; o para hacer funcionar centros de comunicaciones, electrodomésticos, etc.

Según sus grados de libertad de los seguidores estos se clasifican en:

- **Seguidores de un solo eje.**

Estos sólo tienen un grado de libertad, es decir se mueven en un solo eje de rotación. Hay varios tipos de seguidores de un solo eje, que explicamos brevemente a continuación

- Un solo eje horizontal. Este tipo de seguidor tiene el eje horizontal respecto al suelo. En este caso, el eje horizontal está orientado Norte-Sur, y a lo largo del día los paneles horizontales girarán sobre este eje, siguiendo el movimiento aparente del Sol. Este tipo de seguidor es aceptable en latitudes cercanas al ecuador.
- Un solo eje vertical. En este caso el eje está vertical respecto al suelo. En latitudes lejanas al Ecuador son recomendables este tipo de seguidores. Los paneles suelen estar orientados con un ángulo respecto al eje de rotación, y cuando giran forman un cono alrededor del eje.
- Un solo eje inclinado. El seguidor de un solo eje que no sea ni vertical ni horizontal, es un seguidor de eje inclinado. Los paneles están inclinados con la misma inclinación del eje, y cuando giran forman un cilindro alrededor de este eje. Una variación de este tipo

de seguidor es la que tiene la inclinación igual a la latitud donde se encuentra la instalación, con una orientación de su eje de polo a polo. Es decir que apunte a un polo celeste, simulando con su movimiento el de La Tierra, solo que en sentido contrario.

- **Seguidores de dos ejes.**

Estos tienen dos grados de libertad, es decir dos ejes de rotación. Estos ejes están típicamente perpendiculares el uno del otro. El eje primario es el que está fijo respecto a la Tierra, y el otro eje, que está referenciado al eje primario se llama eje secundario.

Hay varios tipos de seguidores de dos ejes. Estos son los más comunes:

- Seguidor de dos ejes de inclinación (TIP-TILT). Este tipo de seguidores tienen su eje primario horizontal respecto a la Tierra. El eje secundario es perpendicular al primario. Los ejes de rotación de este tipo de seguidor están típicamente alineados con el Norte magnético o con algún paralelo Este-Oeste. Uno de los ejes permite orientar al panel en su posición Norte-Sur y el otro en la posición Este-Oeste que se encuentre el Sol en el cielo.
- Seguidor de Acimut-Altitud. Este tipo de seguidor tiene su eje primario vertical respecto al suelo. El eje secundario es perpendicular al primario. Este tipo de seguidor de dos ejes es el más implementado debido a su sencillez en la estructura, además que no requiere estar a gran altura por sobre el suelo; esto es especialmente importante en el caso de tratarse de grandes instalaciones. Este tipo de seguidor ubica a los paneles solares frente al Sol girando alrededor de su eje vertical un ángulo conocido como acimut, y elevando la inclinación de los paneles a la altitud a la que se encuentra el Sol.

DESARROLLO

1 DIAGRAMA DE BLOQUE BASICO DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR

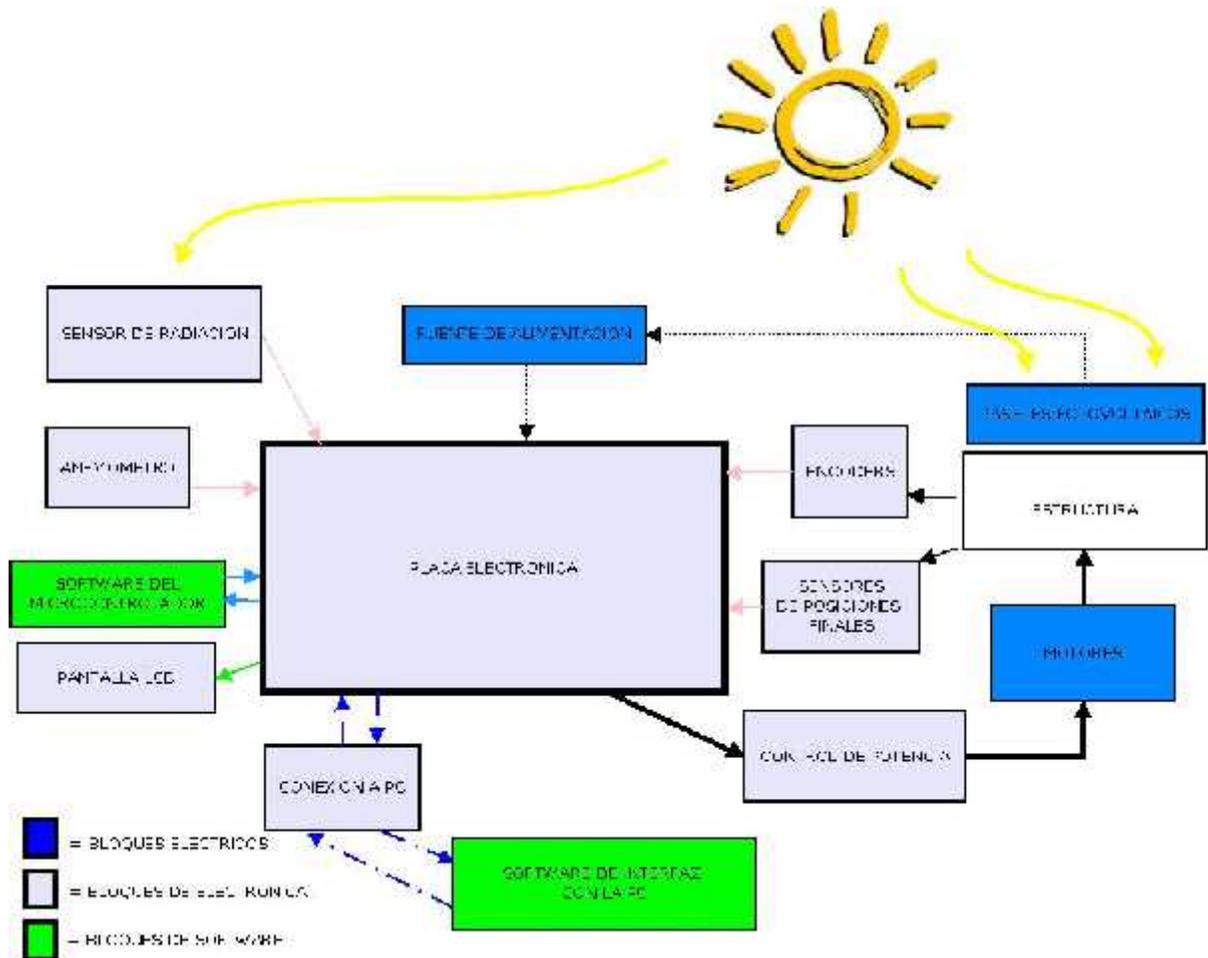


Figura 1. Diagrama básico del sistema de seguimiento solar

2 ESTRUCTURA BASICA DEL SEGUIDOR SOLAR

La estructura que se presenta a continuación en para esquematizar donde se ubican sensores de posición final y los encoders angulares. En las imágenes se puede ver los encoders angulares en color azul y los sensores de posición final en color turquesa. El motor que está montado en el eje superior va orientado hacia el norte, mientras que el otro motor está orientado hacia el oeste.

La estructura básica fue diseñada en el software SolidWork debido a sus múltiples herramientas de dibujo.

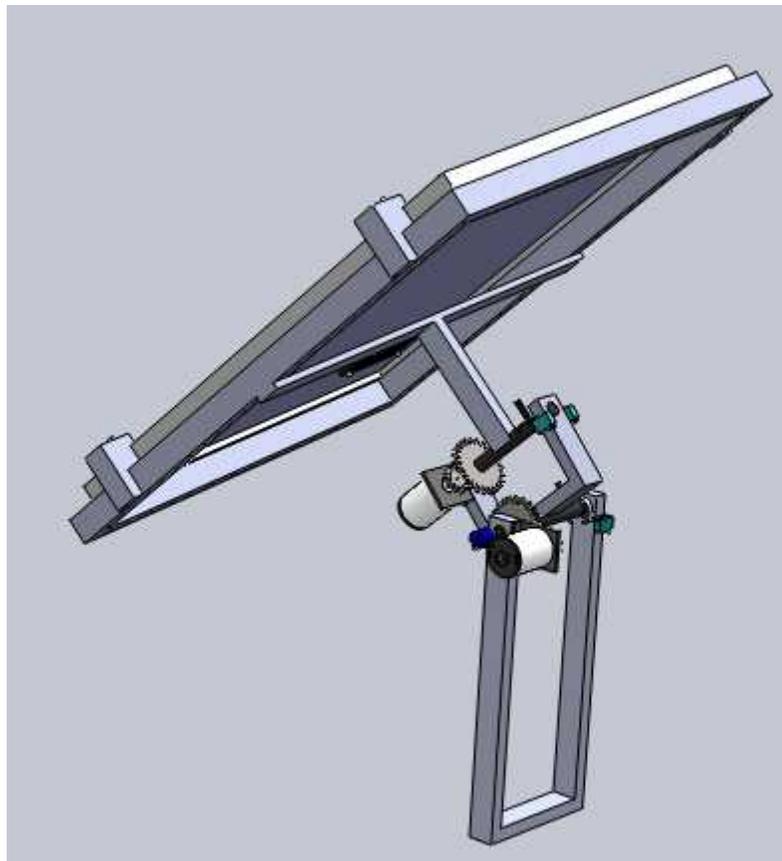


Figura 2. Esquema básico de la estructura del seguidor solar visto en perspectiva.

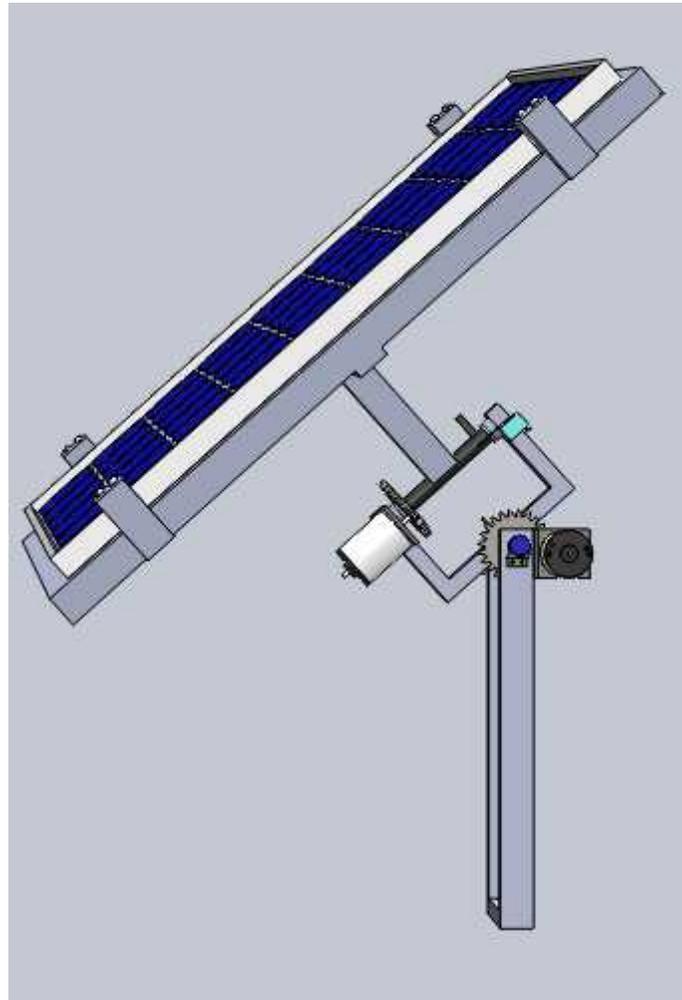


Figura 3. Vista lateral de la estructura del seguidor.

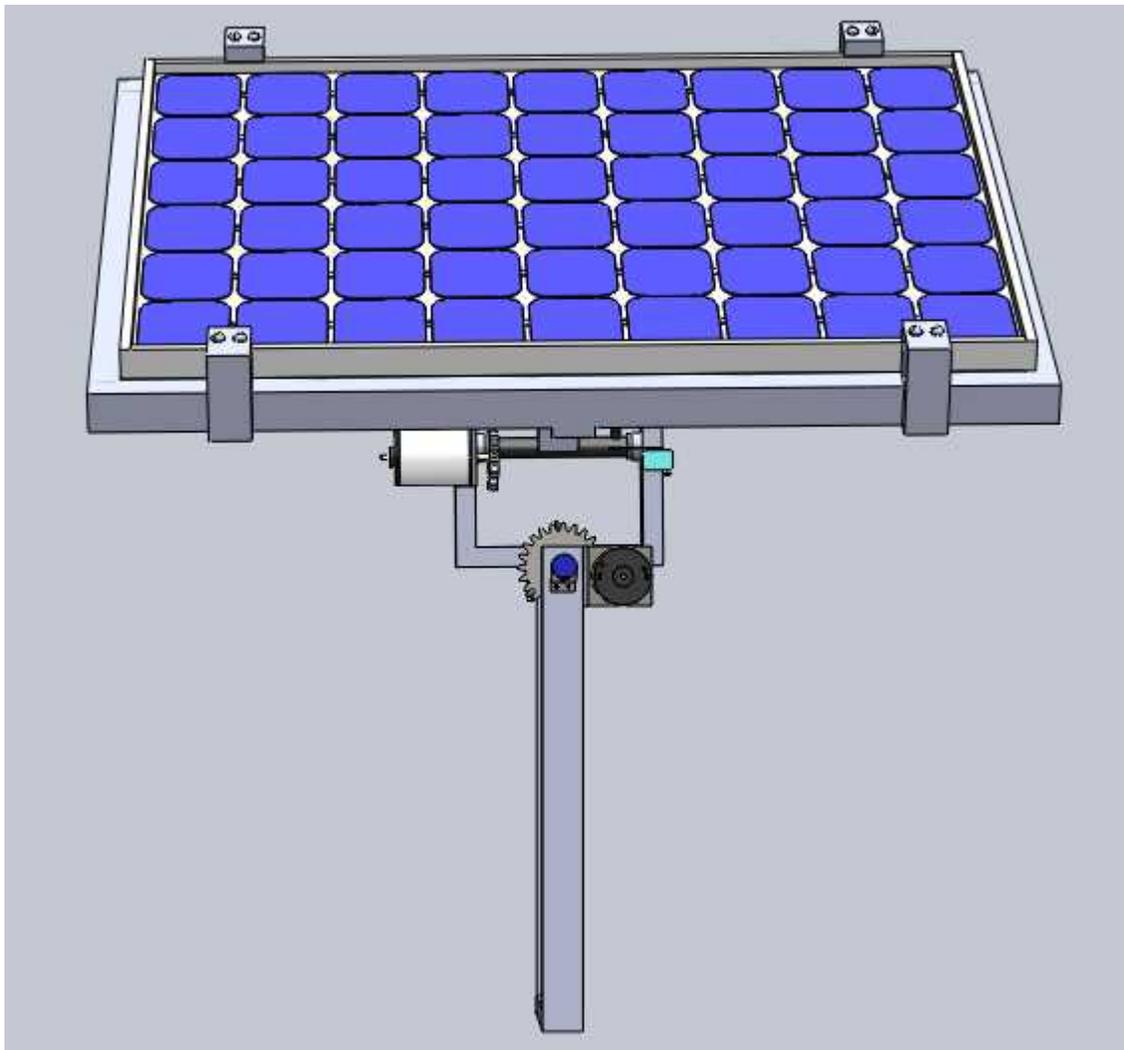


Figura 4. Vista frontal de la estructura del seguidor.

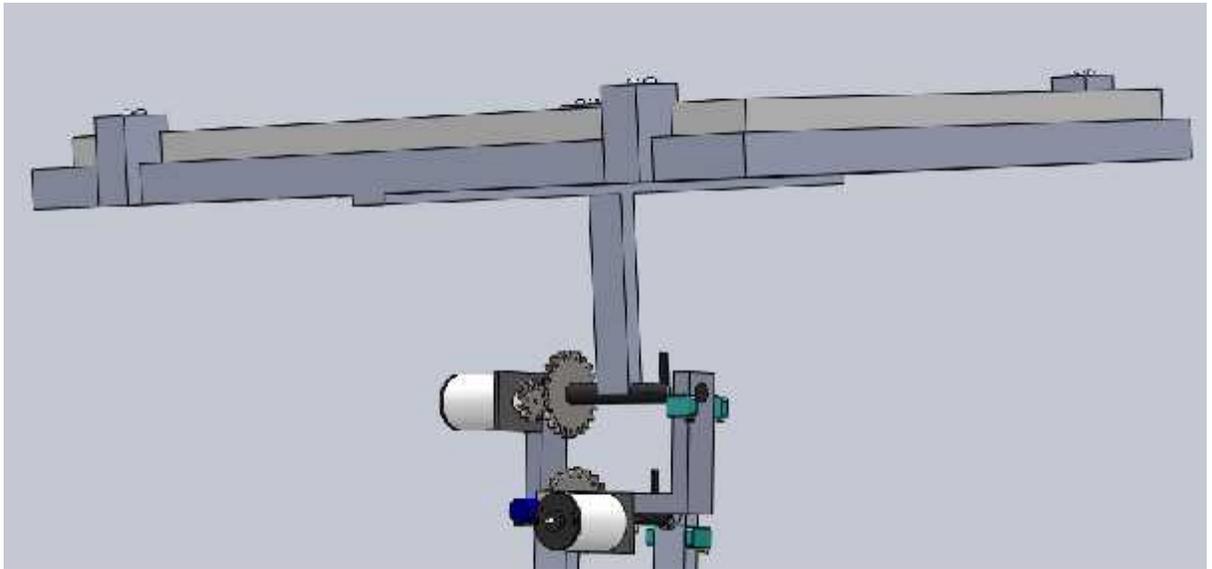


Figura 5. Vista parcial superior de la estructura del seguidor.

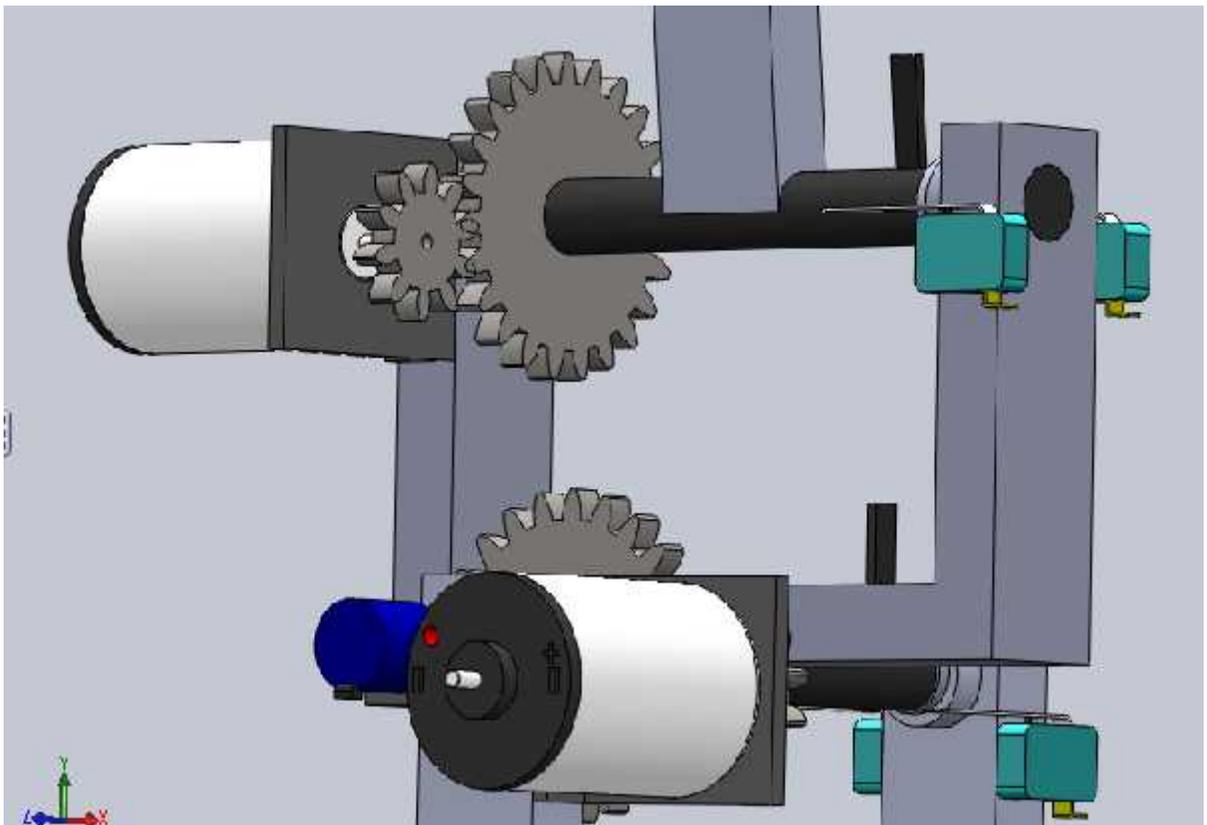


Figura 6. Vista de la ubicación de los motores, encoders y finales de carrera

3 DESARROLLO ELECTRONICO

3.1 Elementos que componen el sistema electrónico:

- **Microcontrolador PIC 16f877A**

El corazón del sistema electrónico está compuesto por un microcontrolador PIC 16F877A, el cual fue seleccionado debido a su amplia memoria de programa 8Kx14 bit, es económico y relativamente fácil de conseguir en el mercado local.

Este μ C comanda todos los dispositivos electrónicos para que realicen las tareas necesarias para el funcionamiento óptimo del sistema. Además, contiene el programa principal y también es el que almacena en su memoria EEPROM las constantes que le son enviadas desde la PC al momento de la puesta en marcha y la constante del motor. Dichos parámetros - son calculados por el sistema ni bien se pone en marcha por primera vez.

La velocidad a la que funciona el microcontrolador en este proyecto es de 4 MHz, la cual es establecida a través de un cristal de cuarzo.

La alimentación del sistema es de 5 volts.

Las características electrónicas y el pin out del μ C se presentan en las figuras 19 y 20.

Este microcontrolador posee las siguientes características electrónicas:

Key Features	PIC16F877A
Operating Frequency	DC – 20 MHz
Resets (and Delays)	POR, BOR (PWRT, OST)
Flash Program Memory (14-bit words)	8K
Data Memory (bytes)	368
EEPROM Data Memory (bytes)	256
Interrupts	15
I/O Ports	Ports A, B, C, D, E
Timers	3
Capture/Compare/PWM modules	2
Serial Communications	MSSP, USART
Parallel Communications	PSP
10-bit Analog-to-Digital Module	8 input channels
Analog Comparators	2
Instruction Set	35 Instructions
Packages	40-pin PDIP 44-pin PLCC 44-pin TQFP 44-pin QFN

Figura 7. Características del microcontrolador.

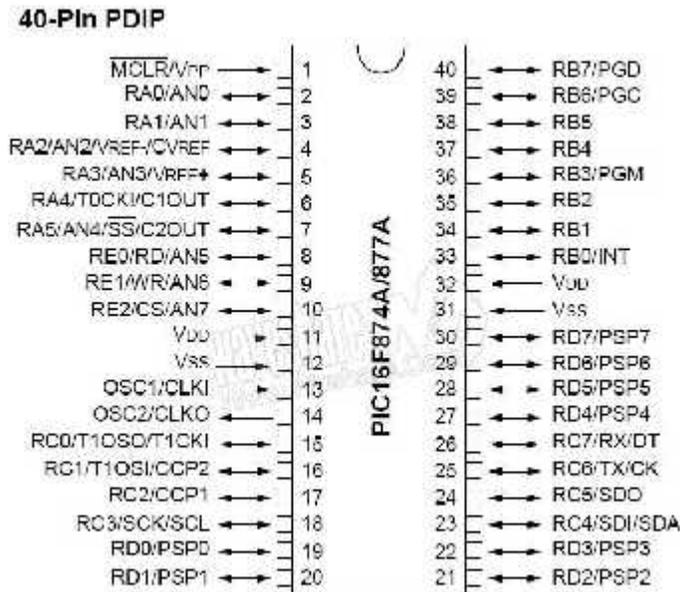


Figura 8. Esquema de las conexiones del microcontrolador.

- **Integrado calendario DS1307**

El circuito integrado (CI) DS1307 (figura 21), de la empresa Dallas Semiconductor (Maxim), fue seleccionado debido a que es el único integrado calendario que se consigue en el mercado local.

Este es un dispositivo que se conoce como “Reloj de Tiempo Real” que opera a través del bus I2C y que, además de brindarnos la hora con minutos y segundos, posee un calendario que contempla los años bisiestos hasta fin de siglo, es decir, hasta el año 2100. Este dispositivo tiene la posibilidad de trabajar con una pequeña batería para almacenar los datos mientras el sistema se encuentra desconectado de la alimentación. Además, esta pequeña alimentación de respaldo permite mantener funcionando el oscilador maestro del reloj con un consumo ínfimo de 300 nA. Una simple batería de Litio CR2032 puede brindarnos un funcionamiento satisfactorio durante 10 años.

A continuación se muestra el diagrama del conexionado del CI DS1307 para la aplicación como reloj (figura 21).

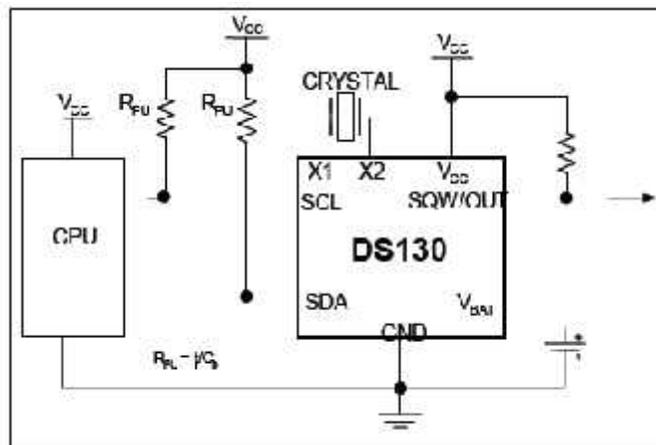


Figura 9. Esquema del conexionado del CI DS1307 para la aplicación como reloj.

- **Display LCD 16x2**

Las pantallas de cristal líquido LCD o display LCD para mensajes al usuario (*Liquid Cristal Display*) tienen la capacidad de mostrar cualquier carácter alfanumérico, permitiendo representar la información que genera cualquier equipo electrónico de una forma fácil y económica. Consta de una matriz de caracteres distribuidos en dos líneas de 16 caracteres cada línea.

El proceso de visualización es gobernado por un microcontrolador incorporado a la pantalla (Hitachi 44780). Las características generales más relevantes de un módulo LCD 16x2 son las siguientes:

- Consumo muy reducido, del orden de 7,5mW
- Pantalla de caracteres ASCII, además de los caracteres japoneses Kanji, caracteres griegos y símbolos matemáticos.
- Desplazamiento de los caracteres hacia la izquierda o a la derecha
- Memoria de 40 caracteres por línea de pantalla, visualizándose 16 Caracteres por línea
- Permite que el usuario pueda programar 8 caracteres

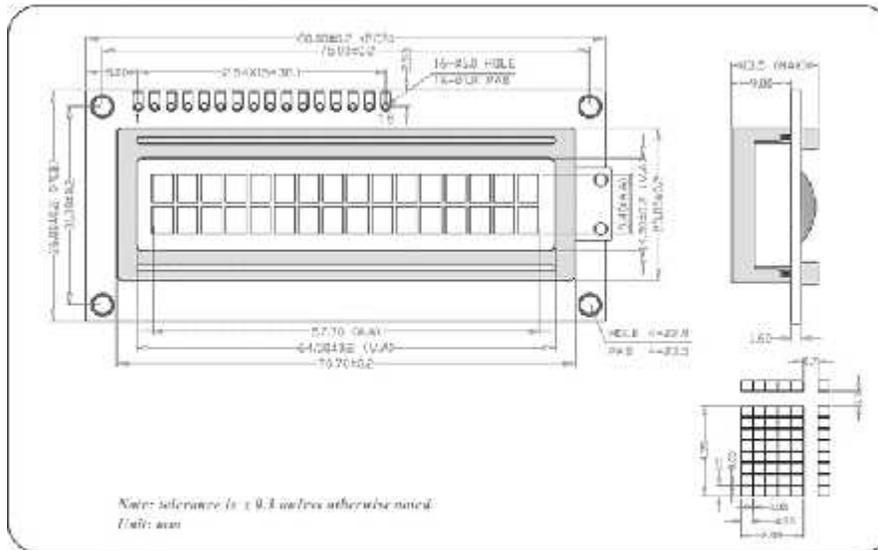
Su pin out y su esquema se muestran en las figuras 22 y 23.

El display cumple la función de mostrar al usuario la fecha y la hora con la que funciona el sistema. Y además, en el caso de que el usuario desee modificar dichos valores, muestra al usuario si el comando fue aceptado por el sistema.

PIN CONNECTIONS			
PIN	Symbol	I. level	Function
1	VSS	—	GND(0V)
2	VDD	—	Supply Voltage for Logic(+5V)
3	V0	—	Power supply for LCD
4	RS	II/L	II: Data; L: Instruction Code
5	R/W	II/L	II: Read; L: Write
6	E	II/L	Enable Signal
7	DB0	II/L	Data Bus Line
8	DB1	II/L	
9	DB2	H/L	
10	DB3	H/L	
11	DB4	H/L	
12	DB5	H/L	
13	DB6	II/L	
14	DB7	H/L	
15	BL1	—	Backlight Power(+5V)
16	BL2	—	Backlight Power(0V)

Figura 10.Pin out display LCD 16x2

■ DIMENSIONS/DISPLAY CONTENT



■ PIN CONFIGURATION

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
VSS	VDD	V0	RS	R/W	E	DB0	DB1	DB2	DB3	DB4	DB5	DB6	DB7	BL1	BL2

Figura 11.Esquema del LCD 16X2.

- **Circuito integrado MAX232**

El MAX232 (figura 24) es un circuito integrado que convierte los niveles de las líneas de un puerto serie RS232 (de la PC) a niveles TTL (del microcontrolador) y viceversa. Lo interesante es que sólo necesita una alimentación de 5V, ya que genera internamente algunas tensiones que son necesarias para el estándar RS232. Otros integrados que manejan las líneas RS232 requieren dos voltajes, +12V y -12V.

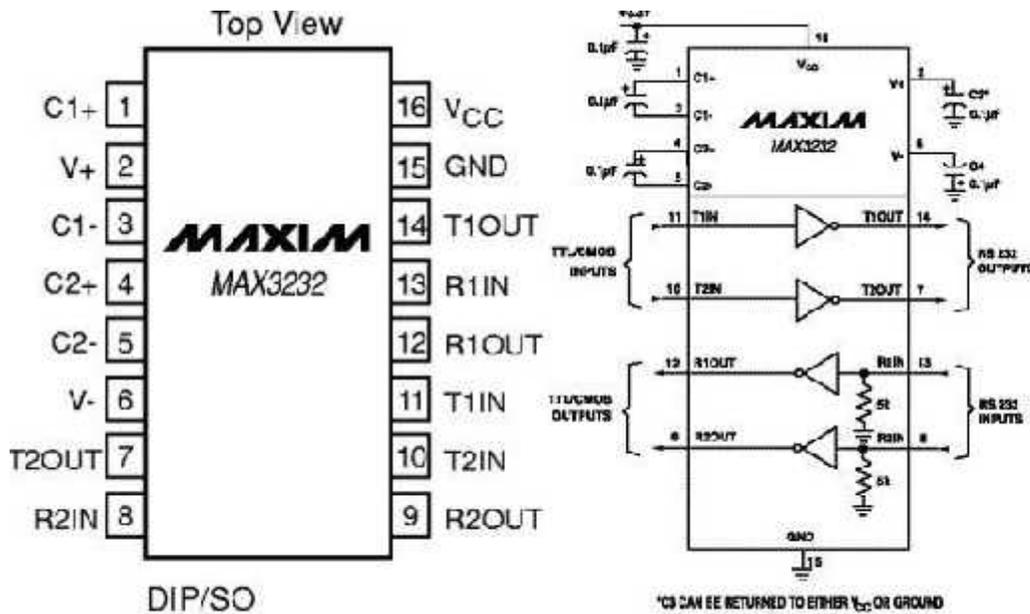


Figura 12. Esquema del IC máx. 232

El CI MAX232 provee la conexión necesaria para lograr la comunicación entre el puerto serie de una PC y cualquier otro circuito con funcionamiento en base a señales de nivel TTL/CMOS. El circuito integrado posee dos convertidores de nivel TTL a RS232 y otros dos que, a la inversa, convierten de RS232 a TTL. Estos convertidores son suficientes para manejar las cuatro señales más utilizadas del puerto serie del PC, que son TX (señal de transmisión de datos), RX (señal de recepción), RTS y CTS (para establecer el protocolo para el envío y recepción de los datos).

- **Potenciómetro angular**

Es un transductor de posición angular, de tipo absoluto y con salida de tipo analógico. Básicamente es una resistencia de hilo bobinado en una pista de material conductor, distribuida a lo largo de un soporte en forma de arco y un cursor solidario a un eje de salida que pueda deslizar sobre dicho conductor. El movimiento del eje arrastra el cursor provocando cambios de resistencia entre éste y los extremos. De esta forma si se alimentan los extremos con una tensión constante (V_0), aparece en la toma de medida una tensión proporcional al ángulo girado a partir del origen. Interesa que esta variación sea lineal. En cuanto a la respuesta dinámica el potenciómetro es un elemento proporcional sin retardo. En la figura 25 se muestra el detalle de dicho potenciómetro angular.

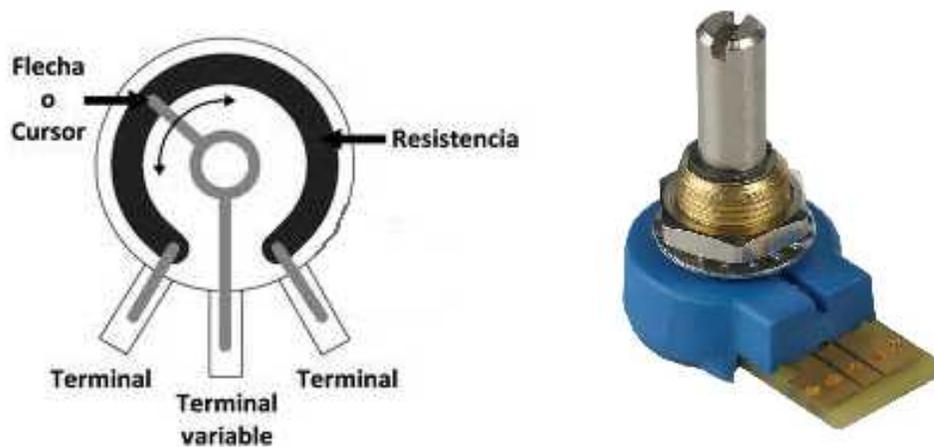


Figura 13. Detalle del potenciómetro angular. Izquierda: esquema. Derecha: vista exterior.

3.2 Placa electrónica principal

La placa electrónica principal fue diseñada en el software Proteus®, logrando un diseño de un tamaño de 105 mm de largo por 100 mm de ancho, y doble faz. Se optó por un diseño doble faz ya que de esta manera se logra reducir el tamaño y agrupar de una manera más óptima los componentes.

En la figura 22 se podrá ver una vista 3d de la ubicación de los componentes y el diagrama de las pistas de conexión.

3.3 Circuito de conexión del microcontrolador

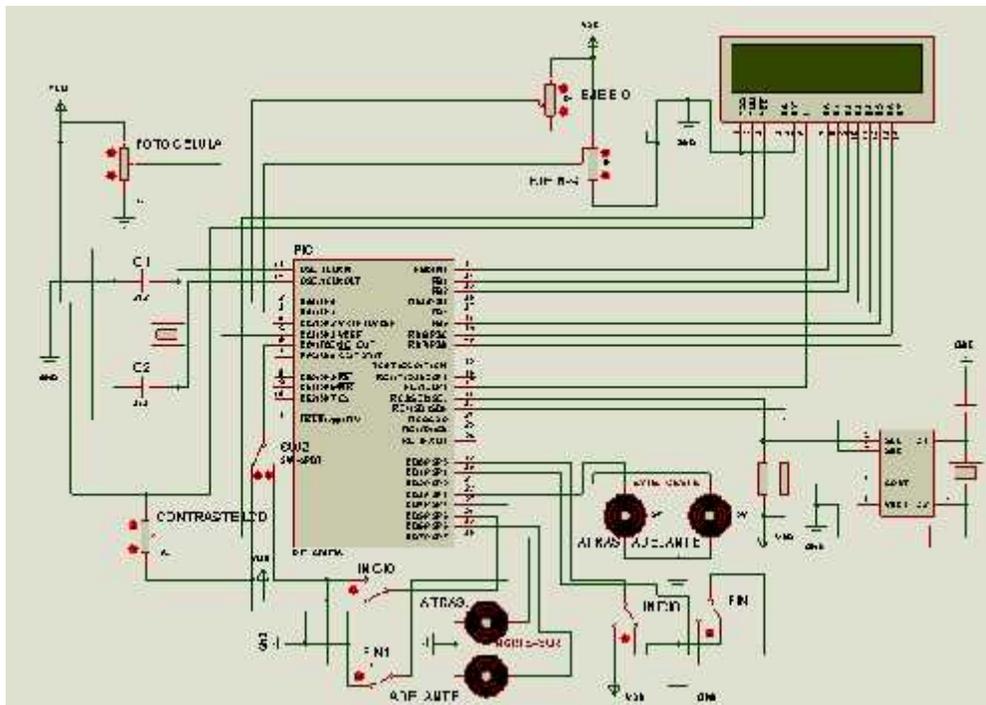


Figura 14. Esquema de la placa principal realizada en Proteus

Detalle de la vista 3d de la placa electrónica:

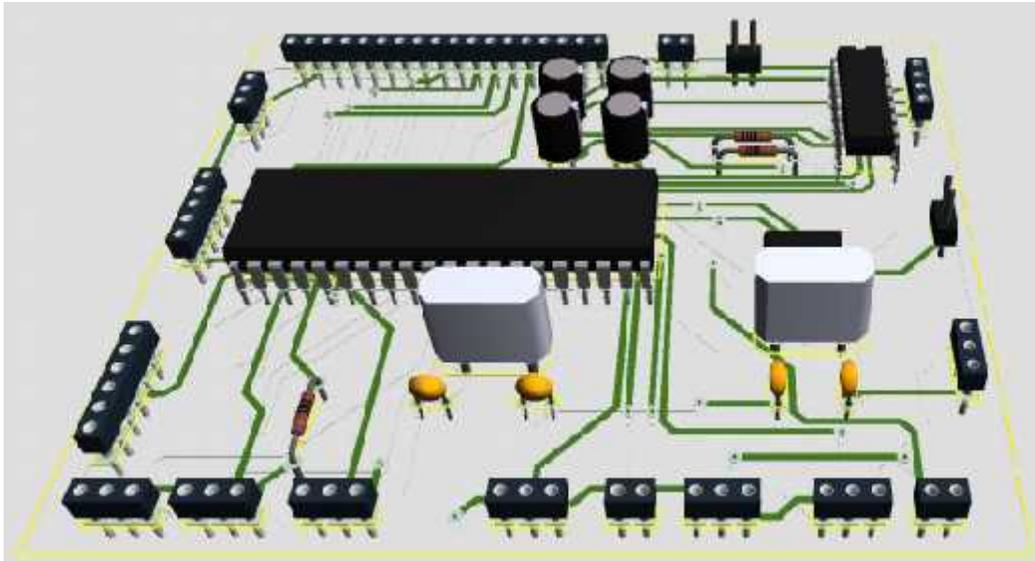


Figura 15. Esquema de la placa principal realizada en Ares

3.4 Desarrollo del sistema electrónico de potencia

Para el sistema electrónico de potencia se utilizaron relés de 5v doble y simple inversor, y para accionar dichos relés se utilizó el integrado ULN 2803 el cual es de bajo costo, posee diodo volante, y se lo puede adquirir en el mercado local.

- **ULN 2803**

Dentro del ULN2803 se encuentran 8 transistores NPN Darlington. Es un circuito integrado ideal para ser empleado como interfaz entre las salidas de un PIC o cualquier integrante de las familias TTL o CMOS y dispositivos que necesiten una corriente más elevada para funcionar, como por ejemplo, un relé.

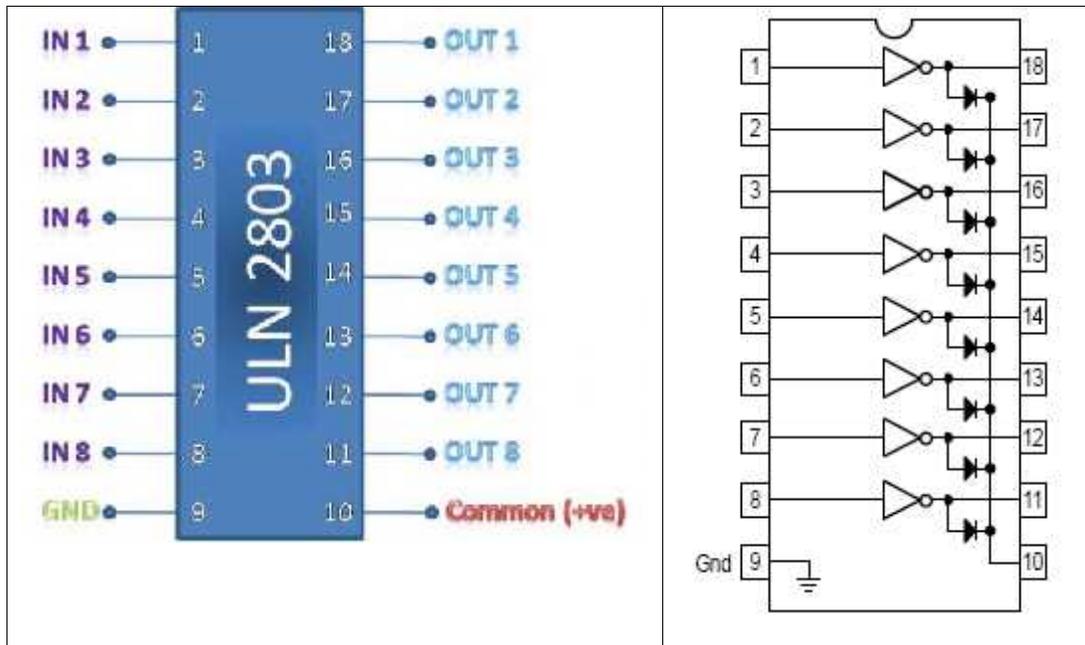


Figura 16. Pin out C I ULN 2803

- Relé

El relé es un dispositivo electromecánico, que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de un electroimán (A), se acciona un juego de uno o varios contactos (B) que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes (figura 29).

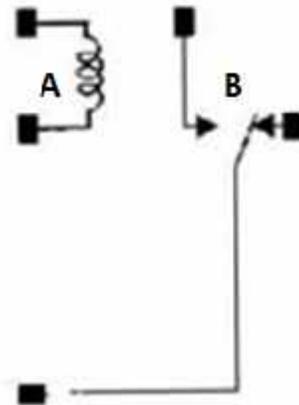


Figura 17. Esquema de un relé simple inversor.

- **Circuito de conexión del sistema de potencia**

En las figura 30 se puede ver el circuito que maneja los motores de corriente continua del seguidor. El relé simple inversor es el que alimenta al motor para que empiece a funcionar y el relé doble inversor es el que permite la marcha en ambos sentidos.

El CI ULN2803 es el que amplifica la señal del μC para que puedan manejarse los relés.

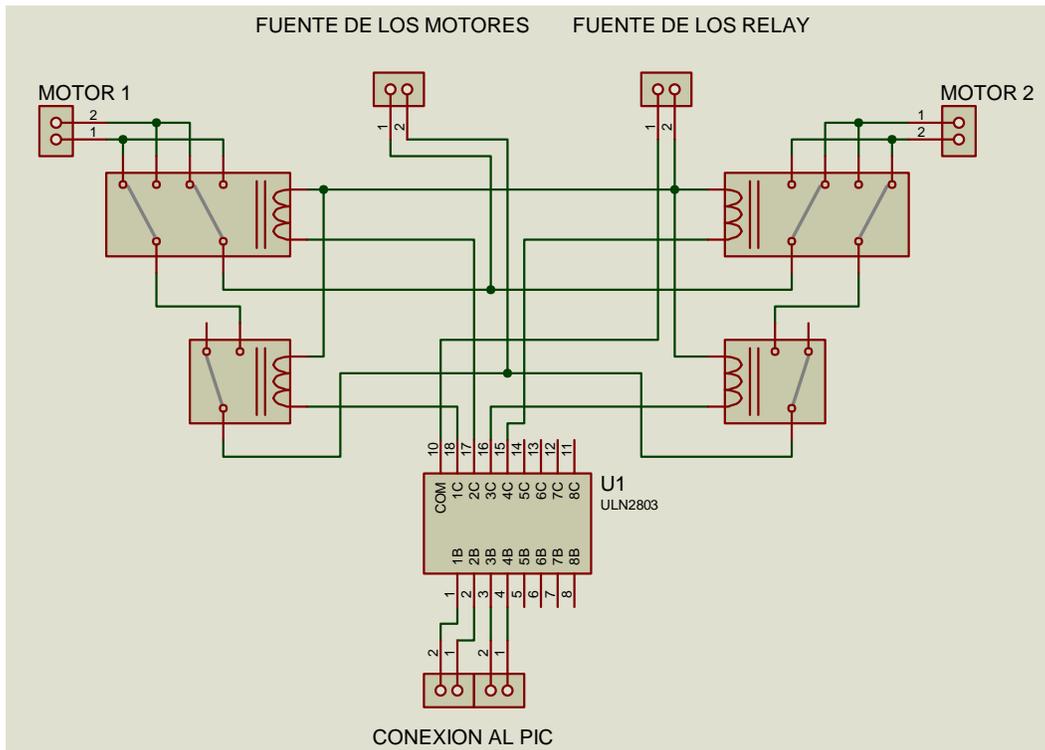


Figura 18. Diagrama del driver de los motores realizado en Proteus®.

3.5 Desarrollo del anemómetro

El seguidor cuenta con un anemómetro construido a partir de un generador de corriente continua de imanes permanentes lo cual nos da una estimación aproximada de la velocidad del viento. Este está instalado en la estructura del seguidor que permitiendo detectar las ráfagas de viento que puedan provocar daños a la estructura del seguidor. En caso de detectarlas, el seguidor coloca de forma horizontal los paneles fotovoltaicos para evitar daños y una vez que disminuye la velocidad del viento este vuelve a su posición normal.

La máxima carga de viento que acepta la estructura se regula mediante software a criterio del usuario.

3.6 Otros anexos electrónicos

El seguidor también cuenta con una foto-resistencia y un sistema de lavado de los paneles. El primero permite al sistema avisar si el día está nublado para que no se mueva evitando gastos de energía innecesarios, y el lavado de los paneles ayuda a aumentar el rendimiento del sistema cuando se los instala en lugares de mucha polución en el ambiente eliminando las partículas que se depositan sobre el mismo.

4 DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL MICROCONTROLADOR

El software del microcontrolador fue desarrollado en lenguaje ASSEMBLER, utilizando el programa MPLAB de la compañía MICROCHIPS para su desarrollo.

A continuación se presenta un diagrama de bloques con la estructura básica del software.

4.1 Descripción de los bloques del diagrama de flujo:

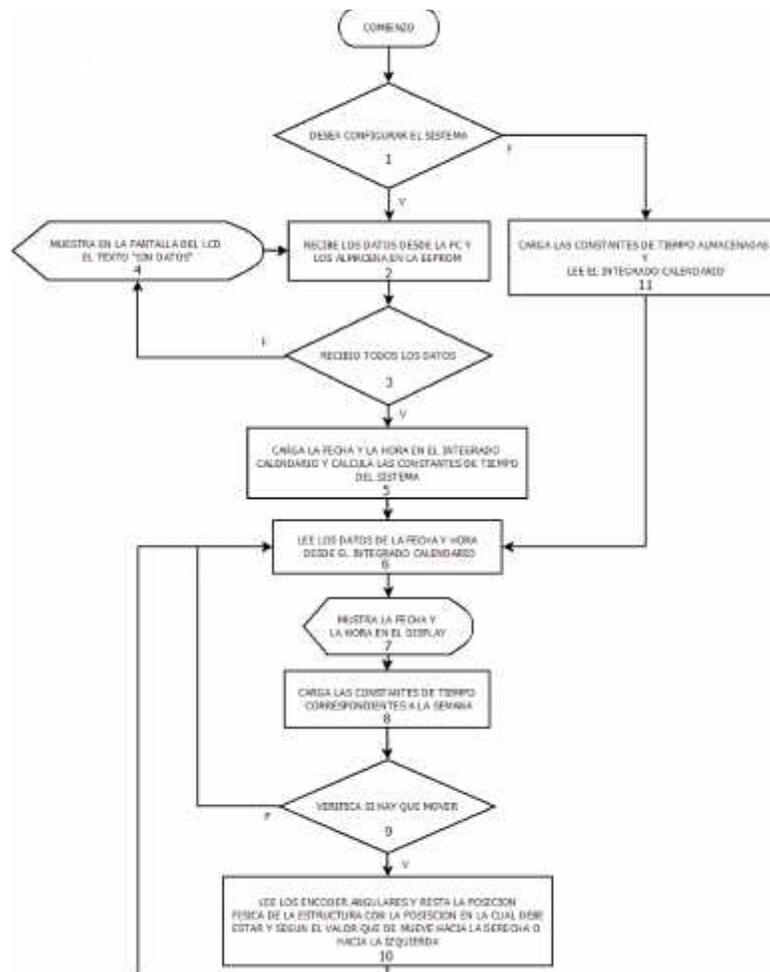


Figura 19. Diagrama de flujo del software del microcontrolador

Las etapas del software del μ C (figura 26) son:

1-el sistema pregunta al usuario si desea realizar la configuración del sistema a través de la PC, en caso afirmativo se deberá presionar el pulsador correspondiente.

2-en el caso de que se desee configurar el sistema el μ C recibe los datos desde la PC y los de la memoria EEPROM para que en un eventual caso de corte de suministro eléctrico no se pierda información.

3-el sistema verifica que se recibieron los datos para seguir con las instrucciones, en caso contrario sigue esperando hasta que se complete el envío de los datos por parte de la PC.

4- se muestra en el display LCD la leyenda “sin datos”.

5-en esta etapa, el software se carga los datos de la fecha y la hora en el integrado DS1307.

6-el PIC lee los datos de la fecha y la hora actualizada desde el integrado calendario (DS1307).

7-se muestra la fecha y la hora en el display LCD.

8- se cargan las constantes de tiempo correspondientes a la fecha actual para poder mover los ejes.

9- se verifica si es hora de encender los motores para mover la estructura, en caso afirmativo pasa al siguiente bloque. En caso contrario sigue en stand-by esperando el momento exacto para empezar a mover la estructura.

10-en el caso de que deba mover la estructura, el sistema lee los *encoders* de ambos ejes y la resta de donde está posicionado el eje menos donde tiene que estar y encuentra la diferencia de grados entre la posición actual y la nueva o deseada y se mueve de acuerdo a los resultados.

11-en caso de que el usuario no quiera cargar el sistema al iniciar el seguidor por primera vez, el sistema carga las constantes de tiempo que tiene guardadas en la memoria EEPROM y lee la fecha y hora que tiene configurado el equipo.

5 DESARROLLO DEL SOFTWARE DE INTERFASE

El software de interface (SI) entre el μ C y la PC, fue desarrollado íntegramente en Visual Basic 6.0 debido a que posee una interfaz muy amigable para realizar programas para la PC. Este SI se desarrolló para que el usuario tenga una interface amigable y sencilla para poder configurar el seguidor solar en el momento de ponerlo en funcionamiento.

El SI cuenta con distintas opciones de configuración para que el usuario elija por la que mejor se adapte a sus necesidades. Así mismo también cuenta con una base de datos con las latitudes y longitudes de las principales ciudades de Argentina que le permite al usuario seleccionar de la lista en caso de que ignore las coordenadas del lugar en la que instaló el sistema.

Los requerimientos del SI para la instalación en una computadora son mínimos, lo único que se requiere es un puerto COM para la conexión con el seguidor.

Una vez terminada la configuración se desconecta el seguidor de la PC para su funcionamiento de forma autónoma.

Además, este SI contiene un software que se encarga de calcular los valores promedio de movimiento para cada semana del año, en función del movimiento relativo del Sol. Posteriormente, envía estas constantes al microcontrolador para que este, una vez por semana, actualice las constantes del seguimiento.

El software, además de cargar las constantes de movimiento, realiza las siguientes configuraciones:

- la fecha y la hora del microcontrolador,
- la cantidad de movimientos que va a realizar el sistema, es decir puede configurar el sistema para que mueva un solo eje o ambos ejes,

- la limpieza de los paneles (si será diaria, semanal o mensual en función de la polución del lugar).
- en caso de que la radiación sea menor a ciertos valores (día nublado) permite seleccionar la posibilidad de realizar o no el seguimiento solar.
- La velocidad máxima que soporta la estructura del seguidor y en caso de que esta velocidad sea superada el sistema, ubique los paneles fotovoltaicos de manera que reciban menores cargas de viento.

A continuación se muestra una imagen del software de interface de la PC

(Figura 32).

The screenshot shows a software interface titled "Programa de configuración para seguidor solar de dos ejes". It features several configuration sections:

- Location and Time:** Fields for latitude (32°31'), longitude (50°30'), year (2020), month (2), day (1), hour (10), and minutes (51).
- Operation Type:** Radio buttons for "un eje" (selected) and "dos ejes".
- Panel Cleaning:** Radio buttons for "si" (selected) and "no".
- Cleaning Frequency:** Radio buttons for "diaria" (selected), "semanal", and "mensual".
- Wind Support:** Radio buttons for "desactivado" (selected) and "activado", with a text field for "Velocidad máxima del viento en km/h".
- Radiation Deactivation:** Radio buttons for "desactivada" (selected) and "activada".
- Argentina Cities:** A section for "Latitud y longitud de distintas ciudades de Argentina:" with input fields for "Nombre", "Latitud", and "Longitud", and a "Ciudad" dropdown menu.
- Communication Port:** A section for "Configuración del puerto de comunicación:" with a dropdown menu.
- Buttons:** "Aceptar" and "Cancelar" buttons at the bottom.

Figura 20. Software de interface de la PC.

5.1 Protocolo de comunicación del software de la PC con el μ C

El puerto serie RS-232C, presente en todos los ordenadores actuales, es la forma más comúnmente usada para realizar transmisiones de datos entre ordenadores. El RS-232C es un estándar que constituye la tercera revisión de la antigua norma RS-232, propuesta por la EIA (Asociación de Industrias Electrónicas). Consiste en un conector tipo DB-25 de 25 pines, aunque es normal encontrar la versión de 9 pines DB-9, más barato e incluso más extendido para cierto tipo de periféricos. En cualquier caso, las PCs no suelen emplear más de 9 pines en el conector DB-25. Las señales con las que trabaja este puerto serie son digitales, de +12V (0 lógico) y -12V (1 lógico), para la entrada y salida de datos, y a la inversa en las señales de control. El estado de reposo en la entrada y salida de datos es -12V. Dependiendo de la velocidad de transmisión empleada, es posible tener cables de hasta 15 metros. En la figura 17 puede verse el detalle de conectores DB-25 y DB-9.

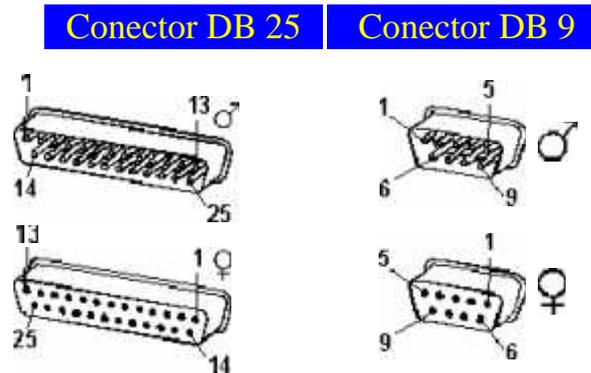


Figura 21. Esquemas de los puertos DB-25 y DB-9

Cada pin puede ser de entrada o de salida, teniendo una función específica cada uno de ellos. Las más importantes son:

Pin	Función
-----	---------

TXD	(Transmitir Datos)
RXD	(Recibir Datos)
DTR	(Terminal de Datos Listo)
DSR	(Equipo de Datos Listo)
RTS	(Solicitud de Envío)
CTS	(Libre para Envío)
DCD	(Detección de Portadora)

Figura 22. Descripción de los pines del conector serie

Las señales TXD, DTR y RTS son de salida, mientras que RXD, DSR, CTS y DCD son de entrada. La masa de referencia para todas las señales es SG (Tierra de Señal). Finalmente, existen otras señales como RI (Indicador de Llamada).

Numero de Pin		Señal	Descripción	E/S
En DB-25	En DB-9			
1	1	-	Masa chasis	-
2	3	TxD	Transmit Data	S
3	2	RxD	Receive Data	E
4	7	RTS	Request To Send	S
5	8	CTS	Clear To Send	E
6	6	DSR	Data Set Ready	E
7	5	SG	Signal Ground	-
8	1	CD/DCD	(Data) Carrier Detect	E
15	-	TxC(*)	Transmit Clock	S
17	-	RxC(*)	Receive Clock	E
20	4	DTR	Data Terminal Ready	S
22	9	RI	Ring Indicator	E
24	-	RTxC(*)	Transmit/Receive Clock	S

Figura 23. Descripción de los pines de los conectores DB-25 y DB-9

(*) = Normalmente no conectados en el DB-25

5.1.1 El puerto serie en la PC

La PC controla el puerto serie mediante un circuito integrado específico, llamado UART (Transmisor-Receptor-Asíncrono Universal). Normalmente se utilizan los siguientes modelos de este chip: 8250 (bastante antiguo, con fallos, solo llega a 9600 baudios), 16450 (versión corregida del 8250, llega hasta 115.200 baudios) y 16550A (con buffers de E/S). A partir de la gama Pentium, la circuitería UART de las placa base son todas de alta velocidad, es decir UART 16550A. De hecho, la mayoría de los módems conectables a puerto serie necesitan dicho tipo de UART.

Para controlar al puerto serie, la CPU emplea direcciones de puertos de E/S y líneas de interrupción (IRQ). El estándar de la PC llega hasta aquí, por lo que al añadir posteriormente otros puertos serie, se eligieron las direcciones 3E8 y 2E8 para COM3-COM4, pero las IRQ no están especificadas. Cada usuario debe elegir las de acuerdo a las que tenga libres o el uso que vaya a hacer de los puertos serie (por ejemplo, no importa compartir una misma IRQ en dos puertos siempre que no se usen conjuntamente, ya que en caso contrario puede haber problemas). Es por ello que últimamente, con el auge de las comunicaciones, los fabricantes de PCs incluyan un puerto especial PS/2 para el ratón, dejando así libre un puerto serie.

Mediante los puertos de E/S se pueden intercambiar datos, mientras que las IRQ producen una interrupción para indicar a la CPU que ha ocurrido un evento (por ejemplo, que ha llegado un dato, o que ha cambiado el estado de algunas señales de entrada). La CPU debe responder a estas interrupciones lo más rápido posible, para que dé tiempo a recoger el dato antes de que el siguiente lo sobrescriba. Sin embargo, las UART 16550A incluyen unos buffers de tipo FIFO, dos de 16 bytes (para recepción y transmisión), donde se pueden guardar varios datos antes de que la CPU los recoja. Esto también disminuye el número de interrupciones por segundo generadas por el puerto serie.

El RS-232 puede transmitir los datos en grupos de 5, 6, 7 u 8 bits, a unas velocidades determinadas (normalmente, 9600 bits por segundo o más). Después de la transmisión de los datos, le sigue un bit opcional *de paridad* (indica si el número de

bits transmitidos es par o impar, para detectar fallos), y después 1 o 2 bits de Stop. Normalmente, el protocolo utilizado es el 8N1 (que significa, 8 bits de datos, sin paridad y con 1 bit de Stop).

Una vez que ha comenzado la transmisión de un dato, los bits tienen que llegar uno detrás de otro a una velocidad constante y en determinados instantes de tiempo. Por eso se dice que el RS-232 es asíncrono por carácter y síncrono por bit. Los pines que portan los datos son RXD y TXD. Las demás se encargan de otros trabajos: DTR indica que el ordenador está encendido, DSR que el aparato conectado a dicho puerto está encendido, RTS que el ordenador puede recibir datos (porque no está ocupado), CTS que el aparato conectado puede recibir datos, y DCD detecta que existe una comunicación, presencia de datos.

Tanto el aparato a conectar como la PC (o el programa terminal) tienen que usar el mismo protocolo serie para comunicarse entre sí. Puesto que el estándar RS-232 no permite indicar en qué modo se está trabajando, es el usuario quien tiene que decidirlo y configurar ambas partes. Como ya se ha visto, los parámetros que hay que configurar son: protocolo serie (8N1), velocidad del puerto serie, y protocolo de control de flujo.

La velocidad del puerto serie no tiene por qué ser la misma que la de transmisión de los datos, de hecho debe ser superior. Por ejemplo, para transmisiones de 1200 baudios es recomendable usar 9600, y para 9600 baudios se pueden usar 38400 (o 19200).

En la figura 36 se observa el diagrama de transmisión de un dato con formato 8N1. El receptor indica al emisor que puede enviarle datos activando la salida RTS. El emisor envía un bit de START (nivel alto) antes de los datos, y un bit de STOP (nivel bajo) al final de estos.

El cable de conexión que se utiliza para conectar la PC con el mismo controlador es el que se presenta en la siguiente imagen en la cual se puede apreciar que se cruzan el pin 2 por el pin 3 y viceversa y se vinculan las mazas.

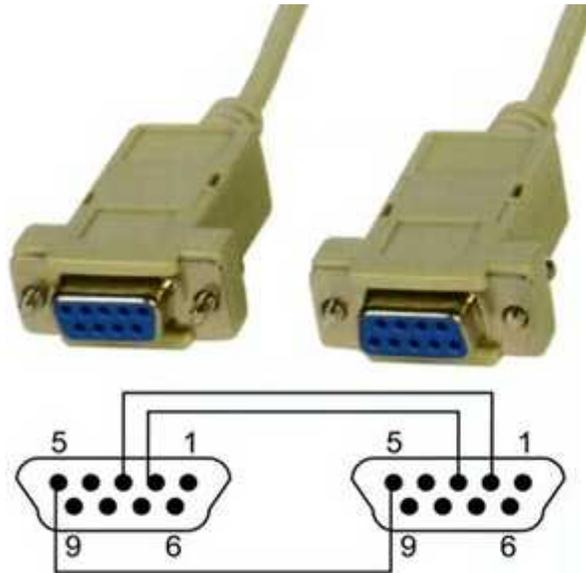


Figura 24. Cable de conexión RS-232

RESULTADOS OBTENIDOS

A través de la realización de un prototipo a escala, el cual se instaló en la ciudad de Concepción del Uruguay, el día 19 del mes de junio, se pudieron realizar mediciones de potencia sobre una carga determinada para obtener el rendimiento del seguidor solar con respecto a un panel fijo instalado en el mismo lugar.

Los resultados obtenidos fueron plasmados en el siguiente gráfico.

- PANEL SOLAR FIJO A 45° ORIENTADO HACIA EL ECUADOR

Se comparó al seguidor solar con respecto a un panel a 45° orientado hacia el Ecuador, obteniéndose la siguiente grafica en la cual se puede apreciar que si bien los picos están correlacionados son de distinta amplitud tanto en la mañana (8 hs a 11 hs) y como en la tarde (14 hs a 18 hs). Esto se debe a que sobre el panel que está en el seguidor solar incidía la radiación directa proveniente del Sol mientras que en el panel fijo era menor la incidencia de la radiación directa y la radiación difusa era la de mayor incidencia sobre este.

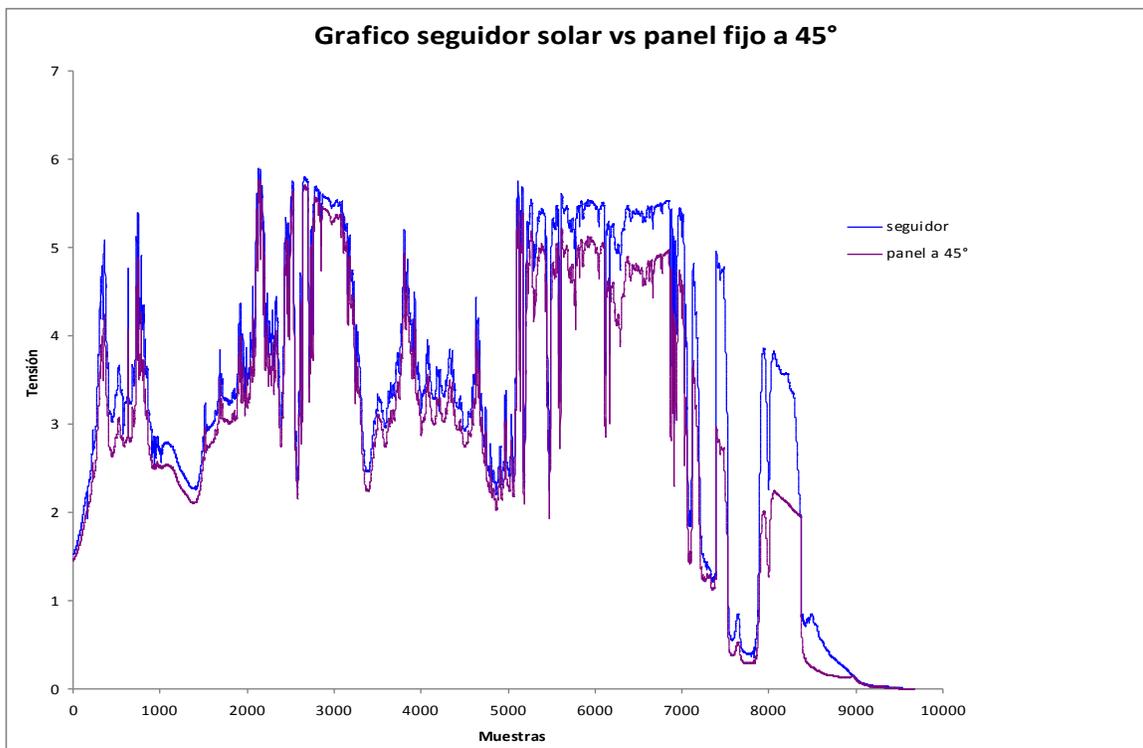


Figura 25. Gráfico Seguidor solar vs. Panel fijo a 45°

El rendimiento obtenido a través de las mediciones realizadas es del 25,87% con respecto al panel fijo orientado hacia el Ecuador.

EVALUACIÓN ECONOMICA

En este capítulo se tratará de los costos necesarios para la fabricación de un prototipo de seguidor solar de dos ejes para células fotovoltaicas.

Además se incluyen todos los detalles de los costos de mano de obra.

1. Gastos principales

En la siguiente tabla se resumen los gastos principales para la fabricación del seguidor solar sin incluir los paneles fotovoltaicos, la estructura del seguidor ni los motores del mismo ya que estos elementos dependen de la necesidad del usuario y son independientes del sistema electrónico de seguimiento solar.

Se considera para esta tabla una cotización del dólar 1Uss = \$ 5,30.

	Monto en US\$	Monto en S
Elementos electrónicos	59,5	315,35
Elementos eléctricos	15	79,5
Trabajos de terceros	20	106
Mano de obra (ingeniero)	5000	26500
Varios	25	132,5
imprevistos		7866,65
Inversión total	6603	35000

Tabla 1.Gastos principales

Detalles de los gastos principales

- Elementos electrónicos

ITEM	EQUIPO	DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (US\$)
1	microcontrolador	microcontrolador pic16f877A	1	7
2	Display	Display LCD 16x2	1	7
3	Integrado calendario	Integrado DS1307	1	3
4	Integrado	ULN 2803	1	0,5
5	Programadora de pic usb		1	30
6	Integrado	Max 232	1	0,5
7	Conector	conector Db 9	2	0,5
8	Cable conector	Cable de conexión Db 9	1	0,5
9	Puente rectificador	Puente rectificador de 4 A	1	1
10	Encoger	Encoger angular incremental	2	3
11	Cristal	Cristal de cuarzo de 4Mhz	1	0,25
12	cristal	Cristal de cuarzo de 32,768Khz	1	0,25
13	capacitor	Capacitores de varias medidas	20	2

14	resistencia	Resistencias de varias medidas	10	1
15	diodos	1n4001	2	0,25
16	Conector	Pines	40	0,25
17	Conector		40	0,25
18	Conector	Conector Db15	1	0,5
19	potenciómetro	Potenciómetro de 10k ohm	1	0,25
20	pulsador	Pulsador normal cerrado	2	0,25
21	interruptor	Interruptor llave	1	0,25
22	estaño		5 metros	1
Costo total (US\$)				59,5
Costo total (\$)				315,35

Tabla 2. Elementos electrónicos

- **Elementos eléctricos**

ITEM	EQUIPO	DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (US\$)
1	transformador	Transformador de 220/12 V 1A	1	10
2	Cable	cable de 1 mm ²	5 metros	2
3	Cable	cable de 2 mm ²	2 metros	3
Costo total (US\$)				15
Costo total (\$)				79,5

Tabla 3. Elementos eléctricos

- **Trabajos de terceros**

ITEM	EQUIPO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (US\$)
1	Placa electrónica	Elaboración de la placa electrónica	1	20
Costo total (US\$)				20
Costo total (\$)				106

Tabla 4. Trabajos de terceros

- **Varios**

ITEM	EQUIPO	DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (US\$)
1	Caja plástica	Caja plástica estanca	1	10
2	Caja metálica	Caja metálica estanca	1	15
Costo total (US\$)				25
Costo total (\$)				132,5

Tabla 5. Varios

2. Evaluación de la inversión

De mediciones realizadas sobre el seguidor solar se pudo determinar que el consumo de energía de la parte electrónica es de 1 watt/hora y el rendimiento del sistema de seguimiento es de aproximadamente 25 % más con respecto al a un panel fijo con una inclinación determinada .

El consumo de los motores para un seguidor solar de dos ejes es de 1kw para una potencia máxima instalada de 36Kwp, brindado por la empresa GRUPO CLAVIJO, Navarra, España.

La siguiente es una tabla que corresponde a la radiación global media diaria y las horas picos solares en San Miguel (Buenos Aires) sobre un plano orientado hacia el norte e inclinado hacia el ecuador 45°, para todos los meses del año.

Mes	Radiación global media Ht ($\frac{MJ}{m^2}$)	Horas picos solares HPS
Enero	19,1	5,3
Febrero	18,6	5,2
Marzo	16,8	4,7
Abril	12,9	3,6
Mayo	11,8	3,3
Junio	10,6	2,9
Julio	11,3	3,1
Agosto	13,6	3,8
Septiembre	16,3	4,5
Octubre	17,2	4,8
Noviembre	18	5,0
Diciembre	18,7	5,2

Tabla 6. Radiación global media diaria y horas picos solares en San Miguel (Buenos Aires).

Energía total generada (ETG) por los paneles en un año:

Mes	Horas picos solares HPS	Energía total generada HTG (kW/hora/mes)
Enero	5,3	5914,8
Febrero	5,2	5241,6
Marzo	4,7	5245,2
Abril	3,6	3888
Mayo	3,3	3682,8
Junio	2,9	3132
Julio	3,1	3459,6
Agosto	3,8	4240,8
Septiembre	4,5	4860
Octubre	4,8	5356,8
Noviembre	5	5400
Diciembre	5,2	5803,2
	suma total	56224,8

Tabla 7. Horas picos solares y Energía total generada.

Energía total generada por un sistema fijo al año es de 56224,8 kW/año.

Con un sistema de seguimiento solar se produce un aumento de:

Mejora de la ETG con el seguidor = $56224,8 \text{ kW/año} * 0,25$

Mejora de la ETG con el seguidor = $14056,2 \text{ kW/año}$

Consumos generados por los motores y la electrónica general:

Consumo de los motores = $1 \text{ kW/hora} * 1 \text{ horas diarias} * 365 \text{ días}$

Consumo de los motores = 365 kW/año

Consumo de la electrónica = $1 \text{ W/hora} * 24 \text{ horas} * 365 \text{ días}$

Consumo de la electrónica = 8760 W/año

Consumo total = 373,76 kW/año

Total de recuperada por el panel solar = 13682,44 kW/año

Dinero recuperado/año = 13682,44 kW/año * 0,73 \$/kW

Dinero recuperado/año = \$ 9988,18

Se considera el precio del kW a 0,73 \$/kW.

Para la evaluación de VAN y la TIR se emplean las siguientes formulas según [29] BREALEY, et al (2006):

- VAN

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$$

V_t = Representa el flujo de caja, en este caso el aumento de la energía generada por periodo de tiempo (años).

I_0 = Representa la inversión inicial.

k = Tasa de descuento, generalmente se toma 0,1(10%).

t = Periodos de tiempo entre los momentos actual y futuro

Condiciones:

Valor	Significado	Decisión a tomar
VAN > 0	La inversión produciría ganancias por encima de la rentabilidad exigida (r)	El proyecto puede aceptarse
VAN < 0	La inversión produciría ganancias por debajo de la rentabilidad exigida (r).	El proyecto debería rechazarse
VAN = 0	La inversión no produciría ni ganancias ni pérdidas	Dado que el proyecto no agrega valor monetario por encima de la rentabilidad exigida (r), la decisión debería basarse en otros criterios, como la obtención de un mejor posicionamiento en el mercado u otros factores.

Tabla 8. VAN. Condiciones

Fuente: [29] BREALEY, et al (2006)

AÑO	FLUJO DE DINERO
0	-35000
1	10000
2	10000
3	10000
4	10000
5	10000
6	10000
7	10000
8	10000
9	10000
10	10000

VAN a 5 años	\$ 2.643,52
--------------	-------------

VAN a 10 años	\$ 24.041,52
---------------	--------------

Tabla 9. Tabla del VAN

- TIR

La TIR es el tipo de descuento que hace igual a cero el VAN.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_F t}{(1 + TIR)^t} - I_0 = 0$$

Condiciones:

Valor	Decisión a tomar
TIR > 0	Se aceptara el proyecto. La razón es que el proyecto da una rentabilidad mayor que la rentabilidad mínima requerida (el coste de oportunidad).
TIR = 0	El proyecto es indiferente.
TIR < 0	Se rechazara el proyecto. La razón es que el proyecto da una rentabilidad menor que la rentabilidad mínima requerida.

Tabla 10. TIR. Condiciones

FUENTE: [29] BREALEY. Et al (2006).

AÑO	FLUJO DE DINERO
0	-35000
1	10000
2	10000
3	10000
4	10000
5	10000
6	10000
7	10000
8	10000
9	10000
10	10000

TIR a 5 años	13%
--------------	-----

TIR a 10 años	26%
---------------	-----

Tabla 11. Tabla del TIR

De acuerdo a la evaluación económica a través del VAN y el TIR se puede apreciar que el proyecto es viable con una tasa de descuento del 10% y una amortización en un total de 5 años con un saldo positivo de \$ 2643.

CONCLUSION

El presente trabajo final de grado ha permitido desarrollar un dispositivo económico, con elementos electrónicos que se encuentran en el país que permite aumentar significativamente el rendimiento de los paneles fotovoltaicos.

A través de un análisis económico realizado en este trabajo se puede apreciar a primera vista que el proyecto final es viable con una buena rentabilidad a pesar de que no es un proyecto netamente económico ya que posee una faceta ecológica.

Debido a la economía de este dispositivo sería factible de emplazar en instalaciones de pequeñas y medianas potencia ya sean industriales o domiciliarias.

En el sur de Entre Ríos, zona de islas, se instalaron paneles fotovoltaicos para proveer de energía eléctrica a los residentes de la zona, los cuales no tenían acceso a este tipo de servicio, estos paneles no cuentan con seguidores solares lo cual disminuye la potencia eléctrica que disponen los usuarios. Con este dispositivo dichas personas pueden aumentar la potencia que tienen instalada sin incrementar el número de paneles y con pequeñas adaptaciones en la estructura en la cuales están empotrados los paneles.

Este proyecto dejó al descubierto la necesidad de determinar las horas picos solares promedio por mes para determinar la energía promedio mensual que es capaz de generar dicho panel en el lugar en el que está emplazado. Esto determinó que en el Grupo de Investigación Sobre Automatización (GISA) de la Facultad Regional de Concepción del Uruguay está empezando a realizar mediciones para poder en un futuro trabajar con datos actuales y de la región para poder realizar cálculos de instalaciones solares.

BIBLIOGRAFIA

Beck R, Hilbrecht H, Reinsch K y Völken P, 1995 – Solar Astronomy Handbook - Willamann-Bell Inc.

Gay CF, Yerkes JW y Wilson JH, 1982. Performance advantages of two-axis tracking for large flat-plate photovoltaic energy systems – 16th Photovoltaic Specialists Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1368-1371

Kawajiri K, Oozeki T y Genchi Y, 2011. Effect of Temperature on PV Potential in the World. Environmental Science and Technology, 45 (20), pp. 9030–9035. DOI: 10.1021/es200635x

King DL, Boyson WE y Kratochvil JA, 2002. Analysis of factors influencing the annual energy production of photovoltaic systems – 29th Photovoltaic Specialists Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1356-1361

Revista Ciencia Hoy en línea - www.cienciahoy.org.ar/hoy06/estructurasol.htm

Sánchez China C, “El Sol, nuestra estrella.” – Publicación electrónica: www.galeon.com/casanchi/ast/sol2.htm

Sánchez China C, “La actividad del Sol. El ciclo solar” – Publicación electrónica: <http://personales.ya.com/casanchi/ast/solar01.htm>

Sol, Wikipedia - http://es.wikipedia.org/wiki/Disco_solar

Saravia LR, 2007. La energía solar en la Argentina – Petrotecnia

Microchip Technology Inc. - <http://www.microchip.com/>