

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

### DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SEGUIDOR SOLAR PARA EL CONTROL ELECTRÓNICO DE UN REFLECTOR SCHEFFLER

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Electrónico**, que presenta el bachiller:

**Frank Roger Loayza Ochoa**

**ASESOR: A. Carlos Alcócer García**

Lima, marzo del 2012

## RESUMEN

Los diversos acontecimientos a nivel mundial, tales como el calentamiento global, la contaminación, escasez de recursos no renovables, la gran demanda energética, o simplemente aquellos lugares que no poseen suministro eléctrico, ya sea por razones geográficas o por elevados costos de instalación, motivan a miles de personas y entidades empresariales por la búsqueda de alternativas energéticas limpias y eficientes tales como la energía solar. El Perú, gracias a su situación geográfica, es uno de los países con mayor capacidad de aprovechamiento de este tipo de energía.

Para captar la radiación solar se utilizan concentradores solares, pero la potencia y orientación de esta varía según el día del año, la hora, las condiciones atmosféricas y la latitud del lugar de posición del concentrador solar. Por estos cambios en la orientación, la energía solar obtenida por concentradores con seguidores solares es superior a la obtenida por concentradores fijos.

Esta tesis tiene como objetivo principal diseñar e implementar un seguidor solar para el control electrónico de un reflector parabólico tipo Scheffler. Este reflector solar, construido por el GRUPO PUCP, tiene como fin cocinar con la energía del Sol en zonas rurales de la manera más cómoda, barata y eficiente posible.

El estudio se estructuró en cuatro capítulos. En el capítulo I se hace una introducción a los conceptos básicos sobre energía solar, además de la descripción y necesidad del tema en estudio. En el capítulo II se estudia el estado del arte, los antecedentes, y todo lo existente en materia de seguidores solares, también se plantean los Objetivos generales y específicos. En el capítulo III se realiza la selección del método de seguimiento y la implementación del seguidor solar, gobernado por un microcontrolador PIC sobre un actuador hecho con un motor CC que posiciona el concentrador solar realizando un seguimiento de la trayectoria del sol, con respecto al plano terrestre. Por último en el capítulo IV se efectúa un análisis final de los resultados, asimismo se presentan las conclusiones y sugerencias del estudio realizado para trabajos futuros en esta materia.



**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO**

Título : Diseño e implementación de un seguidor solar para el control electrónico de un reflector Scheffler.  
Área : Electrónica # 978  
Asesor : Carlos Alcócer García  
Alumno : Frank Roger Louyza Ochoa  
Código : 20037117  
Fecha : 17/10/2011



**Descripción y Objetivos**

Los diversos sucesos a nivel mundial, como el calentamiento global, la contaminación, escasez de recursos no renovables, la demanda energética, o lugares que no poseen suministro eléctrico, ya sea por geografía o por altos costos de instalación, motivan a las personas a buscar alternativas energéticas limpias tales como la energía eólica y energía solar. Ésta última se usa para generar energía térmica o eléctrica, la cual requiere de nuevas tecnologías y equipos de comprobación y homologación para el desarrollo de nuevos sistemas solares.

En este contexto, el horno solar es un prototipo de generación térmica que aprovecha la energía del sol. Este dispositivo emplea al concentrador parabólico, que usa la geometría de la parábola para concentrar los rayos solares que le llegan en su foco. La incidencia de los rayos solares sobre el concentrador difiere en su perpendicularidad a lo largo del día y así se reduce su eficiencia. Se corrige usando un seguidor solar que lo orienta a la posición del Sol.

Esta tesis tiene como objetivo principal diseñar e implementar un seguidor solar para el control electrónico, basado en microprocesador, de un reflector parabólico tipo Scheffler. Este reflector, construido por el GRUPO PUCP, tiene como fin cocinar con la energía solar en zonas rurales de manera eficiente; sin embargo, usaba un control no confiable y sencillo.

Para alcanzar este objetivo se analizará la información necesaria relacionada con el tema en estudio y se utilizará los conceptos teóricos y prácticos que se requieran para su desarrollo. Se seleccionará uno de los métodos de seguimiento solar que más se ajuste a la estructura del reflector, y se diseñará un circuito de control, basado en microprocesador, que se encargue de generar las señales de control necesarias que requiere el actuador para mover el reflector. Por último, se realizará pruebas para comprobar y validar su funcionamiento.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

Dr. Ing. BENJAMÍN CASTAÑEDA APHAN  
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica



## TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Diseño e implementación de un seguidor solar para el control electrónico de un reflector Scheffler.

### Índice

#### Introducción

1. Energía Solar: una Alternativa Energética ante la problemática de inclusión social.
2. Tecnologías aplicadas a los sistemas de seguimiento solar.
3. Diseño del seguidor solar.
4. Pruebas finales y comparación de resultados.

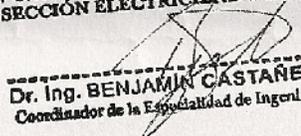
#### Conclusiones

#### Recomendaciones

#### Bibliografía

#### Anexos

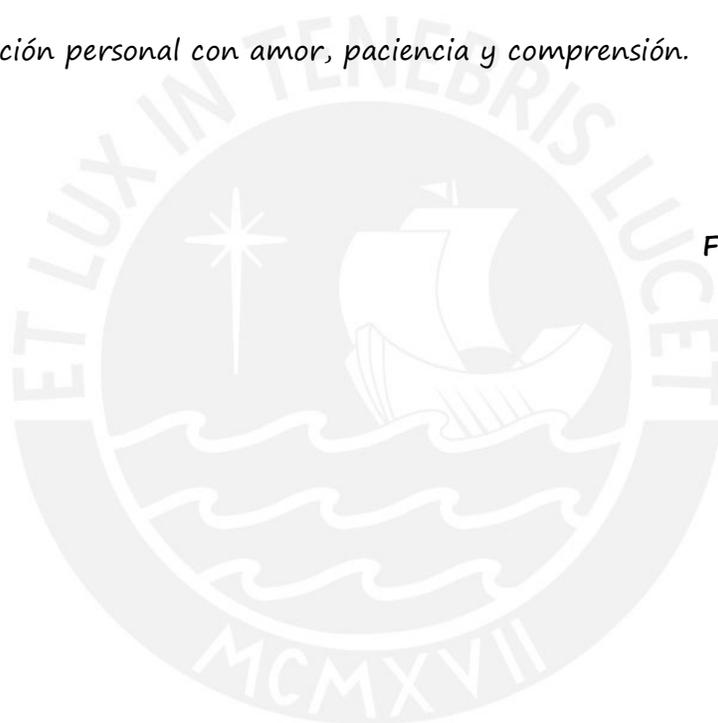
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

  
Dr. Ing. BENJAMÍN CASTAÑEDA APHAN  
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

## DEDICATORIA:

*Dedico este gran esfuerzo de mi vida, a mis Padres, por su gran apoyo y colaboración durante todo el tiempo que impulsaron mi superación personal con amor, paciencia y comprensión.*

**Frank Loayza**



**AGRADECIMIENTOS:**

Agradezco a mi Padre, por haberme dado la oportunidad de estudiar esta carrera y apoyarme abnegadamente durante toda mi vida.

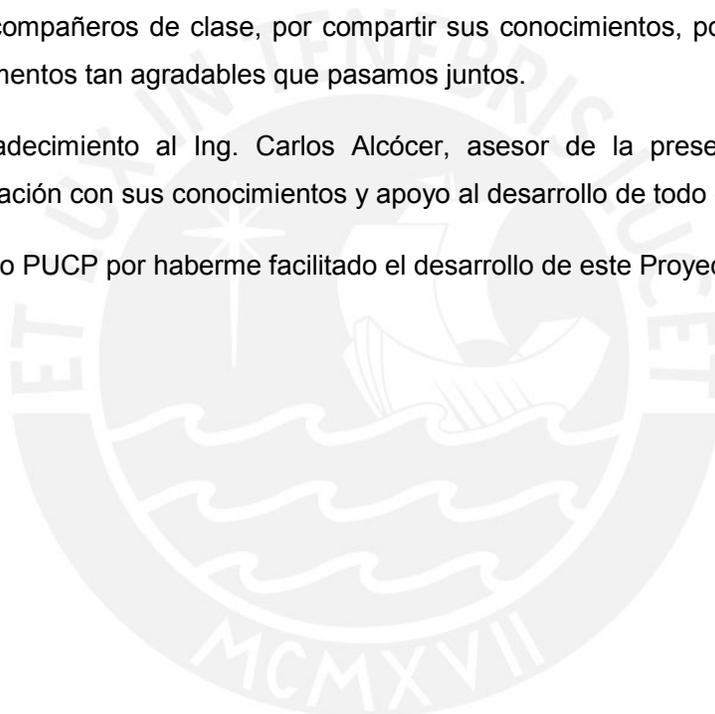
A mi Madre por su cariño incondicional y consejo siempre oportuno que siempre me lleno de fuerza para concluir mis metas.

A mis hermanos, por su alegría y cariño, por conformar esa maravillosa familia que tenemos y ha sido el mejor respaldo y motivación.

A mis compañeros de clase, por compartir sus conocimientos, por su ayuda y por los momentos tan agradables que pasamos juntos.

Mi agradecimiento al Ing. Carlos Alcócer, asesor de la presente tesis, por la colaboración con sus conocimientos y apoyo al desarrollo de todo el Proyecto.

Al Grupo PUCP por haberme facilitado el desarrollo de este Proyecto.



## ÍNDICE

<b><u>INTRODUCCIÓN</u></b> .....	1
----------------------------------	---

### **CAPÍTULO 1: ENERGÍA SOLAR: UNA ALTERNATIVA ENERGÉTICA ANTE LA PROBLEMÁTICA DE INCLUSIÓN SOCIAL**

1.1 Historia y evolución de la Energía Solar.....	2
1.2 Radiación Solar.....	3
1.2.1 Aspectos físicos de la radiación solar.....	3
1.2.2 Influencia del ángulo de incidencia.....	4
1.2.3 La radiación solar en el Perú.....	4
1.2.4 Efectos de la radiación al incidir sobre los materiales.....	5
1.3 Concentradores Solares.....	6
1.3.1 Definición.....	6
1.3.2 Reflectores.....	6
1.3.2.1 Reflectores Parabólicos.....	7
1.3.2.2 Reflectores Scheffler.....	8
1.4 Declaración de la problemática.....	10
1.5 Síntesis y consecuencias.....	11

### **CAPÍTULO 2: TECNOLOGÍAS APLICADAS A LOS SISTEMAS DE SEGUIMIENTO SOLAR**

2.1 Estado del arte.....	12
2.1.1 Presentación del asunto de estudio.....	12
2.1.2 Estado de investigación.....	12
2.1.2.1 Sistemas de seguimiento solar aceptados por el IEEE.....	13
2.1.2.2 Seguidores Solares disponibles en el mercado.....	15
2.2 Conceptualizaciones Generales.....	17
2.3 Modelo teórico.....	18
2.4 Objetivos.....	20
2.4.1 Objetivos General.....	20
2.4.2 Objetivos Específicos.....	20

### **CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL SEGUIDOR SOLAR**

3.1 Antecedentes.....	21
3.2 Definición del método.....	22
3.3 Diagrama del sistema de control de posición.....	23
3.4 Cálculo de la posición solar.....	24
3.5 Diseño del sistema de control.....	26
3.6 Diseño electrónico.....	28
3.6.1 Esquemático.....	28
3.6.2 Partes del circuito.....	29
3.6.2.1 Conexión del microcontrolador.....	29
3.6.2.2 Circuito de Reset externo.....	30
3.6.2.3 Conexión del Encoder.....	30
3.6.2.4 Circuito del oscilador de frecuencia.....	31
3.6.2.5 Circuito del reloj en tiempo real.....	31
3.6.2.6 Conexión de la Memoria EEPROM.....	33
3.6.2.7 Circuito para el Display de Cristal Líquido (LCD).....	34
3.6.2.8 Circuito para el Teclado matricial de 4x4 teclas.....	35

3.6.2.9	Circuito de alimentación.....	36
3.6.2.10	Etapa de potencia.....	37
3.7	Desarrollo del programa.....	39
3.7.1	MikroPascal para PIC.....	39

**CAPÍTULO 4: PRUEBAS FINALES Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS**

4.1	Consideraciones preliminares. ....	40
4.2	Pruebas del sistema.....	40
4.2.1	Problemas encontrados durante la etapa de pruebas.....	42
4.2.1.1	Problema con el límite de fin de carrera.....	43
4.3	Análisis de Resultados.....	43
4.4	Observaciones.....	44

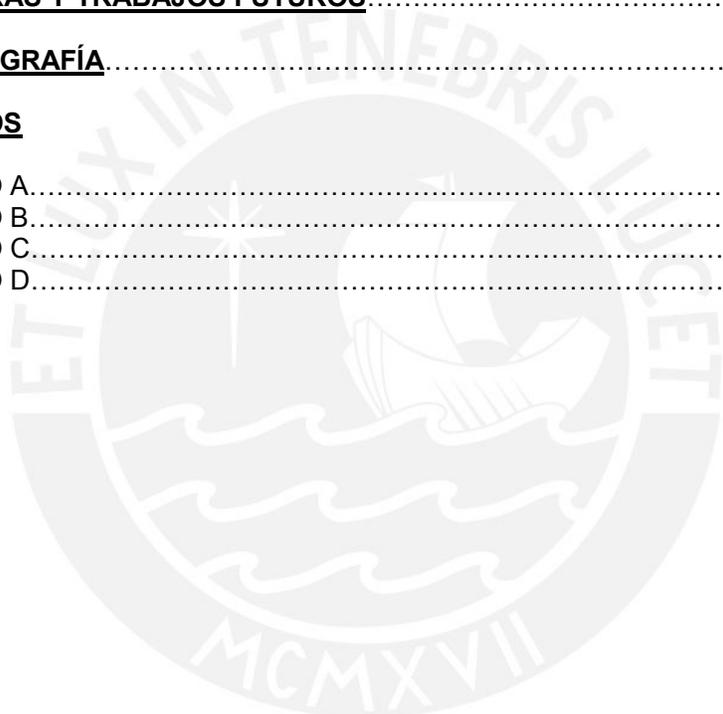
<b><u>CONCLUSIONES</u></b> .....	45
----------------------------------	----

<b><u>MEJORAS Y TRABAJOS FUTUROS</u></b> .....	46
--	----

<b><u>BIBLIOGRAFÍA</u></b> .....	48
----------------------------------	----

**ANEXOS**

ANEXO A.....	i
ANEXO B.....	iii
ANEXO C.....	v
ANEXO D.....	xxii



## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

FIGURA 1.1: Espectro Solar.....	3
FIGURA 1.2: Superficies reflectantes ordenadas.....	6
FIGURA 1.3: Superficies reflectantes orientadas con un ángulo de incidencia..... yí igual al ángulo de reflexión yf.....	7
FIGURA 1.4: Parábola.....	8
FIGURA 1.5: Paraboloide.....	9
FIGURA 1.6: Variación del ángulo de incidencia de la radiación.....	9

### CAPÍTULO 2

FIGURA 2.1: Inclinación del eje de rotación terrestre.....	13
FIGURA 2.2: Eclíptica del Sol en invierno y verano.....	14
FIGURA 2.3: Representación Gráfica del Modelo.....	19

### CAPÍTULO 3

FIGURA 3.1: Eje de elevación del reflector, 3 elevaciones durante el año.....	21
FIGURA 3.2: Estructura mecánica del reflector.....	22
FIGURA 3.3: Diagrama conceptual del sistema de control de posición.....	23
FIGURA 3.4: Diagrama de bloques de interconexión física.....	23
FIGURA 3.5: Posición del sol.....	25
FIGURA 3.6: Diagrama de flujo.....	27
FIGURA 3.7: Diagrama esquemático del hardware de control.....	28
FIGURA 3.8: Configuración de los pines del PIC16F877.....	29
FIGURA 3.9: Reset externo.....	30
FIGURA 3.10: Conexionado del encoder.....	31
FIGURA 3.11: Circuito del oscilador de frecuencia.....	31
FIGURA 3.12: Circuito típico de operación del DS1307.....	32
FIGURA 3.13: Pines de configuración del DS1307.....	32
FIGURA 3.14: Circuito del reloj en tiempo real.....	33
FIGURA 3.15: Memoria EEPROM 24LC512.....	33
FIGURA 3.16: Circuito de la Memoria EEPROM.....	34
FIGURA 3.17: Circuito del LCD.....	35
FIGURA 3.18: Esquema de conexionado del teclado.....	36
FIGURA 3.19: Conexión del teclado matricial con el PIC.....	36
FIGURA 3.20: Configuración típica del 7805.....	37
FIGURA 3.21: Esquema eléctrico del puente H.....	38

### CAPÍTULO 4

FIGURA 4.1: Reflector Scheffler de 2,7m <sup>2</sup> .....	40
FIGURA 4.2: Circuito de control del seguidor solar.....	41
FIGURA 4.3: Instalación del circuito de control.....	41
FIGURA 4.4: Pantalla principal del circuito de control.....	42
FIGURA 4.5: Luz reflejada en el foco.....	42

## ÍNDICE DE TABLAS

**CAPÍTULO 3**

TABLA 3.1:	Pines del DS1307 y su descripción.....	32
TABLA 3.2:	Pines de la memoria serial EEPROM 24LC512 y su función.....	33
TABLA 3.3:	Descripción de los Pines del LCD LM016L.....	34



## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la humanidad a través de la historia está ligado de manera muy significativa al tipo de energía utilizada y sus formas de aprovechamiento. El modelo energético actual a base de combustibles fósiles como fuente, genera un impacto ambiental y no es sustentable debido a que, para satisfacer las demandas de energía actuales, compromete la integridad de las futuras generaciones. Por esto es necesario establecer un nuevo modelo energético que sea sustentable en el que las energías renovables sean el eje de desarrollo, pues este tipo de energías tienen un ciclo de regeneración mayor al de consumo, por lo que son inagotables.

Este proyecto usa la energía solar que se utiliza para generar energía térmica o eléctrica, pero su aprovechamiento requiere de nuevas tecnologías y de equipos de comprobación y homologación para el desarrollo de nuevos sistemas, con el objeto de mejorar la eficiencia y máximo aprovechamiento.

En este contexto, el horno solar es un prototipo experimental de generación térmica que aprovecha la energía del sol. Este dispositivo tiene como parte fundamental al concentrador parabólico, que utiliza la geometría de la parábola para poder concentrar los rayos solares que le llega en su foco. Pero la incidencia de los rayos solares sobre este concentrador difiere en su perpendicularidad a lo largo del día y por lo tanto se ve reducida su eficiencia. Es posible corregir esta situación utilizando un seguidor solar que orienta al concentrador a la posición del Sol, siguiendo su trayectoria aparente ocasionada por el movimiento rotacional de la Tierra.

Esta tesis tiene como objetivo principal diseñar e implementar un seguidor solar para el control electrónico, basado en microprocesador, de un reflector parabólico tipo Scheffler. Este reflector solar, que ya fue construido por el GRUPO PUCP, tiene como finalidad poder cocinar con la energía del Sol en zonas rurales de la manera más cómoda, barata y eficiente posible; sin embargo, utilizaba un sistema de control no confiable y sencillo.

Para este fin, se analiza la información relacionada con el tema en estudio y se utiliza los conceptos teóricos y prácticos que se requiere para su desarrollo. Se selecciona uno de los métodos de seguimiento solar, dentro de la gama existente, y se diseñará un circuito de control, basado en microprocesador, que se encargue de generar las señales de control necesarias que requiere el actuador para mover el reflector. Por último, se realizará pruebas para comprobar y validar su funcionamiento.

## CAPÍTULO 1

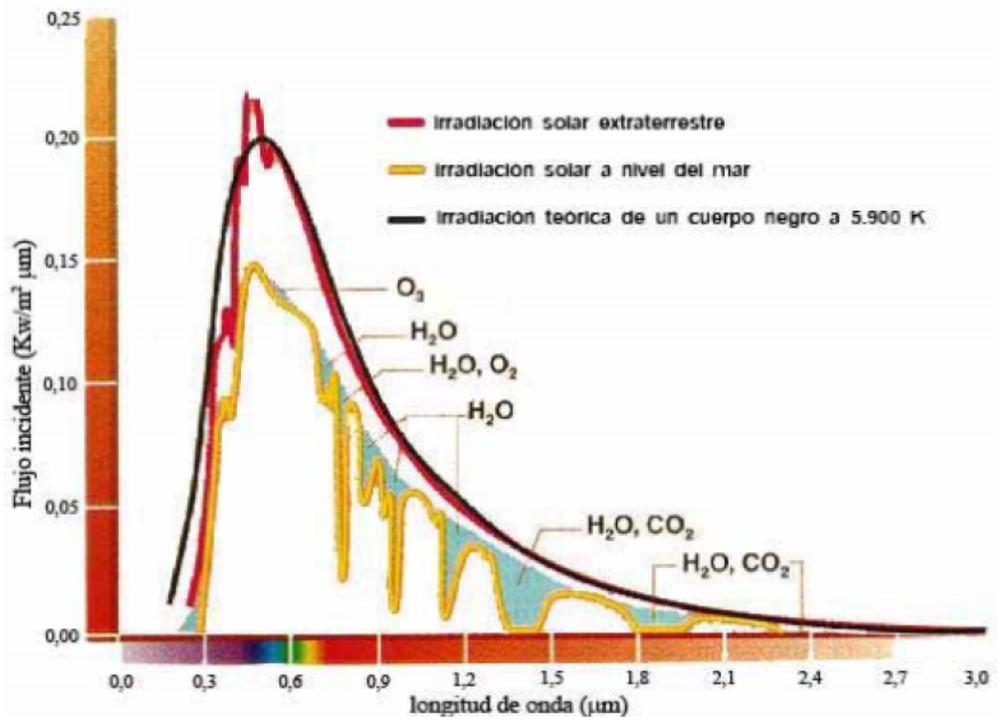
### **ENERGÍA SOLAR: UNA ALTERNATIVA ENERGÉTICA ANTE LA PROBLEMÁTICA DE INCLUSIÓN SOCIAL**

#### **1.1 Historia y evolución de la energía solar**

La energía solar, como bien dice su nombre, proviene del Sol, astro que nos ha iluminado por más de cinco mil millones de años, y además es la principal fuente natural de energía que ha utilizado el hombre desde los tiempos más remotos. Su luz y calor pueden ser transformados en otros tipos de energía.

A pesar de que la idea de utilizar el Sol como fuente energética es muy antigua, el hombre se vio limitado a esto, por millones de años, debido al bajo nivel térmico. Los primeros usos, según cuenta la historia, datan de la antigua Grecia, cuando Sófocles propuso la construcción de las viviendas en relación a la posición del sol, y el sabio Arquímedes utilizó espejos solares para incendiar la flota enemiga, idea que perduró en los siglos posteriores utilizándolos en la quema de árboles, fundición de metales, entre otros; técnica que se perfeccionó con Lavoisier, quien creó el primer "horno solar", empleado para fundir metales. En el siglo XIX la conversión de la energía solar en otras formas de energía, fue enfocada para alimentar las máquinas de vapor, como también en la destilación de agua para su potabilización. Años más tarde el Francés Pifre, creó la primera máquina basada en la conversión de ésta energía, máquina destinada a la industria de la Imprenta.

Así fue, con el transcurso de los años, que la energía solar fue cobrando más campo en el ámbito energético, ya que con el desgaste de las energías fósiles (no renovables), el hombre ha ido en busca de nuevas opciones, ya que, el Sol no ha vivido la mitad de lo esperado, y en un año genera cinco mil veces más energía de la que necesitamos. [1]



1000 W/m<sup>2</sup> (de los cuales el 3% es radiación ultravioleta, 57% luz visible y el 40% radiación infrarroja), mientras que en días cubiertos puede llegar a 60 W/m<sup>2</sup>.

A partir de estos fenómenos podemos clasificar a la radiación solar en:

- **Radiación directa:** Es la proveniente del disco solar sin sufrir variaciones en su dirección original. Se caracteriza porque produce sombra y puede concentrarse mediante lentes o redirigirse por medio de espejos.
- **Radiación difusa:** Es la proveniente de cualquier dirección del cielo, exceptuando el disco solar. No produce sombras ni puede enfocarse con instrumentos ópticos.

A la suma de ambas se la conoce como radiación global. La distribución de la radiación entre directa y difusa depende de las condiciones de la atmósfera. En días muy claros, la radiación directa puede llegar a ser del 85%, mientras que en días cubiertos la radiación difusa supone el 100% de la radiación global.

### 1.2.2 Influencia del ángulo de incidencia

El ángulo de incidencia es el formado por la normal a la superficie y la dirección de propagación de la radiación solar. Éste ángulo influye en dos aspectos:

- La radiación solar es menos intensa cuando el ángulo de incidencia es mayor. Al mediodía, cuando los rayos solares caen perpendicularmente a la superficie terrestre (su ángulo de incidencia es nulo) son más intensos que al atardecer (ángulo de incidencia máximo).
- La cantidad de atmósfera que atraviesa la radiación también depende del ángulo de incidencia. [2]

### 1.2.3 La radiación solar en el Perú

El Perú está considerado entre los 6 países con mayor incidencia de energía solar en el planeta. Al encontrarse entre el paralelo 0° 08' Latitud Norte y 18° 13' Latitud Sur, dentro de los trópicos, dispone de energía solar con poca variación anual, en comparación con latitudes medias y altas.

Los valores extremos de radiación solar, son en promedio de 340 y 150 W/m<sup>2</sup> durante los meses de verano e invierno, respectivamente; esto es ignorando la presencia de la capa atmosférica. Esta poca variación se atribuye al hecho que en estas latitudes los rayos solares son casi perpendiculares a la superficie terrestre

durante todo el año, dando lugar a una máxima incidencia de la radiación solar por unidad de área y tiempo.

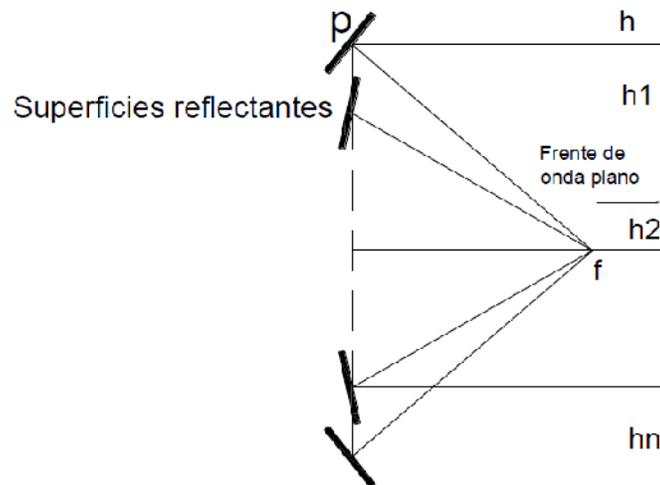
La presencia de la atmósfera reduce considerablemente la radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra, puesto que la atmósfera, en función a sus constituyentes gaseosos y aerosoles presentes en ella, tiene la capacidad de absorber, dispersar y reflejar la radiación solar. Así por ejemplo, las cifras antes citadas, se reduce aproximadamente a 240 y 100 W/m<sup>2</sup>, si se considera que la atmósfera transmite solo un 70% de la radiación solar. La cantidad de radiación transmitida por la atmósfera es menor si mayor es la concentración de Ozono, vapor de agua, dióxido de carbono y aerosoles en la atmósfera. La concentración y cantidad de los 3 últimos disminuye con la altitud; por esta razón en el Perú, debido a su orografía la radiación solar incidente aumenta considerablemente en la Sierra peruana. Esta región se encuentra principalmente entre los 2000 y 3000 metros de altitud y ocupan un 30 % del territorio nacional. En las zonas de mayor altitud; como la Meseta Titicaca y las Pampas de Junín, la radiación incidente es mucho mayor.

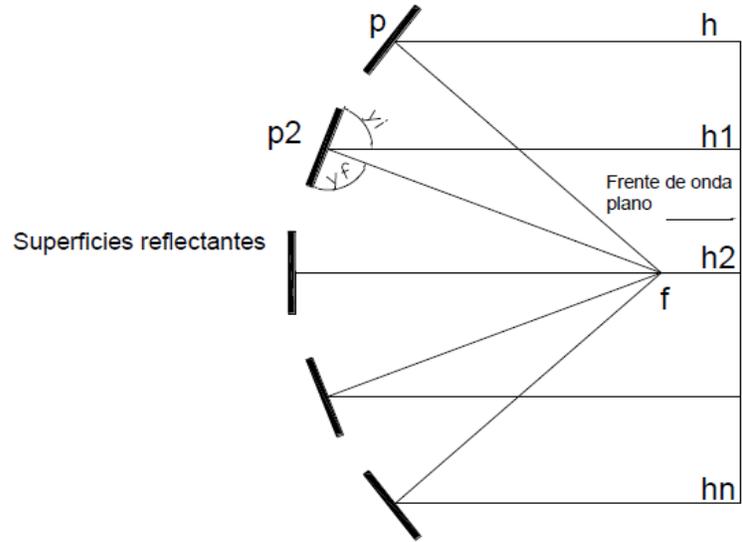
La intensidad y cantidad de radiación solar incidente sobre la superficie es también controlada por la clase y cantidad de nubes presentes durante el día, y aquellas predominantes durante el año. En la costa peruana, específicamente en Pisco - Ica y Costa Norte, el cielo está despejado casi todo el año permitiendo una mayor incidencia de radiación solar. En el resto de la costa baja, la radiación solar incidente aumenta marcadamente de invierno a verano por efectos estacionales y la disminución de la nubosidad. En la sierra ceja de selva, la nubosidad es mínima o nula en el invierno y la cantidad de vapor de agua es muy pequeña. Las nubes predominantes en la Sierra y Selva son de corta vida durante el verano, lo cual no disminuye mucho la radiación incidente sobre la superficie. [3]

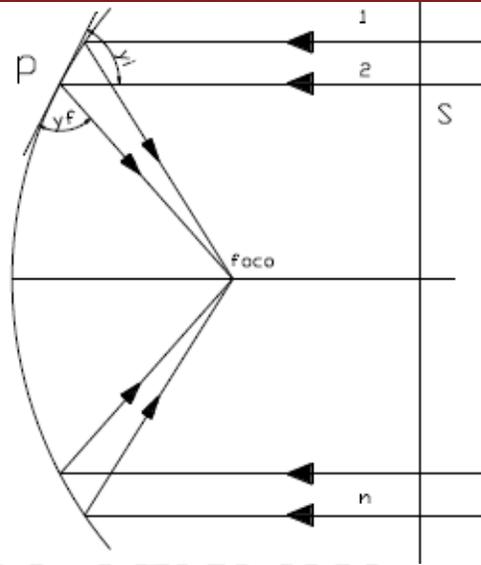
#### 1.2.4 Efectos de la radiación al incidir sobre los materiales

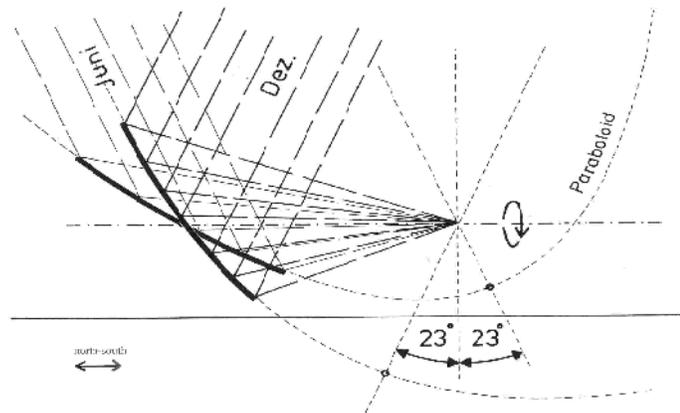
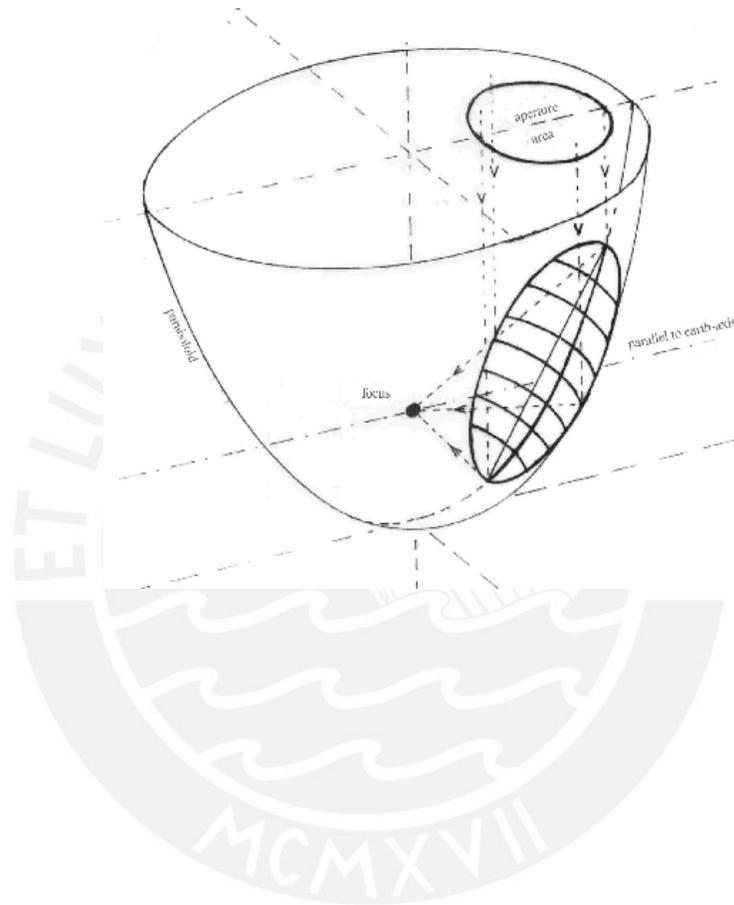
Cuando la radiación llega a un material, se producen tres efectos:

- **Absorción:** el material absorbe la radiación.
- **Reflexión:** el material rechaza y devuelve la radiación.
- **Refracción:** la radiación traspasa el material, pudiendo variar su dirección según el ángulo de incidencia. Si la radiación incide perpendicularmente al material, ésta no variará su dirección. [2]









#### 1.4 Declaración de la problemática

Uno de los principales problemas ambientales que tiene actualmente la tierra, junto a la fragmentación de los hábitats y la introducción de especies exóticas, es el calentamiento climático. Una de las causas que motivan este cambio climático es el modo de producción de la energía eléctrica.

El consumo de electricidad crece cada año de manera insostenible, por lo que se debe centrar los principales esfuerzos en conseguir el ahorro energético, es decir, no aumentar e incluso reducir el consumo de electricidad. Para ello hace falta campañas institucionales fuertes y políticas orientas hacia el ahorro, ya que lo hecho hasta ahora no es suficiente. Mientras se consigue este ahorro energético, es también necesario mejorar la producción eléctrica y orientarla hacia medios más sostenibles como son las energías renovables. Por ello es necesario potenciar lo máximo posible estas formas de producción de energía, siempre dentro de unos límites de implantación racional en términos ambientales.

La energía solar surge como una alternativa ante este problema, ya que genera energía sin producir los contaminantes asociados a los combustibles fósiles y a la energía nuclear, entre ellos, el más significativo es el dióxido de carbono. Este tipo de energía es el recurso energético con mayor disponibilidad en casi todo el territorio Peruano. En la gran mayoría de localidades del Perú, la disponibilidad de la energía solar es bastante grande y uniforme durante todo el año, comparado con otros países, lo que hace atractivo su uso. En términos generales, se dispone, en promedio anual, de 160 a 210 W/m<sup>2</sup> en la costa y selva, y de 210 a 250 W/m<sup>2</sup> aumentando de norte a sur. Esto implica que la energía solar incidente en pocos metros cuadrados es, en principio, suficiente para satisfacer las necesidades energéticas de una familia. El problema es transformar esta energía en energía útil y con un costo aceptable.

La energía del sol se puede transformar con facilidad en calor: de hecho, cualquier cuerpo, preferentemente de color negro, absorbe la energía solar y la transforma en calor, que puede ser usado para calentar ambientes, calentar agua, secar diversos productos, cocinar, etc. Por otro lado, con los paneles fotovoltaicos, se transforma la energía solar directamente en electricidad. La fabricación de los paneles fotovoltaicos requiere alta tecnología y pocas fábricas en el mundo (en países desarrollados) lo hacen, pero su uso es sumamente simple y apropiado para la electrificación rural, teniendo como principal dificultad su alto costo.

Por otra parte, haciendo referencia a las poblaciones del sector rural marginal que no tienen acceso a la más mínima infraestructura energética. Las dificultades respecto al suministro de la energía se deben a varias razones entre las cuales podemos indicar las siguientes: escasos recursos económicos, falta de vías de acceso tanto terrestres como fluviales, lejanía de los centros de consumo, localización geográfica, condiciones ambientales. Por estas razones, este proyecto orienta sus potenciales conocimientos y experiencias hacia el aprovechamiento de las energías renovables como es el caso de la solar de media y alta temperatura, donde se puedan concebir y fabricar sistemas sencillos y de bajo costo como la fabricación de un horno solar con aplicación al sector rural marginal.

### **1.5 Síntesis y consecuencias**

El Perú como un país en vías de desarrollo debe buscar de cualquier forma práctica aprovechar las energías alternativas; si bien el país tiene fuentes de combustibles fósiles como carbón y petróleo, e incluso ricas fuentes hídricas para la creación de hidroeléctricas, todas estas formas de generación de energía tienen un enorme impacto sobre el medioambiente y sobre las poblaciones cercanas.

En algunos casos nuestras fuentes de energía actuales tienen efectos positivos como la generación de empleo y de regalías, pero es un hecho que dichas fuentes pueden terminarse, o simplemente su explotación podría implicar la exterminación de reservas naturales, o un deterioro mayor del medio ambiente; por lo tanto es una prioridad para el gobierno y para la sociedad en Perú informarse acerca de las energías alternativas y de su aprovechamiento, para lograr un futuro energéticamente claro, con cobertura total, y sobre todo de acuerdo con la nueva visión global de un mundo limpio y libre de emisiones nocivas para el ambiente.

## CAPÍTULO 2

### TECNOLOGÍAS APLICADAS A LOS SISTEMAS DE SEGUIMIENTO SOLAR

#### 2.1 Estado del Arte

##### 2.1.1 **Presentación del asunto de estudio**

En la actualidad, el aprovechamiento de la energía solar requiere de nuevas tecnologías y de equipos de comprobación y homologación para el desarrollo de nuevos sistemas solares, con el objetivo de mejorar la eficiencia y aprovechar al máximo la energía del Sol, ya sea para la cocción de alimentos, secado de productos agrícolas y hasta la generación termoeléctrica.

El Horno Solar, es un prototipo experimental de generación térmica que aprovecha la energía solar, en la cual se puede realizar ensayos de materiales reflectantes para en un futuro cercano desarrollar sistemas térmicos solares que tengan utilidad en el sector rural como en el sector productivo.

Los concentradores parabólicos son la parte fundamental de los hornos solares, estos utilizan la geometría de la parábola para poder reflejar los rayos solares que les llegan y concentrarlos en el foco. Pero la incidencia de los rayos solares sobre los concentradores difiere de la perpendicularidad a lo largo del día y por lo tanto se ve reducida la eficiencia de estos sistemas. Es posible corregir esta situación utilizando un seguidor solar que oriente los concentradores a la posición del Sol, los cuales siguen la trayectoria aparente del Sol ocasionada por los movimientos de la Tierra respecto al Sol.

El presente estudio muestra las tecnologías y modelos de los equipos que actualmente se utilizan para seguir la intensidad luminosa del Sol.

##### 2.1.2 **Estado de investigación**

Todos los seguidores solares incluyen mecanismos para orientar una placa colectora de forma que ésta permanezca perpendicular a los rayos solares.

### 2.1.2.1 Sistemas de seguimiento solar aceptados por el IEEE

Como parte del estado del arte examinado en esta tesis, se encuentran los sistemas de seguimiento solar aceptados por el IEEE, que los clasifica en:

#### a) Según sus grados de libertad

- **Sistemas de seguimiento solar en un eje:** Este tipo de sistemas es el más usado, debido a que la máxima variación entre Sol y panel ocurre en azimut, la variación en elevación se desprecia por considerarse de poca repercusión en términos de energía y porque se encarecen los costos de desarrollo. Sin embargo, la elevación se realiza en forma manual cada 6 meses, para temporada invernal y estival, o bien se puede fijar en la mitad, para ambas estaciones. Algunos ejemplos de este tipo de sistemas pueden ser encontrados en la literatura [8, 9, 10, 11, 12].
- **Sistema de seguimiento solar en dos ejes:** Este tipo de sistemas es poco común, pueden seguir el Sol tanto en dirección como en elevación, lo que implica tener dos actuadores, para variar la inclinación del panel en forma horizontal y vertical. Algunos ejemplos de este tipo de sistemas pueden ser encontrados en la literatura [13].

La variación de la elevación del Sol se produce por la inclinación del eje de rotación terrestre, de  $23,5^\circ$  aproximadamente con respecto al plano de la órbita que describe alrededor del Sol y da origen a las estaciones del año. Véase figura 2.1.

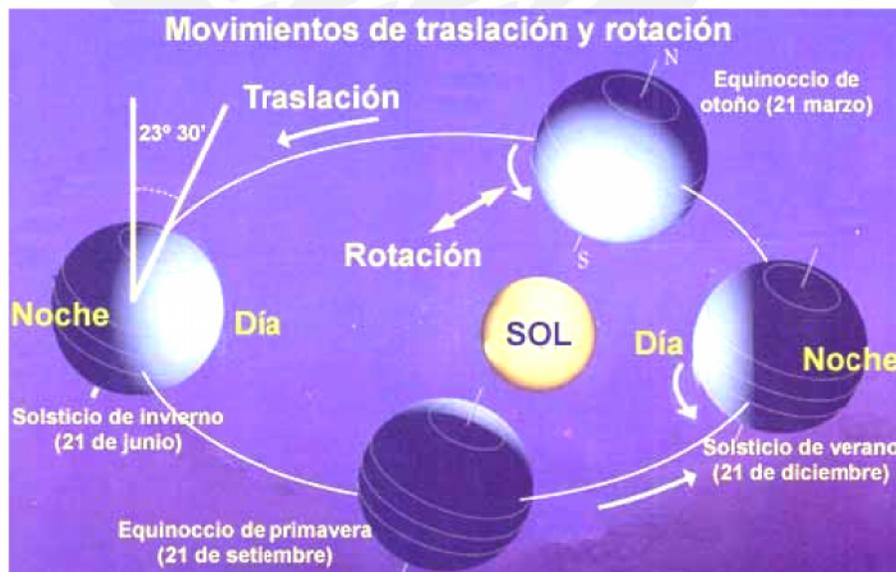
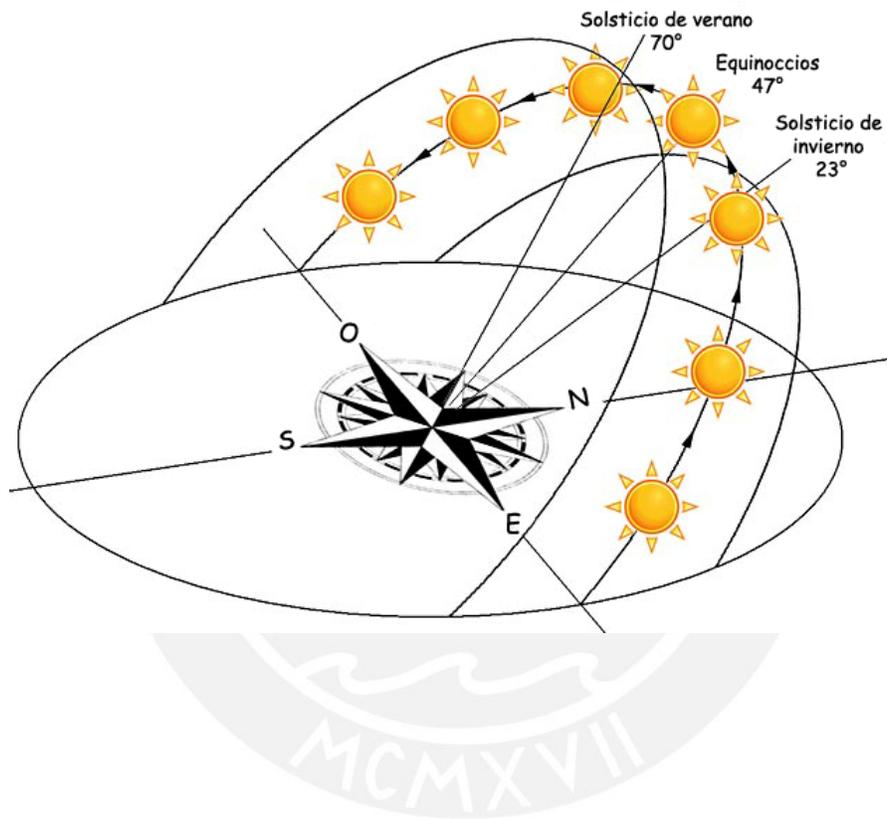


Figura 2.1: Inclinación del eje de rotación terrestre  $23,5^\circ$





MODELO	CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS
<b>SUNTRACK 5</b> 	<p>Es un sistema basado en micro controlador, que ha sido diseñado para seguimiento en dos ejes con alta precisión. El módulo de control es adaptable para sistemas hidráulicos y eléctricos. Este sistema trabaja calculando la posición del Sol (programación astronómica), tanto en Azimut como en Elevación, con una precisión de <math>0.01^\circ</math> [16].</p>	<p><b>Dimensiones:</b> 105x103x30mm  <b>Alimentación:</b> 24 V (<math>\pm 20\%</math>)  10 A (+10%)  <b>Entradas digitales:</b> 4  <b>Salidas digitales:</b> 4  <b>Entrada analógica:</b> 1(0 a 10 V)  <b>Salidas analógicas:</b> 2(0 a 10 V)  <b>Entradas encoders:</b> 6 entradas digitales (24 V/30 mA)  <b>Precisión:</b> <math>&gt; 0.015^\circ</math></p>
<p><b>Precio:</b> No Mencionado</p>		

### SDK TRACKER-KIT



**Precio:**  
No Mencionado

SDK ha adaptado el modelo de seguidor solar a dos ejes TRACKER-KIT para ser utilizado como estructura de seguimiento para paneles solares de concentración (CPV), con una precisión en el seguimiento de  $0.1^\circ$ , la cual busca garantizar la captación solar óptima en la tecnología de concentración [17].

**Potencia del seguidor:** 15 kW

**Movimiento en 2 ejes:** 2 actuadores lineales y 1 motor reductor planetario (2 motores eléctricos)

**Rotación en eje horizontal**

**(Elevación):** De  $0^\circ$  a  $70^\circ$

**Rotación en eje vertical**

**(Azimut):** De  $0^\circ$  a  $240^\circ$

**Altura (máxima):** 4.50 m

**Ancho (máximo):** 14.50 m

### MECASOLAR MS-2 TRACKER 10



**Precio:**  
No Mencionado

Es un equipo electromecánico que en su parte superior lleva fijados los módulos fotovoltaicos y que consigue que la insolación sobre los mismos sea máxima; toda esta estructura se mueve de Este a Oeste sobre un eje que puede girar  $240^\circ$  (seguimiento acimutal) y un segundo eje con movimiento de inclinación desde los  $60^\circ$  hasta la posición horizontal. [18]

**Ejes de Seguimiento:** 2 EJES:

Horizontal y Vertical

**Potencia admitida en**

**Seguidor:** Hasta 12 kW **Ángulo**

**Giro:**

Eje Vertical:  $240^\circ$

( $-120^\circ$  a  $+120^\circ$ )

Eje Horizontal:  $60^\circ$

**Altura:** 3.3m

**Tecnología de Seguimiento:**

Programación astronómica del PLC

### BIO-SOL BIO 1



**\*Precio:** S/.11,730

Seguidor solar de 2 ejes, fácil de programar y cambiar los parámetros.

Robusto, sencillo y de fácil manejo e instalación.

El seguidor también lleva control del viento mediante un anemómetro que es controlado por el propio autómatas [19].

**Ejes de Seguimiento:** 2 EJES:

Horizontal y Vertical

**Potencia admitida en**

**Seguidor:** Hasta 1.56 kW

**Altura:** 3m

**Tecnología de Seguimiento:**

Programación astronómica

### LORENTZ ETATRACK ACTIVE 1500 – A



**\*Precio:** S/.10,746

Los sistemas de seguimiento activos LORENTZ ETATRACK proporcionan aumentos de rendimiento de hasta un 40 % de los módulos fotovoltaicos.

Los sistemas ETATRACK siguen al sol durante el día, lo que supone un aumento del tiempo con mayores niveles de potencia útil entregada y la obtención de potencia pico máxima [20].

**Ejes de Seguimiento:**

1 eje único

**Potencia admitida en**

**Seguidor:** Hasta 2.9 kW

**Segundo eje de regulación**

**manual paso a paso:** 0 -  $45^\circ$

**Seguimiento de ángulo de**

**Este - Oeste:**  $90^\circ$

**Tecnología de Seguimiento:**

Programación astronómica

2.2 Conceptualizaciones Generales

<p><b>Sensor</b> [21]</p>	<p><b>Definición</b></p>	<p>Un sensor es un dispositivo capaz de medir magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas. Las variables de instrumentación pueden ser por ejemplo: temperatura, intensidad lumínica, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, humedad, etc.</p>
<p><b>Encoder</b> [21]</p>	<p><b>Definición</b></p>	<p>Los Encoders son sensores que generan señales digitales en respuesta al movimiento. Están disponibles en dos tipos, uno que responde a la rotación, y el otro al movimiento lineal. Cuando son usados en conjunto con dispositivos mecánicos tales como engranes, ruedas de medición o flechas de motores, estos pueden ser utilizados para medir movimientos lineales, velocidad y posición.</p>
	<p><b>Encoders incrementales</b></p>	<p>Los encoders incrementales suministran un número específico de impulsos por cada revolución completa del eje. Esta cuenta de impulsos está determinada por el número de divisiones o segmentos del disco de codificación. Ej. El disco de codificación consta de 360 segmentos, por lo tanto por revolución del eje, se obtendrán 360 impulsos. Es decir, un impulso por grado angular.</p>
	<p><b>Encoders Absolutos</b></p>	<p>A diferencia de los encoders incrementales, los del tipo absoluto proporcionan una combinación única de señales para cada posición física. Esto resulta una ventaja importante, ya que no es necesario un contador para la determinación de la posición. La combinación de señales se establece mediante un patrón de código de sectores transparentes y opacos en varias pistas de un disco rotativo.</p>
<p><b>Micro controlador</b> [22]</p>	<p><b>Definición</b></p>	<p>Es un circuito integrado (chip) que sirve para el control de diferentes tareas asignadas. Cuenta con un CPU, también con memoria no volátil para almacenar programas, memoria RAM, interfaces de entrada/salida y algunos periféricos. Son programados con el lenguaje ensamblador.</p>

<b>Lenguaje de Programación</b> [23]	<b>Definición</b>	Es un lenguaje que se utiliza para controlar el comportamiento de las máquinas, en su mayoría computadoras. Se basa en el uso de una simbología regida por una serie de normas sintácticas y semánticas que determinan el significado y función de los elementos expresados mediante los símbolos.
	<b>Lenguaje ensamblador</b>	Es un lenguaje de programación que está entre lenguaje máquina y el lenguaje de alto nivel; y se utiliza para programar microcontroladores. Se necesita de un ensamblador que traducirá cada sentencia a una instrucción de máquina. Los comandos y sentencias lenguaje ensamblador variará con respecto al microcontrolador en uso.
	<b>Visual C++</b>	El lenguaje C++ es un lenguaje de alto nivel e interactivo. Tiene bases en el lenguaje C. Tiene la capacidad de desarrollar interfaces gráficas para la interacción entre el usuario y algún dispositivo externo que requiera ser monitoreado mediante la computadora.

### 2.3 Modelo Teórico

Los recursos energéticos con los que cuentan las naciones, son uno de los factores más importantes para el adelanto tecnológico de estas, y el avance en la tecnología determina la utilización de estos recursos.

El hombre utiliza los recursos energéticos para satisfacer algunas de sus necesidades básicas en forma de calor y trabajo. El calor es necesario para incontables aplicaciones, como la climatización del espacio, cocción de alimentos, transformación y producción de componentes químicos.

Teniendo en cuenta lo expuesto, el horno solar es una buena alternativa para aprovecharla adecuadamente en el progreso del país y en el mejoramiento de la vida de sus habitantes. Existe la apremiante necesidad de multiplicar los esfuerzos y recursos dedicados a su investigación y desarrollo tecnológico, a fin de poder satisfacer las necesidades energéticas de las comunidades urbanas y rurales.

Este trabajo contribuirá a reducir el impacto ambiental, ya que se utiliza una fuente renovable de energía, con la que se disminuirá la contaminación del ambiente que se produce con el uso de combustibles fósiles.

En la figura 2.3 se ilustra la representación gráfica del modelo teórico.

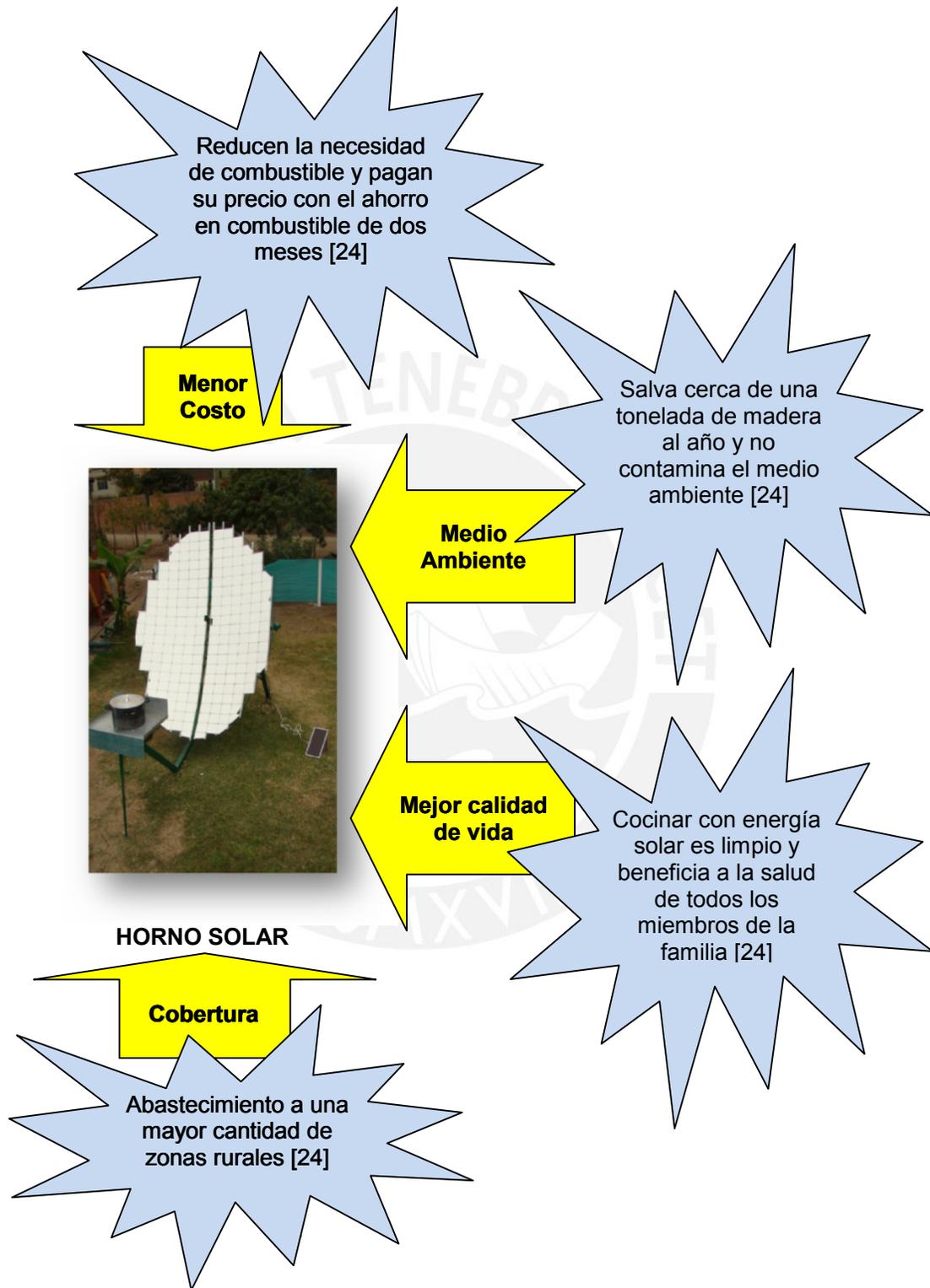


Figura 2.3: Representación gráfica del Modelo Teórico

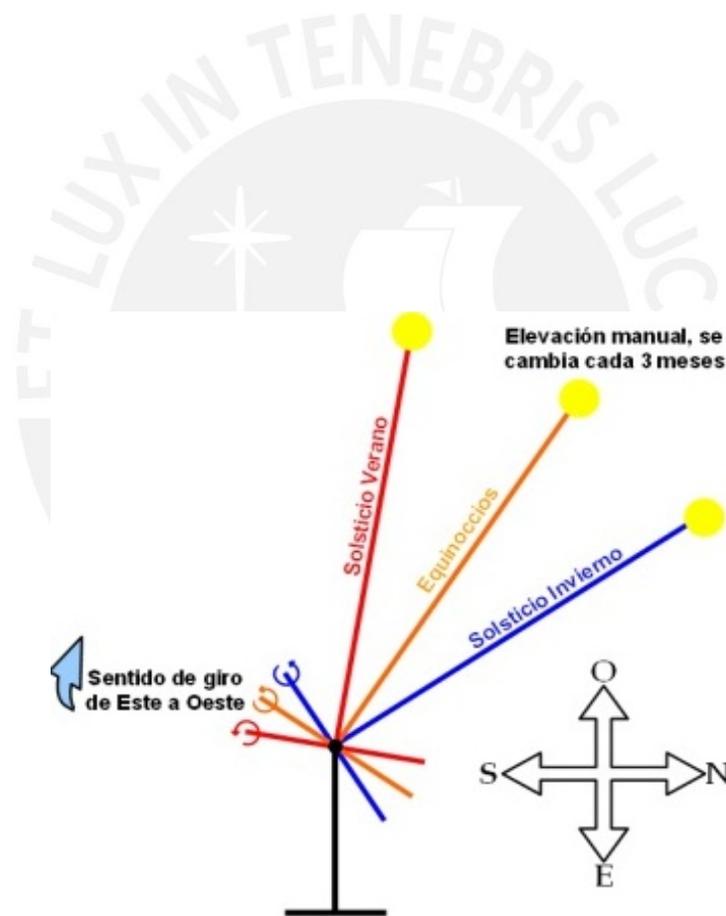
## 2.4 Objetivos

### 2.4.1 Objetivos General

Esta tesis tiene como objetivo principal diseñar e implementar un seguidor solar para el control electrónico, basado en microprocesador, de un reflector parabólico tipo Scheffler. Este reflector solar, que ya fue construido por el GRUPO PUCP, tiene como finalidad poder cocinar con la energía del Sol en zonas rurales de la manera más cómoda, barata y eficiente posible.

### 2.4.2 Objetivos Específicos

- Analizar la información necesaria relacionada con el tema en estudio y utilizar los conceptos teóricos y prácticos que se requieran para su desarrollo.
- Seleccionar el método para el seguimiento solar.
- Diseñar el circuito de control, basado en microprocesador, que se encargue de generar las señales de control necesarias que requiere el actuador para mover al reflector y poder seguir al sol.
- El sistema de seguimiento solar debe ser válido para cualquier zona del Perú.
- Realizar pruebas al sistema una vez finalizado y documentar los resultados para verificar su funcionamiento.





**Figura 3.2: Estructura mecánica del reflector**

### 3.2 Definición del método

Luego de lo revisado y analizado en el estado del arte se realizó el diseño y construcción de un prototipo que permitiera validar la solución escogida. Enmarcados dentro de las soluciones existentes y clasificadas por el IEEE, se tomó la decisión de confeccionar un seguidor solar de las siguientes características:

- ◆ **Según sus grados de libertad:** Sistema de seguimiento en un eje
- ◆ **Según el control:** Control por programación astronómica.
- ◆ **Según actuador:** Actuador activo

El método para realizar el seguimiento se basa en el tiempo, independiente de la hora en la cual amanece o atardece, la transición del día y noche ocurre en 24 horas, el planeta Tierra gira  $360^\circ$  sobre su eje, por lo tanto,  $360^\circ/24h = 15^\circ$ , lo que corresponde a un uso horario, es decir, visto desde el plano terrestre el Sol se mueve  $15^\circ$  cada hora. El control debe contemplar mover el reflector  $15^\circ$  cada hora dentro de  $180^\circ$  (que corresponden al día, ya que los otros  $180^\circ$  de la Tierra se encuentran de noche), pero en la práctica el recorrido ocurre en un ángulo menor o igual a  $160^\circ$ , correspondiente a las horas de luz disponible por el relieve geográfico. Para inicializar este tipo de sistemas, se debe conocer alguna hora en la cual el Sol se encuentre en un ángulo determinado, esto se puede lograr consultando tablas solares o haciendo el cálculo de la posición solar.

De esta manera, se alinea el reflector con el Sol y a partir de aquel momento comienza la cuenta, el sistema mueve el reflector  $15^\circ$  cada hora, hasta llegar al límite Este o al límite Oeste según corresponda, para finalmente volver a la posición de origen, hasta que comience un nuevo día, en el cual se repite el ciclo.

### 3.3 Diagrama del sistema de control de posición

A continuación se ilustra el diagrama conceptual del sistema de control de posición en la figura 3.3.

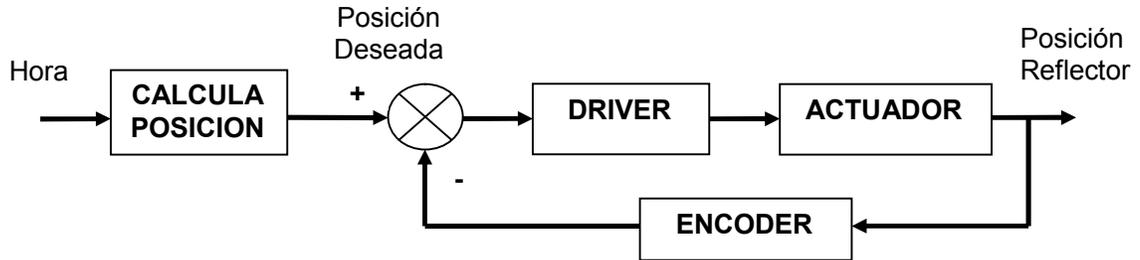


Figura 3.3: Diagrama conceptual del sistema de control de posición

Se determinaron tres componentes principales:

1. Un microcontrolador.
2. Un reloj en tiempo real que alimente al microcontrolador con datos de fecha y hora confiables.
3. Un Driver (Punto H) para el accionamiento del actuador.

En la figura 3.4 se muestra el diagrama de bloques de interconexión física de los componentes del controlador.

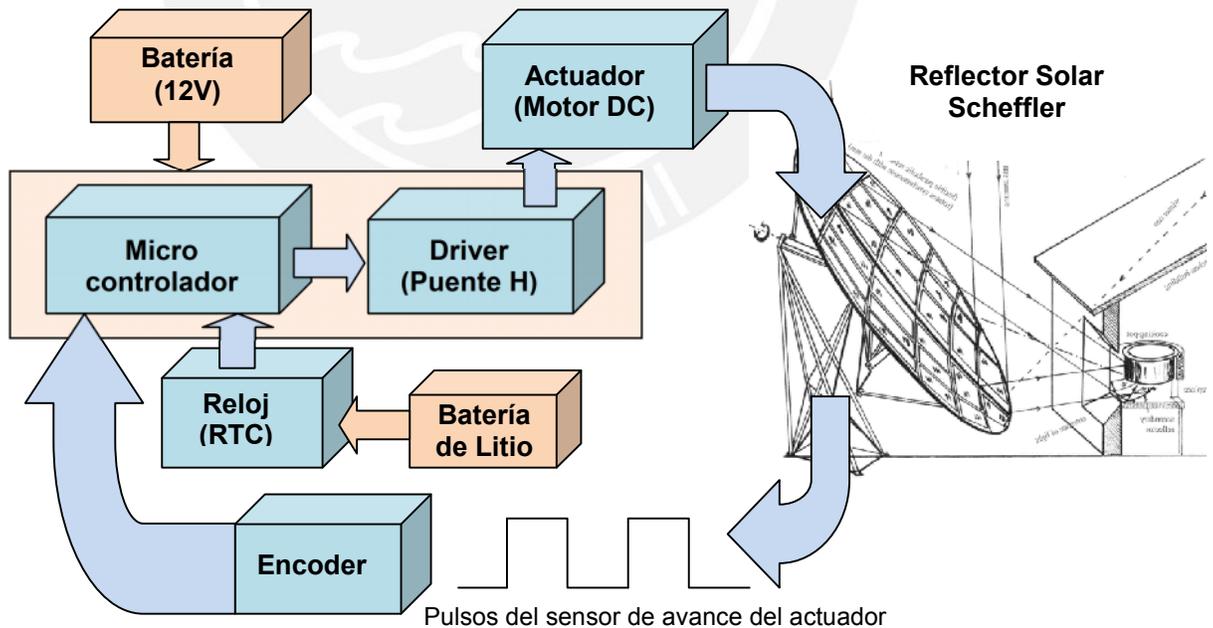


Figura 3.4: Diagrama de bloques de interconexión física

Al seleccionar el reloj se buscó que cuente con alimentación propia, para que en caso de que el sistema se quede sin energía no se pierda los datos

contenidos en él. Se utilizó un encoder para medir la inclinación del reflector y poder posicionarlo donde se necesita según la hora, los demás elementos del hardware sólo son para el funcionamiento de los componentes principales y los valores se tomaron directamente de las hojas de datos de acuerdo a la configuración como era necesario utilizarlos.

**3.4 Cálculo de la posición solar**

A continuación se describen conceptos básicos, mediante los cuales se determinará la posición del Sol en cualquier instante de tiempo y en cualquier día.

**Altura ( $\alpha$ ):** Es el ángulo medio entre el horizonte y la posición del Sol sobre el horizonte (también es llamado ángulo de elevación). Se calcula por medio de la siguiente ecuación 3.1.

$$\alpha = \text{Sen}^{-1}(\text{Cos}\phi \text{ Cos}\delta \text{ Cos}\omega + \text{Sen}\phi \text{ Sen}\delta) \dots\dots\dots(3.1)$$

**Ángulo Cenital (Z):** Es el arco complementario a la altura, es decir la distancia de un astro al zenit, y está dada por la ecuación 3.2.

$$Z = 90 - \alpha \dots\dots\dots(3.2)$$

**Azimut ( $\gamma$ ):** El azimut solar es el ángulo sobre la proyección del Sol sobre el horizonte y el sur midiéndose con valores negativos hacia el este y con valores positivos hacia el oeste. Se calcula con la siguiente ecuación 3.3.

$$\gamma = \text{Sen}^{-1}\left(\frac{\text{Cos}\delta \text{ Sen}\omega}{\text{Cos}\phi}\right) \dots\dots\dots(3.3)$$

**Ángulo horario ( $\omega$ ):** Está formado entre la posición del Sol a la hora considerada y su posición al mediodía, medido sobre el círculo de su órbita. El Sol recorre 15° a la hora (360° en 24 horas), y se mide a partir del mediodía (12:00 hora solar local), con ángulos negativos antes del mediodía y positivos después del mediodía.

**Latitud ( $\phi$ ):** Es el arco que existe entre el paralelo que pasa por el lugar y el ecuador.

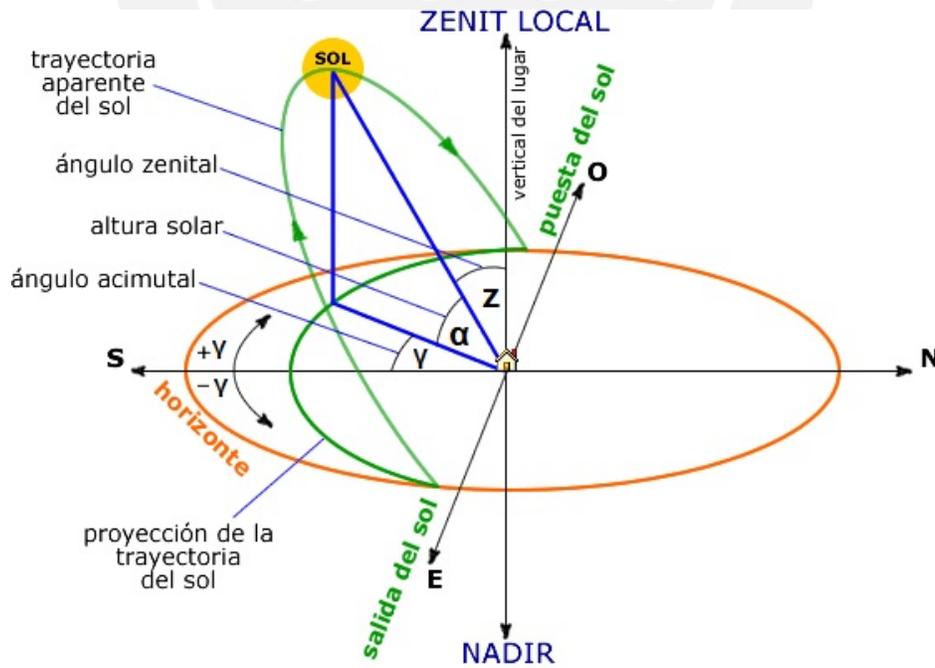
**Declinación ( $\delta$ ):** Es el ángulo formado por el plano del ecuador y el plano de la órbita terrestre, debido a la inclinación del eje de la Tierra. Está dada por la

$$\delta = 23.45 \text{ Sen} \left( 360 \frac{284 + d}{365} \right)$$

$$T_{ss} \quad h \quad \omega_{15}$$

$\omega$

$$T_{ps} \quad h \quad \omega_{15}$$



### 3.5 Diseño del sistema de control

El seguimiento del sol se realiza por control de lazo abierto o por programación astronómica, y la única parte que se encuentra retroalimentada o por control de lazo cerrado, es aquella que sirve para controlar el motor CC; la retroalimentación se realiza a través del encoder, dispositivo que mide la posición actual del reflector. Este dispositivo, se encuentra en el circuito de control el que a su vez es solidario al reflector.

Con respecto al circuito del seguidor propiamente tal: el microcontrolador recibe información dada por el usuario, el cual entrega la fecha, hora y latitud del lugar, luego el microcontrolador actualiza la hora del reloj de tiempo real (RTC). Con la información obtenida se procede a realizar el cálculo de la posición solar y la hora de salida del sol, para comenzar el seguimiento. El microcontrolador lee la posición del Reflector y verifica si corresponde con la hora del RTC, en caso de corresponder espera 20 minutos y vuelve a comprobar lo anterior. En caso contrario el actuador mueve el reflector de Este a Oeste por un par de segundos hasta que la posición del panel coincida con el sol (según la hora entregada por el RTC), en ese instante se detiene el actuador y se repite el ciclo cada 20 minutos.

Cabe mencionar que el sistema sólo seguirá al sol de Este a Oeste, una vez de noche el sistema moverá los paneles de Oeste a Este hasta la posición de inicio, para un nuevo seguimiento a partir del amanecer. No obstante, si se trata de la primera vez que el sistema en conjunto ha sido instalado, se podría mover de Oeste a Este durante el día, para quedar alineado con el sol; esto sólo ocurrirá una vez, a partir de aquel instante el seguimiento se realiza únicamente en sentido Este Oeste.

Como el movimiento de traslación del planeta tierra ocurre en  $360^\circ$  cada 24hr, se establece que  $360^\circ / 24\text{hr} = 15^\circ / \text{hr}$ , que es lo que recorre el sol en una hora, visto desde el plano terrestre. Sin embargo, la tolerancia del panel es de  $\pm 5^\circ$ , entonces el motor CC del actuador, mueve los paneles  $5^\circ$  cada 20 minutos, hasta alcanzar los  $150^\circ$  que es el término del eje de recorrido o límite Oeste. Una vez ahí el reloj (RTC), espera hasta las 20:00hrs para aprovechar al máximo la luminosidad circundante antes del ocaso y luego ordena que el sistema vuelva al estado de inicio o límite Este, para repetir el ciclo a partir del amanecer del día siguiente.

Su funcionamiento básico se puede analizar en el diagrama de flujo presentado en la figura 3.6. El programa de control se muestra en el anexo C.

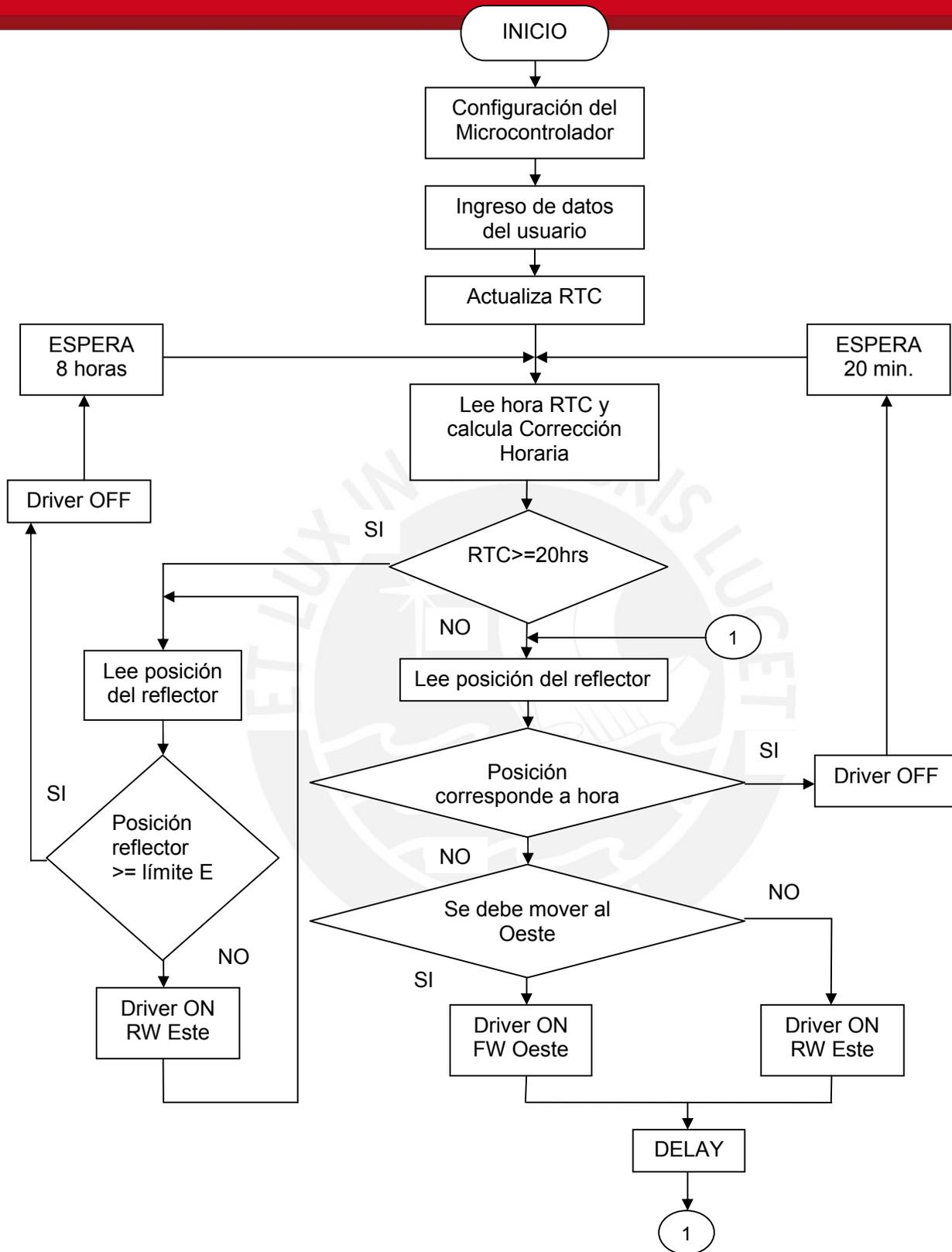
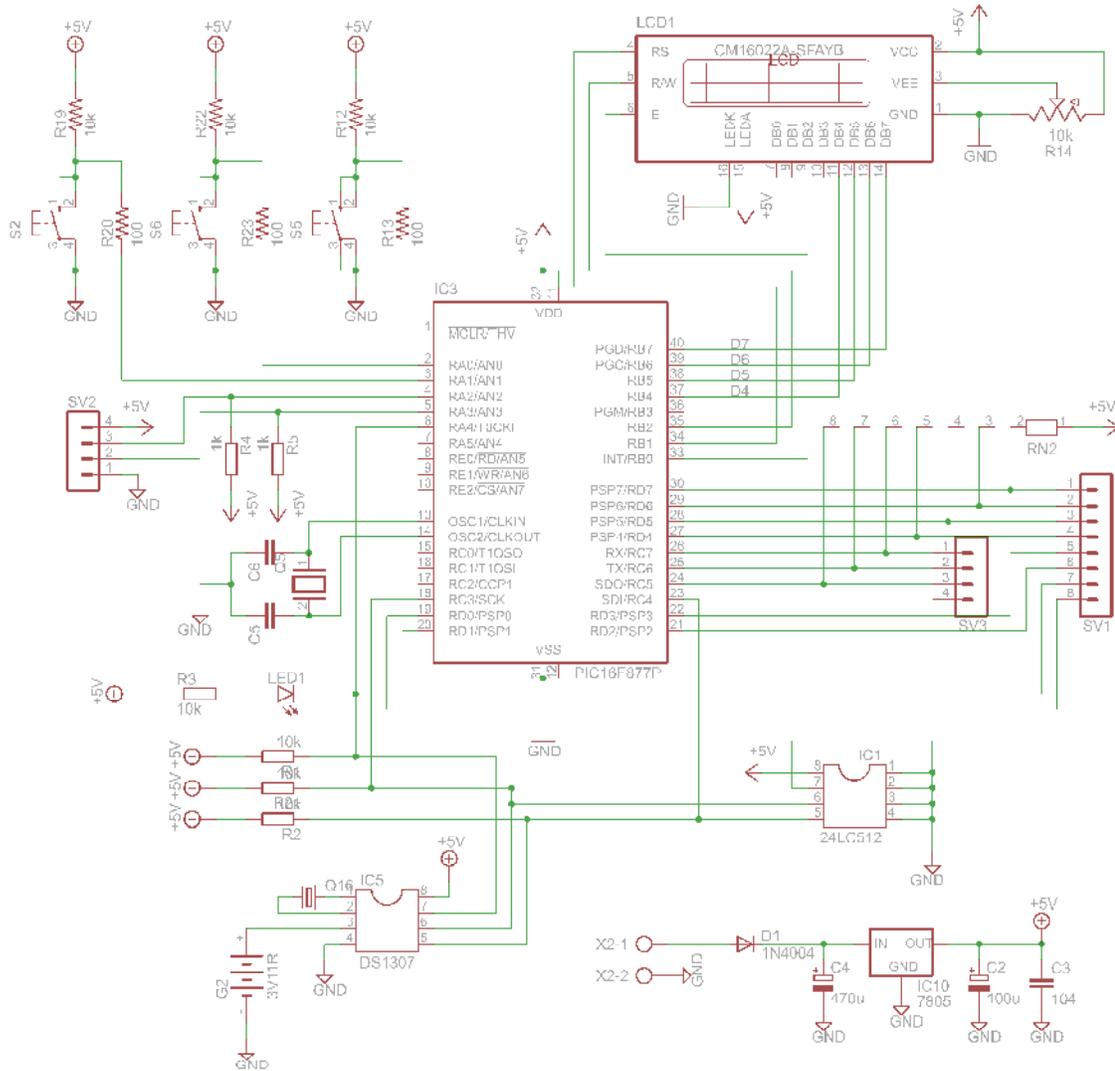


Figura 3.6: Diagrama de flujo

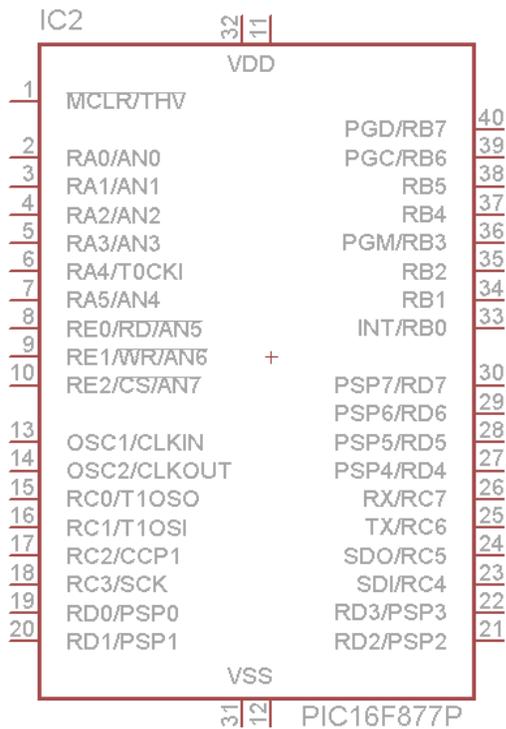


### 3.6.2 Partes del circuito

En esta sección se va a explicar detenidamente cada parte del circuito.

#### 3.6.2.1 Conexión del microcontrolador

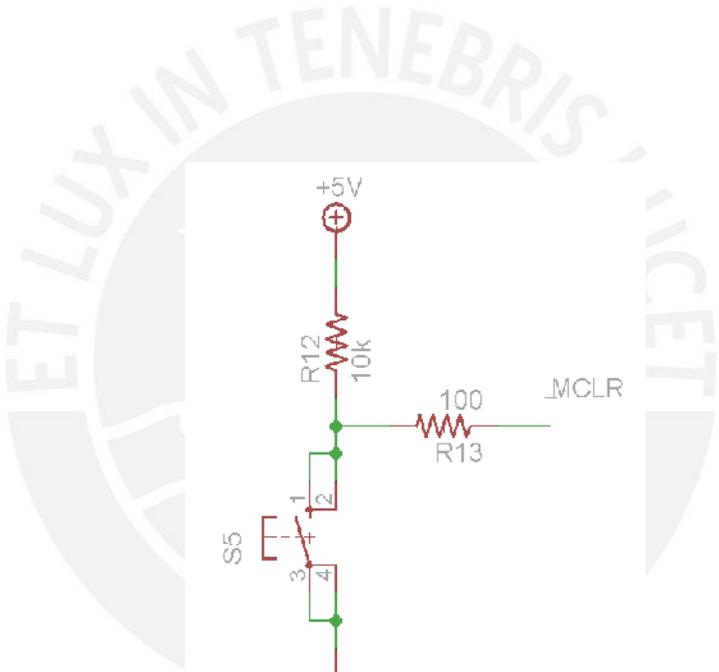
El microcontrolador PIC16F877, constituye el corazón del circuito, en el se encuentra el programa principal almacenado. Este integrado está programado con una secuencia de datos para controlar el funcionamiento del motor, el cual es coordinado en función de las coordenadas recibidas. En la figura 3.8 se muestra la configuración de los pines del microcontrolador PIC16F877.

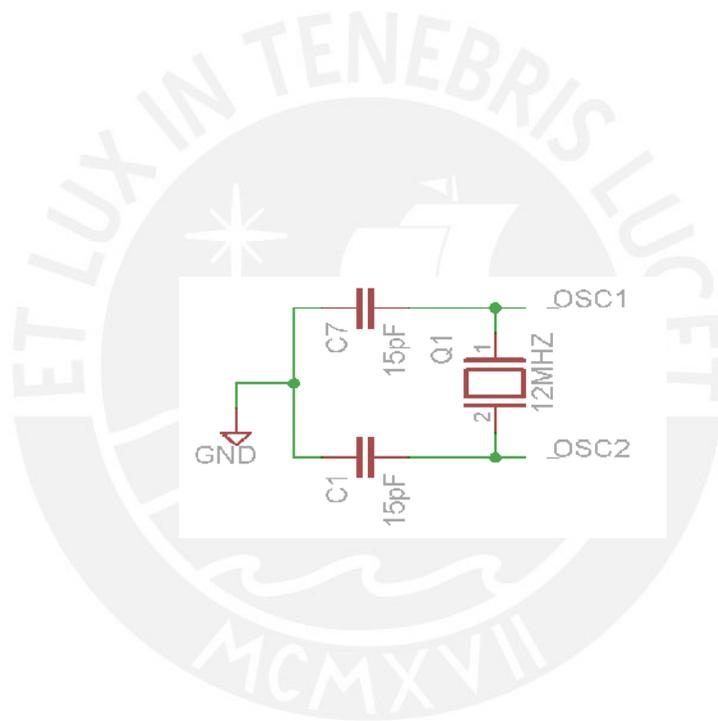
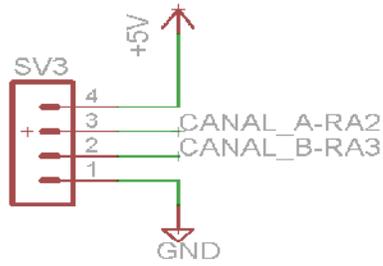


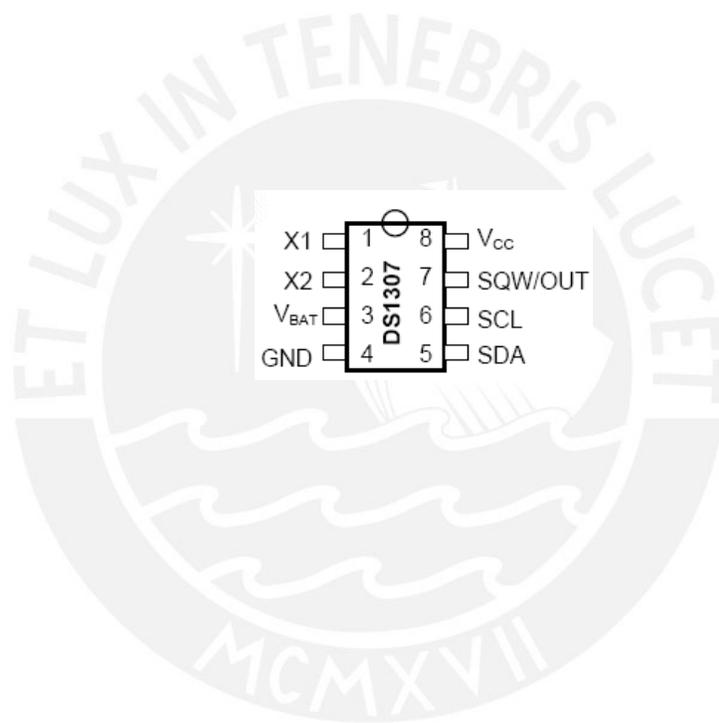
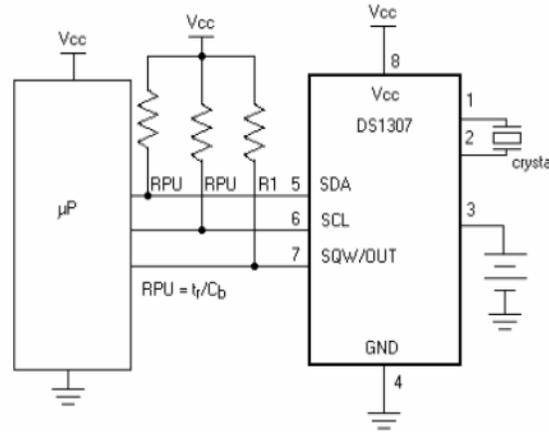
**Figura 3.8: Configuración de los pines del PIC16F877**

En el circuito diseñado, los pines del microcontrolador se han conectado de la siguiente manera:

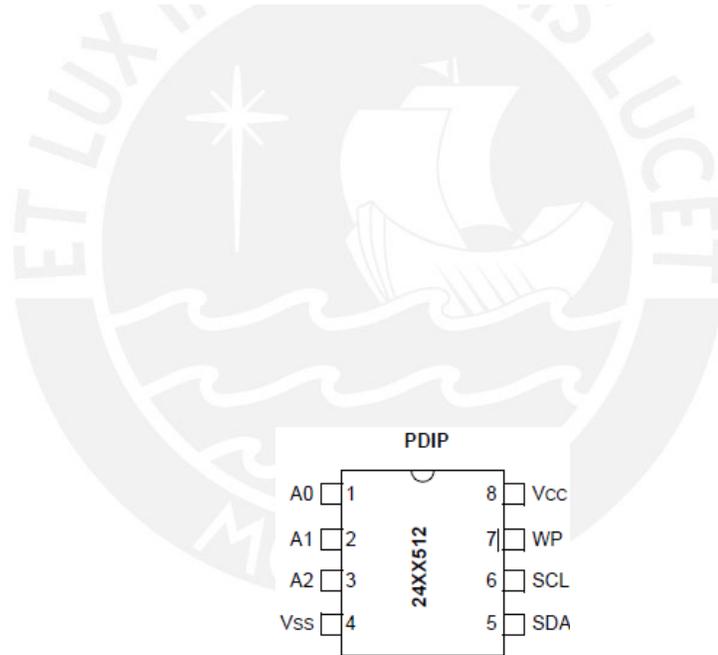
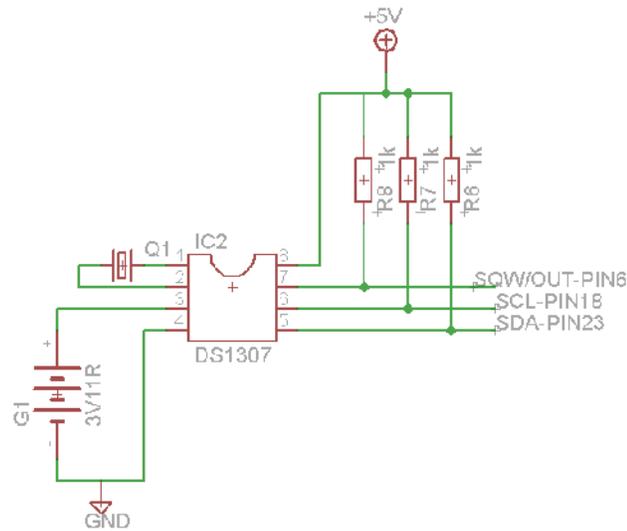
- $\overline{\text{MCLR}}$  (Pin 1): Circuito de Reset externo
- RA2 y RA3 (Pines 4 y 5): Circuito del Encoder
- OSC1 y OSC2 (Pines 13 y 14): Circuito del oscilador de frecuencia (oscilador del microcontrolador)
- CCP2 y CCP1 (Pines 16 y 17): Circuito del motor
- RA4, RC3 y RC4 (Pines 6, 18 y 23): Circuito del reloj en tiempo real
- VDD y VSS (Pines 11 y 12, 32 y 31): Tensión y tierra



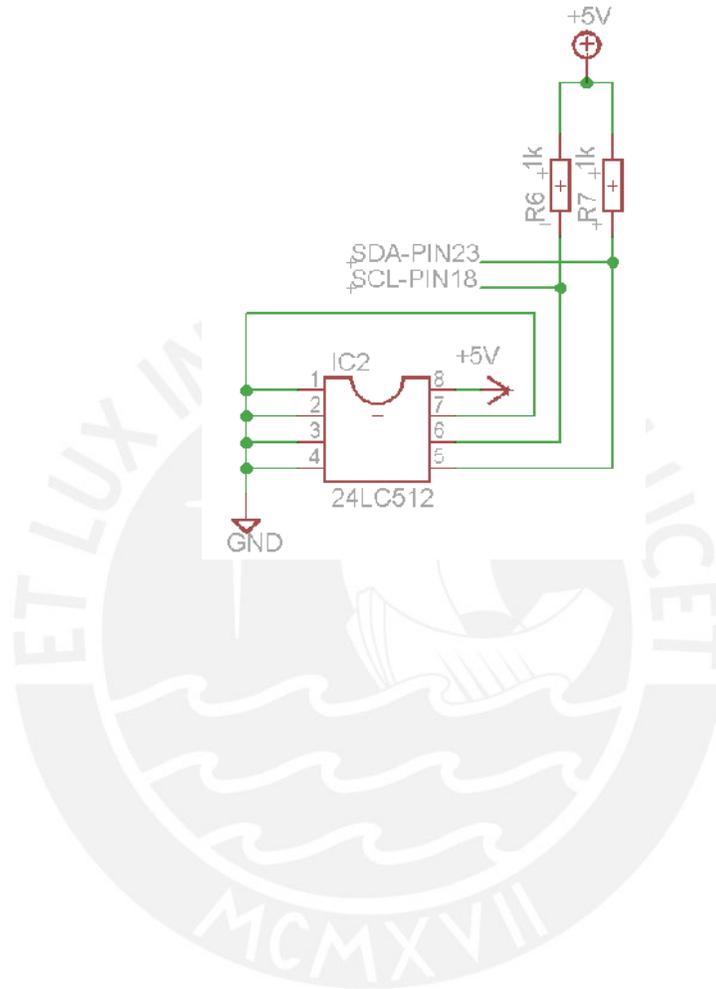




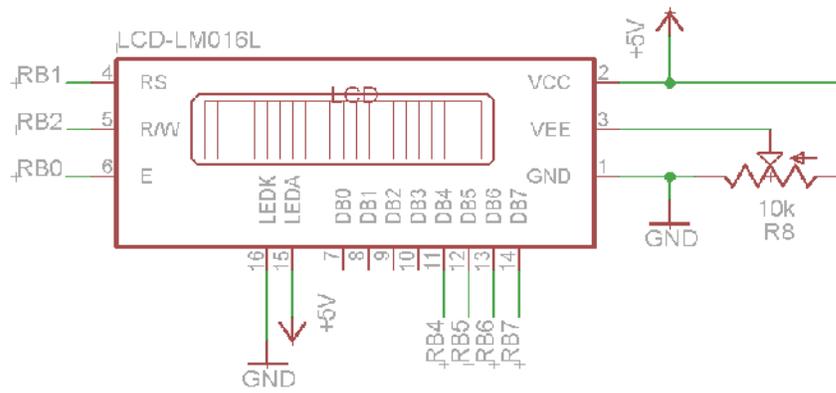
Pin	Puerto	Descripción
1,2	X1,X2	Conexión para cristal estándar de cuarzo de 32.768 KHz
3	VBAT	Entrada para la batería de respaldo, debe ser batería de litio de 3V. Si no se requiere, este pin debe estar conectado a tierra.
4	GND	Tierra
5	SDA	Serial Data Input/Output. Es la entrada/salida de la interface serial I2C.
6	SCL	Serial Clock Input. Es la entrada para la señal de reloj de la interface serial I2C.
7	SWQ/OUT	Cuando se habilita el bit SQWE, se puede obtener una onda cuadrada de este pin, con una frecuencia de 1Hz, 4, 8, 32kHz.
8	VCC	Voltaje de alimentación primario.

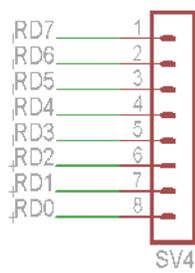
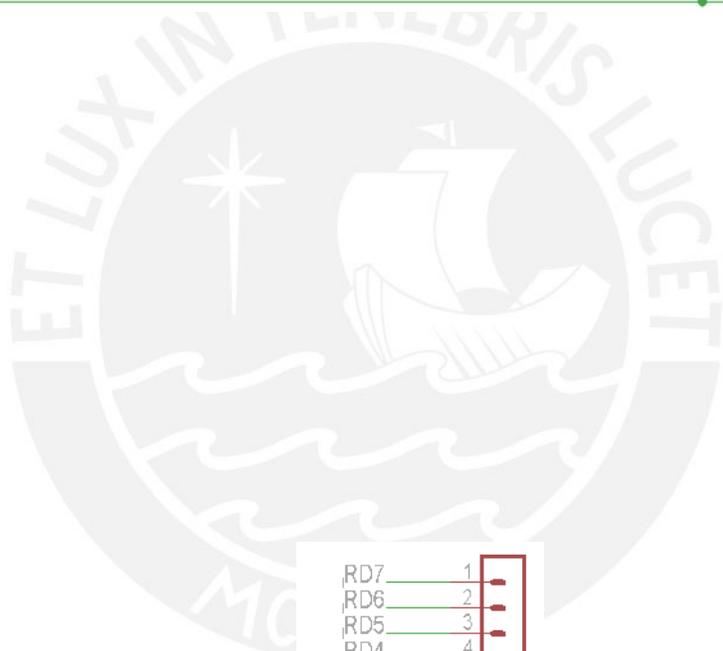
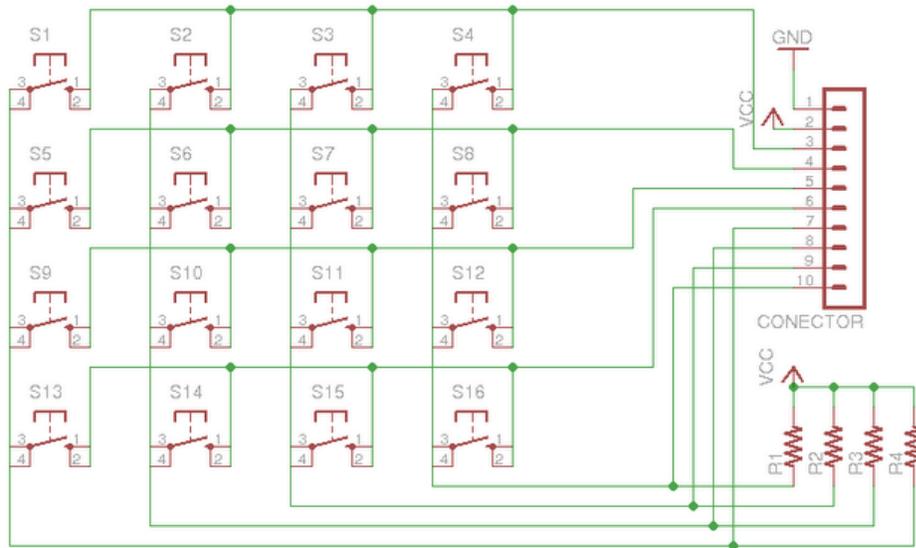


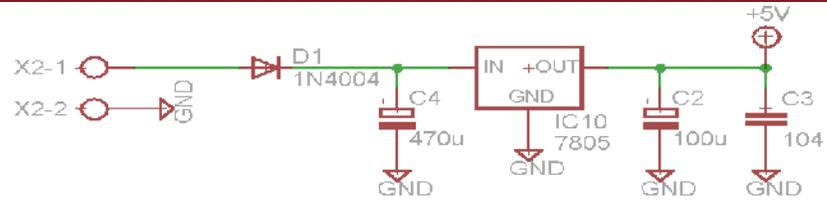
Nombre Pin	Función
A0	Direccionamiento
A1	Direccionamiento
A2	Alimentación
GND	Tierra
SDA	Datos serial
SCL	Sincronización
WP	Bloqueo escritura
Vcc	+2,5V a +5,5V

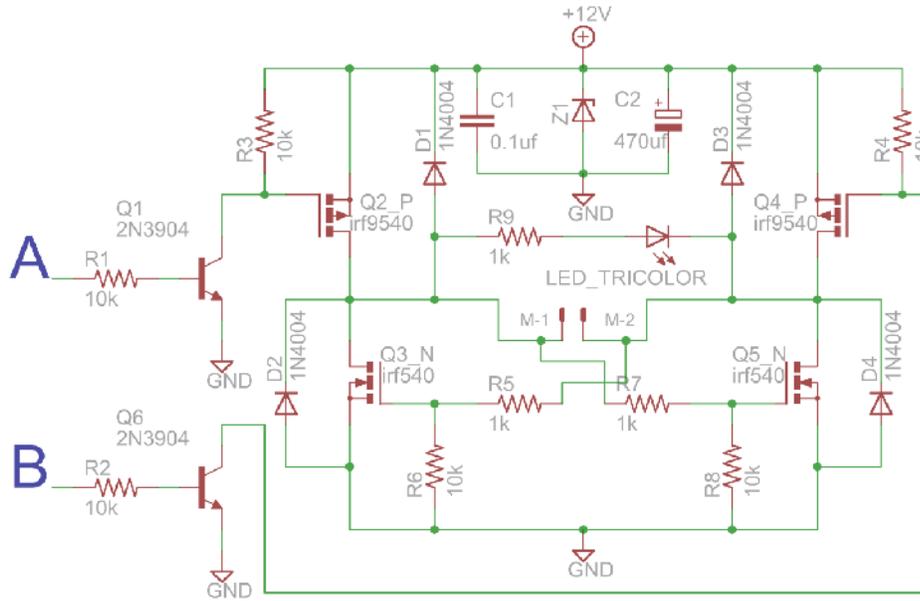


Pin	Puerto	Función
1	GND	Tierra
2	VCC	Alimentación
3	VEE	Contraste
4	RS	Selección de registro (Datos /Comandos)
5	R/W	Lectura/Escritura
6	E	Activación
7-13	D0-D6	Dato 0 a Dato 6
14	D7	Dato 7 o (BUSY FLAG)
15	LEDA	Positivo retroiluminación
16	LEDK	Negativo retroiluminación









### **Modo NO PERMITIDO**

Si  $A = 1$  y  $B = 1$  entonces todos los MOSFETs serán activados o saturados lo cual provocará que toda la corriente de la fuente de alimentación pase a través de ellos destruyéndolos.

El LED tricolor permitirá probar el circuito sin necesidad de conectar el motor; se pondrá verde en una dirección y rojo en otra.

Los motores eléctricos producen una gran cantidad de ruido debido a las escobillas o carbones, también producen picos de tensión al parar y más especialmente al cambiar de dirección. Mediante C1 y C2 se trata de suprimir al máximo los picos de ruido, y picos negativos son suprimidos mediante D1, D2, D3 y D4. Mediante Z1 se mantienen limitados los picos positivos a no más de 15 v. Es recomendable mantener la fuente de alimentación del motor separada de la alimentación de la parte electrónica o lógica; de lo contrario, se deberán tomar severas medidas para el filtrado de los ruidos para evitar inconvenientes no deseados.

### **3.7 Desarrollo del programa**

La parte de programación es la parte más crucial en este proyecto. Hay tres tipos de lenguaje de programación que son familiares; el lenguaje pascal, el lenguaje C y el lenguaje ensamblador. Se ha seleccionado el lenguaje pascal para la programación del microcontrolador, porque es más fácil y rápido de aprender en comparación con el lenguaje ensamblador. Para la programación en pascal, se eligió el programa MikroPascal ya que tiene todo lo necesario para programar en microcontroladores PIC.

#### **3.7.1 MikroPascal para PIC**

Si queremos realizar la programación de los microcontroladores PIC en un lenguaje pascal, es preciso utilizar un compilador de pascal. MikroPascal PRO para PIC es un compilador PASCAL con todas las características para microcontroladores PIC de Microchip, el cual está diseñado para desarrollar, construir y depurar aplicaciones embebidas basadas en PIC, además de contar con un entorno de desarrollo (IDE) muy cómodo.

Este compilador "*traduce*" el código pascal del archivo fuente (.mpas) a lenguaje máquina para los microcontroladores PIC, generando así un archivo en formato hexadecimal (.HEX).

El programa desarrollado en este proyecto se muestra en el anexo C.

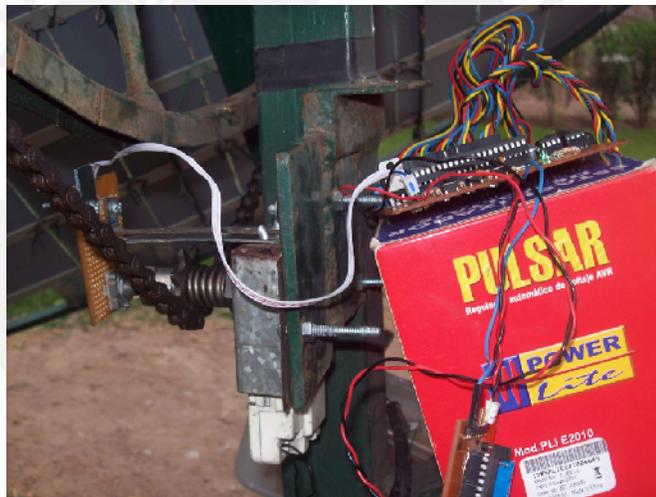
LUX IN TENEBRIS LUC





**Figura 4.2:** Circuito de control del seguidor solar

A continuación se muestra en la figura 4.3 la instalación del circuito de control al reflector solar Scheffler.



**Figura 4.3:** Instalación del circuito de control

El circuito de control cuenta con una pantalla LCD y un menú principal para poder configurar la hora, fecha, longitud y latitud del lugar, así como la diferencia horaria de acuerdo a la zona correspondiente.

En la figura 4.4 se muestra la pantalla principal del circuito de control, donde se observa la hora actual, la hora de inicio de salida del sol (hi) y la hora de puesta del sol (hf). También se observa la hora de actualización del panel (hn) a la cual este se moverá para quedar alineado con el sol.



#### 4.2.1.1 Problema con el límite de fin de carrera

El actuador (Motor DC) tiene un recorrido limitado por un punto de inicio y otro de término, que equivale a  $150^\circ$  del eje de recorrido, ya que el eje de rotación del reflector se ve limitada por la estructura misma. Se debe saber respetar dichas demarcaciones, de lo contrario si el actuador sobrepasa aquellos límites, la estructura podría dañarse, ya que se someterá a fuerzas que superan sus propiedades físicas y mecánicas. Para evitar esto en un principio se utilizaba el encoder que permite controlar la posición del reflector, y por lo tanto, mantener el eje de recorrido dentro de los  $150^\circ$  sin traspasar los umbrales críticos. Sin embargo, bajo ciertas condiciones de viento intenso la respuesta del encoder llegó con un pequeño error, el cual permitió que el actuador alcance distancias que estaban más allá del término de carrera, tanto para el origen y fin del recorrido.

Esta situación fue solucionada, agregando dos interruptores en los límites, los que cortan el suministro eléctrico en el motor CC, antes del límite máximo al que debe llegar el actuador, para ambos sentidos del recorrido, independiente de las condiciones de viento que puedan existir.

#### 4.3 Análisis de Resultados

El análisis de los resultados constituye uno de los pasos más importantes de este trabajo de titulación, pues de aquí emanan las conclusiones correspondientes, verificando la teoría con datos reales, dando cumplimiento a los objetivos y proporcionando información útil para futuras inquietudes en esta materia.

Durante la evaluación de dicho seguidor solar se pudo constatar que el viento puede llevar a un estado de inestabilidad al mecanismo de giro, esto no se tuvo en cuenta al momento del diseño y su construcción, pero deja abierto un tema a discutir en sistemas de seguimiento solar con control realimentado. La fuerza del viento (como variable perturbadora) debe ser eliminada. El seguidor solar de este proyecto presenta un modelo de control a lazo abierto. Un modelo de control a lazo cerrado eliminaría las perturbaciones.

Al ser un modelo experimental, el programa de usuario que corre dentro del microcontrolador puede ser modificado para mayor funcionalidad.

Es de vital importancia proseguir con el desarrollo de la incipiente tecnología de captación, acumulación y distribución de la energía solar, para conseguir las condiciones que la hagan definitivamente competitiva, a escala planetaria. Es por

ello que se inicia este tipo de trabajo de investigación como aporte a esta nueva alternativa de captación de energía.

#### 4.4 Observaciones

El costo aproximado de la implementación del seguidor solar asciende entre 100 y 120 nuevos soles, sin considerar el software y grabador usado para el microcontrolador PIC. En el anexo D se detalla el presupuesto del proyecto.

Debido a que ya existía la estructura mecánica para el seguimiento en el reflector solar, se trabajó en base a las limitaciones que este presentaba, como es el caso del eje de rotación por el cual se tuvo que hacer un acotamiento del ángulo de seguimiento de 30 a 150 grados.

El GRUPO PUCP tiene planeado llevar el reflector solar a la ciudad del Cusco, donde se tiene planeado hacer las pruebas de rigor que este requiere.



## CONCLUSIONES

Luego de una exhaustiva indagación, se pudo estudiar y asimilar los fundamentos, conceptos teóricos y prácticos implícitos en la investigación del presente trabajo, lo que permitió dar cumplimiento a los objetivos, seleccionando el método para el seguimiento solar.

Se analizaron los diferentes tipos de seguidores en el mercado obteniendo características de cada una para su análisis, además se analizó la trayectoria de seguimiento de cada seguidor de acuerdo a su eje de rotación para obtener una idea del algoritmo de control que se debe seguir.

Sé logró diseñar e implementar un circuito gobernado por un microcontrolador con un algoritmo sencillo que en base a la hora posiciona al reflector solar, logrando un bajo consumo de energía por parte del microcontrolador y circuito electrónico.

Se ha conseguido que el seguidor incline al reflector de la manera más perpendicular posible a los rayos solares. El cambio de inclinación se ha conseguido mediante el diseño de un circuito electrónico en el que se incluyen varios componentes, de los cuales el más importante es el microcontrolador PIC. Programando este microcontrolador se ha conseguido que el panel tenga en cada momento del día una aproximación bastante buena al ángulo óptimo. Esta aproximación corresponde con el ángulo horario y no supera el 5% de error en cuanto a captación de la radiación solar.

En definitiva, esta tesis consiste en un seguidor solar más ligero, con un coste de fabricación reducido y de buena calidad, para así obtener un sistema barato y bueno.

El prototipo construido puede ser utilizado en otras aplicaciones que requieran una actividad de seguimiento solar como paneles fotovoltaicos, colectores solares, entre otros.

## **MEJORAS Y TRABAJOS FUTUROS**

### **Control de las oscilaciones**

Con el diseño realizado hasta el momento se obtiene un buen funcionamiento si las condiciones climáticas son favorables, es decir si no hay viento. Cuando hay viento el mecanismo sufre oscilaciones muy grandes. Estas oscilaciones se pueden evitar instalando otro motor del mismo tipo del que ya está instalado para que las controle.

### **Seguidores solares de dos ejes**

El seguidor solar confeccionado en el presente trabajo fue de un sólo eje de seguimiento (eje de seguimiento en azimut), siendo el eje de elevación estático o fijo, pero con la posibilidad de moverlo manualmente según las distintas estaciones del año, sin embargo, sería interesante en un futuro trabajo de investigación en torno a esta materia, estudiar los seguidores solares de dos ejes, para entender su funcionamiento y dimensionar su eficiencia energética.

En teoría, al tener un seguidor solar de dos ejes, se obtiene una mayor cantidad de energía, debido a la gran precisión que estos poseen, ya que son capaces de concentrar o mantener centrado el haz de luz proveniente del sol en un solo punto durante el día, lo que sin lugar a dudas significa una gran capacidad de energía.

### **Sistemas de seguimiento con realimentación**

El seguidor solar construido en ésta tesis, fue implementado con un control de lazo abierto, es decir, sin realimentación, realizando el seguimiento del sol con un reloj de tiempo real y en base a la hora (admitiendo que el sol siempre pasa por la misma parte a una hora determinada).

Se trató de confeccionar un seguidor solar con realimentación (fototransistor), pero en un día nublado el seguidor se tornó inestable, ya que las nubes ocasionaban distintas zonas con gran luminosidad, por este motivo la idea

fue rechazada, además por razones comerciales, ya que el sensor tiene un costo, e implica limpiarlo (mantenimiento) cada cierto tiempo. Sin embargo, existen seguidores solares que poseen control de lazo cerrado, es decir, con realimentación, lo que permite conocer y corregir errores durante el seguimiento, claramente cuentan con sensores ópticos infrarrojos adecuados, capaces de seguir el sol incluso en un día nublado. Sería interesante en un trabajo futuro estudiarlos más a fondo y comparar ambos resultados, en términos de eficiencia energética, obviamente para esto se debería contar con sistemas con y sin realimentación, instalados bajo las mismas condiciones.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ESPINOZA, Josefina  
2008 “Historia y Evolución de la Energía Solar”. Santiago, 11 de agosto. Consulta: 20 de septiembre de 2011.  
<<http://pv-energiasolarhs.blogspot.com/>>
- [2] MENDIA, Félix  
2006 “Introducción de la cocina solar en la isla de la española”. Proyecto de Investigación. Ingeniería sin fronteras, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. Consulta: 20 de septiembre de 2011.  
<[http://cocinasolar.isf.es/pdf/Proy\\_invest.pdf](http://cocinasolar.isf.es/pdf/Proy_invest.pdf)>
- [3] BTA – PERÚ  
2002 “Evaluación de la población de rana gigante del lago, *Telmatobius culeus*”. Consulta: 25 de septiembre de 2011.  
<[http://www.altperubolivia.org/Web\\_Bio/PROYECTO/Docum\\_peru/21.22%20V3\\_P2.pdf](http://www.altperubolivia.org/Web_Bio/PROYECTO/Docum_peru/21.22%20V3_P2.pdf)>
- [4] ALMANZA, R. y MUÑOZ, F.  
1993 “Ingeniería de la energía solar”. Primera ed. México. El Colegio Nacional. 1993. p.p. 78 – 79.
- [5] ARIAS, Néstor E.  
2004 “Antenas con reflectores parabólicos”. Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, U.N.T. Consulta: 25 de septiembre de 2011.  
<<http://www.sisttel.com.ar/download/Antenas%20con%20reflectores%20parabolicos.pdf>>
- [6] FUNDACIÓN TIERRA  
2006 “Un reflector solar Scheffler único en el país”. Economía Solar. Consulta: 28 de septiembre de 2011.  
<<http://www.ecoterra.org/articulos57es.html>>
- [7] SOLARE BRUCKE  
2004 “Los reflectores Scheffler”. Consulta: 28 de septiembre de 2011. <<http://www.solare-bruecke.org/>>
- [8] POULEK, V  
1994 “Testing the new solar tracker with shape memory alloy actors” IEEE Trans. Photovoltaic Energy Conversion, 1994.

Conference Record of the Twenty Fourth; IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1131-1133 vol.1

- [9] HUANG, F.; TIEN, D. y OR, J.  
1998 "A microcontroller based automatic sun tracker combined with a new solar energy conversion unit". IEEE Trans. Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth, pp. 488-492 vol.1
- [10] BELTRAN, J.; GONZALEZ, J. y GARCIA, C.  
2007 "Design, manufacturing and performance test of a solar tracker made by an embedded control". IEEE Trans. Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2007. CERMA 2007, pp. 129–134
- [11] KOYUNCU, B. y BALASUBRAMANIAN, K.  
1991 "A microprocessor controlled automatic sun tracker". IEEE Trans. Consumer Electronics, IEEE Transactions on Volume 37, Issue 4, pp. 913 – 917
- [12] KONAR, A. y MANDAL, A.K.  
1991 "Microprocessor based automatic Sun tracker". IEEE Trans. Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings a Volume 138, Issue 4, pp. 237 – 241
- [13] YAZIDI, A.; BETIN, F.; NOTTON, G. y CAPOLINO, G.A.  
2006 "Low cost two-axis solar tracker with high precision positioning". IEEE Trans. Environment Identities and Mediterranean area, 2006. ISEIMA '06. First international Symposium, pp. 211 – 216
- [14] FIGUEROA FERNANDEZ, Alejandro  
2010 "Análisis, diseño y construcción de un seguidor solar para celdas fotovoltaicas" Proyecto de Titulación para optar al Título de Ingeniero de Ejecución en Electrónica. Santiago: Universidad Mayor, Facultad de Ingeniería. Consulta: 22 de octubre de 2011.  
<<http://www.ingenieria.cl/web/download/electronica/3.pdf>>
- [15] OSORIO R., Juan  
2010 "Diseño e implementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema fotovoltaico". Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Consulta: 22 de octubre de 2011.  
<<http://www.utp.edu.co/php/revistas/ScientiaEtTechnica/docs/FTP/245-250.pdf>>
- [16] SUNTRACK  
2007 Suntrack 5. Consulta: 22 de octubre de 2011.  
<<http://www.suntrack.es/castellano/modelos1.html>>
- [17] SDK SENDEKIA  
2007 SDK Tracker-Kit Seguidor solar a 2 ejes. Consulta: 22 de octubre de 2011.  
<[http://www.sendekia.com/pdf/Presentacion\\_TRACKER-KIT.pdf](http://www.sendekia.com/pdf/Presentacion_TRACKER-KIT.pdf)>

- [18] MECASOLAR  
2010 Suntrack 5. Consulta: 22 de octubre de 2011.  
<<http://www.mecasolar.com/pub/doc/File/ingl/Manual%20MS-2%20Tracker%20v%204.1.pdf>>
- [19] BIO-SOL  
2010 BIO-SOL BIO 1. Consulta: 22 de octubre de 2011.  
<[http://www.bio-sol.net/productos/seguidor\\_solar.htm](http://www.bio-sol.net/productos/seguidor_solar.htm)>
- [20] LORENTZ  
2010 ETATRACK active 1500-A. Consulta: 22 de octubre de 2011.  
<[http://www.bio-sol.net/productos/seguidor\\_solar.htm](http://www.bio-sol.net/productos/seguidor_solar.htm)>
- [21] PALLÁS ARENY, Ramón  
2003 “Sensores y acondicionadores de señal”. Cuarta Edición.  
Barcelona: MARCOMBO S.A.
- [22] PALACIOS, Enrique; REMIRO, Fernando y LOPEZ, Lucas  
2009 “Microcontrolador PIC16f84”. Tercera Edición. Madrid: RA-MA
- [23] JOYANES, Luis  
1999 “Programación En C++”, Primera Edición. Barcelona:  
McGraw-Hill
- [24] SOLAR COOKERS INTERNACIONAL  
2005 “Las cocinas solares cubren todos los Objetivos de Desarrollo  
del Milenio de la ONU”. Consulta: 29 de octubre de 2011.  
<<http://solarcooking.org/espanol/mdg-goals-span.htm>>
- [25] GIBRAM  
2009 Comentario del 28 de mayo a “Seguidor solar-programación”.  
Solarweb.net. Consulta: 1 de noviembre de 2011.  
<<http://www.solarweb.net/forosolar/attachments/aspectos-tecnicos/1017d1243524208-seguidor-solar-programacion-ecuaciones.doc>>
- [26] VALLO, Martin y HOFF, Joachim  
2004 “Sunrise”. Consulta: 1 de noviembre de 2011.  
< [http://131.173.116.141/PV-Anlage/sunrise/sunrise\\_es.html](http://131.173.116.141/PV-Anlage/sunrise/sunrise_es.html)>