



**UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN**

---

**CAMPUS LOMA BONITA**

**INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE  
CONTROL DE SEGUIMIENTO SOLAR PARA  
UN MODELO A ESCALA BASADO EN LAS  
ECUACIONES SOLARES**

Tesis profesional para obtener el título de  
**INGENIERO EN MECATRÓNICA**

Presenta:

**C. JOSÉ ALFREDO GARCÍA ESPINOSA**

Asesor de tesis:

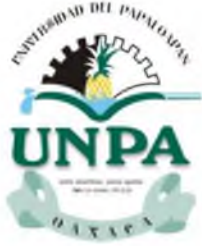
**Dr. RAFAEL CASTILLO RINCÓN**

Co-Asesor de tesis:

**Dr. Francisco Gutiérrez Zainos**

**LOMA BONITA, OAX.**

**ABRIL 2016**



# UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

## CAMPUS LOMA BONITA

### INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

LA PRESENTE TESIS TITULADA "IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL DE SEGUIMIENTO SOLAR PARA UN MODELO A ESCALA BASADO EN LAS ECUACIONES SOLARES." PRESENTADA POR EL SUSTENTANTE DE LICENCIATURA C. JOSÉ ALFREDO GARCÍA ESPINOSA BAJO LA DIRECCION DEL DR. RAFAEL CASTILLO RINCÓN, HA SIDO REVISADA Y ACEPTADA POR EL COMITE EXAMINADOR PARA SER DEFENDIDA EN EL EXAMEN PROFESIONAL Y OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA.

---

*M. en C. José Luis Nájera Sánchez.*  
Jefe de la carrera de Ingeniería en  
Mecatrónica.

---

*Dr. Rafael castillo Rincón.*  
Asesor de tesis.

---

*M. en C. Esteban Chávez Conde.*  
Presidente.

---

*Dr. Álvaro Cabrera Amado*  
Secretario.

---

*Dr. Rafael Castillo Rincón.*  
Vocal.

Loma Bonita, Oaxaca, Abril 2016



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

---

CAMPUS LOMA BONITA

INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL  
DE SEGUIMIENTO SOLAR PARA UN MODELO A ESCALA  
BASADO EN LAS ECUACIONES SOLARES**

Tesis que presenta el

**C. José Alfredo García Espinosa**

Para obtener el título de

**Ingeniero en Mecatrónica**

Asesor de Tesis:

**Dr. Rafael Castillo Rincón**

Co-Asesor de tesis:

**Dr. Francisco Gutiérrez Zainos**

Loma Bonita, Oaxaca. Abril del 2016

# Dedicatoria

*A mis padres, Hermanos y Esposa.*

# Agradecimientos

**A Dios:** Por mantenerme siempre por el camino correcto, por darme todas esas cosas buenas que me han marcado la vida.

**A mis Padres:** A ti papá, a ti mamá que han sido los mejores padres y los mejores amigos del mundo, por el apoyo incondicional, por su amor y cariño, por los buenos consejos y sobre todo por regalarme la mejor herencia del mundo.

**A mi Esposa:** Por ser parte de mi vida y por hacerme muy feliz, por estar conmigo en esos buenos y malos momentos, por el apoyo que me has dado y por tu comprensión.

**A mi amigo Chalo:** Por todo el apoyo incondicional que me has brindado, por tus consejos, y sobre todo por ser un buen amigo.

**Al Asesor de Tesis:** Por todo el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

**A los Sinodales:** Por tomarse el tiempo para la revisión de este trabajo y por sus observaciones y consejos.

**A Todos mis Maestros:** Sin excepción alguna que formaron parte importante de mi formación académica.



## Resumen

En este documento se presenta la implementación de una estrategia de control de seguimiento solar para un modelo a escala basado en las ecuaciones solares. Para este fin se desarrolló un sistema de seguimiento solar de dos grados de libertad de uniones tipo revoluta. El desarrollo incluyó la construcción, instrumentación, calibración y puesta en operación del equipo experimental.

Para la construcción del sistema de seguimiento se consideró la implementación de dos grados de libertad debido a que el recorrido aparente del sol está restringido a moverse sobre el plano horizontal y vertical de la Tierra, por lo que para obtener la posición del sol en todo momento se necesitó dos parámetros angulares como el ángulo de elevación solar  $\alpha_s$  y el ángulo de azimut solar  $\gamma_s$ .

En la etapa de instrumentación se colocó un potenciómetro de precisión en cada grado de libertad para medir la posición angular del sistema durante el seguimiento. Así también en el efector final del sistema de seguimiento se colocó un sensor de radiación solar Piranómetro Kipp & Zonen, el cual se utilizó para adquirir los valores de radiación y poder compararlos con los valores de radiación tomados por la estación meteorológica de la Universidad del Papaloapan campus Loma Bonita Oaxaca.

Para la calibración del sistema se realizaron pruebas experimentales las cuales consistieron en la obtención de la relación Ángulo-Voltaje de los potenciómetros. Debido a la linealidad que presentan estos dispositivos se logró obtener una ecuación que describe confiablemente dicha relación. Así también sobre una superficie horizontal se marcó el sistema de coordenadas Norte-Sur Este-Oeste sobre el cual se colocó el seguidor y se ajustaron a cero ambos grados de libertad.

Una vez calibrado el sistema, se realizaron dos pruebas experimentales las cuales consistieron en llevar a cabo el seguimiento del sol en el intervalo de tiempo de las 8:30 am hasta las 18:00 pm. La primera prueba se realizó el 1 de Julio 2015 y la segunda se llevó a cabo el 18 de Septiembre del mismo año. Con base a los resultados obtenidos se encontró que el sistema de control implementado en el modelo a escala de seguimiento solar tuvo un desempeño satisfactorio debido a que la ganancia de energía solar fue del 27 % en comparación con un sistema fijo colocado horizontalmente. Además se encontró que el error de posición para ambos grados de libertad fue menor a  $\pm 1^\circ$ .

## Abstract

This document presents the implementation of a strategy for control of solar tracking by a scale model based on solar equations. For this reason a solar tracking system with two degrees of freedom and revolution type joints was developed. The development included the construction, instrumentation, calibration and the putting of the experimental equipment into operation.

For the construction of the tracking system the implementation of two degrees of freedom was considered due to the fact that the apparent movement of the Sun is restricted to moving on the horizontal and vertical plane of the Earth. To obtain the position of the Sun at all times two angular parameters were needed as an angle of solar elevation  $\alpha_s$  and the solar angle azimuth  $\gamma_s$ .

In the instrumentation phase a precision potentiometer was placed in each degree of freedom to measure the system's angular position during tracking. A radiation sensor pyranometer Kipp & Zonen was placed at the end of the effector of the tracking system as well, which was used to acquire the radiation values in comparison with the radiation values taken by the meteorological station of the University of The Papaloapan, Oaxaca Campus Loma Bonita.

For the calibration of the system experimental testing was performed which consisted of obtaining the relationship between the angle-voltage of the potentiometers. Due to the linearity that these devices present an equation was obtained that reliably describes this relationship. The coordinate system was also marked on a horizontal surface North- South, East- West, in which the tracker was placed and both were adjusted to zero degrees of freedom.

Once the system was calibrated, two experimental test were performed which consisted of realizing the solar tracking system with time intervals of 8:00 am- 6:00 pm. The first test was performed on July 1<sup>st</sup> 2015 and the second was carried out September 18<sup>th</sup> of the same year. Based on the results, it was found that the control system implemented on the scale model of the solar tracking system had satisfactory performance due to the gain of solar power which was 27% in comparison with a fixed system placed horizontally. Additionally, it was also found that the error in position of both degrees of freedom was less than  $\pm 1^\circ$ .

**Revision of abstract by:** JEFA DEL CENTRO DE IDIOMAS, UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN,  
CAMPUS LOMA BONITA, OAXACA.  
Cheryl Linn Gad.  
**Date:** February 22nd, 2016

# Índice

	Pág.
<b>Lista de Figuras.</b>	iii
<b>Lista de Tablas.</b>	vi
<b>Nomenclatura.</b>	vii
	Pág.
<b>CAPÍTULO 1. Introducción.</b>	1
<b>1.1 Generalidades.....</b>	2
<b>1.2 Revisión bibliográfica.....</b>	5
<b>1.2.1 Tipos de seguidores solares.....</b>	5
<b>1.2.2 Técnicas de control aplicadas a seguidores solares.....</b>	7
<b>1.2.3 Trabajos referentes a la incertidumbre de posicionamiento.....</b>	11
<b>1.2.4 Conclusión de la revisión bibliográfica.....</b>	13
<b>1.3 Objetivos.....</b>	13
<b>1.3.1 Objetivo general.....</b>	13
<b>1.3.2 Objetivos particulares.....</b>	13
<b>1.4 Estructura de la tesis.....</b>	14
 <b>CAPÍTULO 2. Modelos de estudio.</b>	 15
<b>2.1 Modelo físico.....</b>	16
<b>2.2 Modelo matemático.....</b>	17
<b>2.2.1 Ángulo de declinación de la tierra.....</b>	17
<b>2.2.2 Ecuación del tiempo.....</b>	19
<b>2.2.3 Hora solar.....</b>	20
<b>2.2.4 Ángulo Horario.....</b>	20
<b>2.2.5 Horas luz.....</b>	20
<b>2.2.6 Ángulo Azimut Solar y Ángulo de Altura Solar.....</b>	21
<b>2.3 Modelo experimental.....</b>	22

2.3.1 Metodología para evaluar la posición solar.....	23
2.4 Modelo de control.....	25
<b>CAPÍTULO 3. Equipo experimental.</b>	27
3.1 Diseño del experimento.....	28
3.2 Construcción del equipo experimental.....	30
3.3 Instrumentación del equipo experimental.....	41
3.4 Diseño del algoritmo de control en la plataforma de Arduino.....	47
3.5 Calibración y puesta en operación del equipo experimental.....	49
<b>CAPÍTULO 4. Resultados experimentales.</b>	50
4.1 Evaluación del sistema para dos días del año.....	51
4.2 Evaluación de la incertidumbre de control.....	55
4.3 Estudio comparativo del comportamiento diario del seguidor solar respecto a una referencia.....	57
<b>CAPÍTULO 5. Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.</b>	62
5.1 Conclusiones.....	63
5.2 Recomendaciones para trabajos futuros.....	64
<b>Bibliografía.....</b>	65
<b>Apéndice A. Planos Constructivos.....</b>	68
<b>Apéndice B. Diagrama de Conexión para el hardware de Control.....</b>	79
<b>Apéndice C. Algoritmo de Control.....</b>	81

## Lista de Figuras

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
2.1	Espécimen de referencia con parámetros angulares.	16
2.2	Inclinación del planeta Tierra en Solsticio de Verano.	17
2.3	Inclinación del planeta Tierra en Solsticio de Invierno.	17
2.4	Inclinación del planeta Tierra en Equinoccio de Primavera y Otoño.	18
2.5	Variación anual de la declinación $\delta$ del planeta Tierra.	18
2.6	Diferencia de minutos entre la HS y HC anual.	19
2.7	Trayectoria del sol durante los Solsticios y Equinoccios.	22
2.8	Sistema y ángulos para el seguimiento del sol.	23
2.9	Metodología para evaluar la posición solar.	24
2.10	Diagrama de flujo para el control de posición del seguidor solar.	26
3.1	Esquema del banco de pruebas para la evaluación del sistema de control.	29
3.2	Plataforma del seguidor solar.	30
3.3	Base para el soporte de los rodamientos para el grado de libertad $\Omega$ .	31
3.4	Rodamiento 6302-2RS montado sobre la base.	31
3.5	Base porta rodamientos sujeta a la plataforma del seguidor solar.	31
3.6	Soporte para el brazo principal del sistema.	32
3.7	Eje del grado de libertad $\Omega$ .	32
3.8	Montaje del eje del grado de libertad $\Omega$ .	33
3.9	Brazo principal del sistema de seguimiento.	33
3.10	Montaje del brazo principal.	34
3.11	Rodamiento 6200Z montado sobre la base para el grado de libertad $\Psi$ .	35
3.12	Montaje de la base porta rodamiento del grado de libertad $\Psi$ .	35
3.13	Eje del grado de libertad $\Psi$ .	35

---

<b>3.14</b>	Montaje del eje del grado de libertad $\Psi$ .	<b>35</b>
<b>3.15</b>	Brazo secundario izquierdo.	<b>36</b>
<b>3.16</b>	Brazo secundario derecho.	<b>36</b>
<b>3.17</b>	Soporte para el espécimen de referencia.	<b>36</b>
<b>3.18</b>	Montaje de los brazos secundarios.	<b>37</b>
<b>3.19</b>	Base para los potenciómetros.	<b>37</b>
<b>3.20</b>	Soporte para la base del potenciómetro del grado de libertad $\Psi$ .	<b>37</b>
<b>3.21</b>	Base para el motor del grado de libertad $\Psi$ .	<b>38</b>
<b>3.22</b>	Soporte para la base del motor del grado de libertad $\Psi$ .	<b>38</b>
<b>3.23</b>	Engrane para el eje de los motorreductores.	<b>38</b>
<b>3.24</b>	Engrane para el eje de los dos grados de libertad del sistema.	<b>39</b>
<b>3.25</b>	Sistema de seguimiento solar ensamblado.	<b>40</b>
<b>3.26</b>	Potenciómetro adaptado al grado de libertad $\Omega$ .	<b>41</b>
<b>3.27</b>	Potenciómetro adaptado al grado de libertad $\Psi$ .	<b>41</b>
<b>3.28</b>	Etapas experimentales para la obtención de la relación Voltaje-Ángulo.	<b>42</b>
<b>3.29</b>	Relación Voltaje-Ángulo para el grado de libertad $\Omega$ .	<b>43</b>
<b>3.30</b>	Relación Voltaje-Ángulo para el grado de libertad $\Psi$ .	<b>44</b>
<b>3.31</b>	Tarjeta ARDUINO MEGA 2560.	<b>45</b>
<b>3.32</b>	Módulo de potencia L298N.	<b>46</b>
<b>3.33</b>	Reloj de tiempo real DS1302.	<b>46</b>
<b>3.34</b>	LCD 16x2.	<b>47</b>
<b>4.1</b>	Comportamiento de la radiación solar correspondiente al 1 de Julio 2015.	<b>52</b>
<b>4.2</b>	Comportamiento de la radiación solar correspondiente al 18 de Septiembre 2015.	<b>54</b>
<b>4.3</b>	Sistema de seguimiento orientado en dirección del sol.	<b>56</b>
<b>4.4</b>	Recorrido del sol correspondiente al 1 de Julio 2015.	<b>59</b>

<b>4.5</b>	Recorrido del sol correspondiente al 18 de Septiembre 2015.	<b>60</b>
<b>4.6</b>	Visualización del recorrido del sol.	<b>61</b>
<b>B.1</b>	Conexión del hardware de control.	<b>80</b>

## Lista de Tablas

<b>Tabla</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
<b>4.1</b>	Valores promedio de radiación solar captado el 1 de Julio 2015 y ganancia de energía.	<b>53</b>
<b>4.2</b>	Valores promedio de radiación solar captado el 18 de Septiembre 2015 y ganancia de energía.	<b>55</b>
<b>4.3</b>	Comparativa entre los ángulos de referencia y los calculados correspondientes al 1 de Julio 2015.	<b>57</b>
<b>4.4</b>	Comparativa entre los ángulos de referencia y los calculados correspondientes al 18 de Septiembre 2015.	<b>58</b>

## Nomenclatura

Variables	Descripción	Unidades
ET	Ecuación del tiempo.	S
E	Eje coordenado Este.	Adimensional
$e_p$	Error de posición.	°
$G_{RS}$	Ganancia de radiación solar.	$\frac{W}{m^2}$
HC	Hora civil.	S
HL	Horas luz.	S
HPS	Hora de la puesta del sol.	S
HS	Hora solar.	S
HSS	Hora de salida del sol.	S
MIN	Minutos de la hora civil.	S
N	Eje coordenado Norte.	Adimensional
N	Número de días transcurridos durante un año	Adimensional
O	Eje coordenado Oeste.	Adimensional
$R_{sem}$	Radiación solar captada por la estación meteorológica.	$\frac{W}{m^2}$
$R_{SSS}$	Radiación solar captada con la implementación del sistema de seguimiento.	$\frac{W}{m^2}$
S	Eje coordenado Sur.	Adimensional
SEG	Segundos de la hora civil.	S
Z	Eje coordenado Zenit.	Adimensional

### Símbolos

$\delta$	Ángulo de declinación del planeta Tierra.	°
$\beta$	Posición angular del planeta Tierra.	°

$W$	Ángulo horario.	°
$\theta_z$	Ángulo Zenit.	°
$\phi$	Latitud del lugar en cuestión.	°
$\lambda_{mlc}$	Longitud del meridiano del lugar en cuestión.	°
$\lambda_{ms}$	Longitud del meridiano estándar.	°
$\alpha_s$	Ángulo de elevación del sol.	°
$\alpha_{sr}$	Ángulo de elevación del sol de referencia.	°
$\gamma_s$	Ángulo de azimut solar.	°
$\gamma_{sr}$	Ángulo de azimut solar de referencia.	°
$\Omega$	Grado de libertad de azimut solar.	Adimensional
$\Psi$	Grado de libertad de elevación solar.	Adimensional

# Capítulo 1

## Introducción.

En este capítulo se presentan las generalidades y la revisión bibliográfica acerca de los tipos de seguidores solares, técnicas de control aplicadas a seguidores solares y trabajos referentes a la incertidumbre de posicionamiento en el seguimiento solar. En la revisión bibliográfica se enfatiza sobre las diferentes estrategias de control que se han realizado e implementado en sistemas de seguimiento solar y cuál es el error de posicionamiento que han tenido estos sistemas. Finalmente, se presentan los objetivos de este trabajo y una descripción de la estructura de la tesis.

## 1.1 Generalidades.

El aprovechamiento racional de energía es un aspecto de estudio tanto en México como en el mundo. Esto se presenta debido a que la energía proveniente de los combustibles fósiles (petróleo, carbón mineral y gas natural) son recursos finitos que inexorablemente van a agotarse; de ahí su denominación de "*recursos no renovables*". Afortunadamente, existen también las energías renovables, que se definen como formas de energía que tienen una fuente prácticamente inagotable con respecto al tiempo de vida de un ser humano, y cuyo aprovechamiento es técnicamente viable. Sin embargo, existen diversas fuentes alternativas de energía, dentro de las cuales la energía solar es una de las más importantes, ya que se considera como una fuente limpia, inagotable y sustentable es decir, que no produce contaminación en su proceso de aprovechamiento (Sierra *et al*, 2008).

El Sol es la fuente principal de energía del planeta, la temperatura y presión en el interior del Sol da origen a reacciones nucleares que liberan enormes cantidades de energía que llega a nuestro planeta de forma directa o difusa reflejada en las partículas de la atmósfera, en las nubes y demás objetos en el ambiente (Clark, 2004).

La cantidad de energía solar recibida anualmente por la tierra es de  $1,5 \times 10^{18}$  KWh, esto representa 10,000 veces el consumo de energía en ese mismo periodo, por lo que el sol es considerado como una fuente inagotable de energía que puede ser aprovechada mediante un adecuado sistema de captación y conversión a otro tipo de energía (Lamaison, 2009).

Existen dos formas para realizar la transformación de energía solar a otra tipo de energía, la primera es mediante sistemas fotovoltaicos y la segunda por sistemas fototérmicos o procesos térmicos.

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que concurren para captar la energía solar disponible y transformarla en energía eléctrica. Estos sistemas independientemente de su utilización y del tamaño de

potencia, pueden ser utilizados en instalaciones de electrificación autónoma o interconectados a la red, además de otras aplicaciones más específicas (Casas, 2012). Una de las desventajas de estos sistemas es que para su implementación requiere de una fuerte inversión de dinero, así mismo presenta una baja eficiencia (15%) en la captación y transformación de energía solar (panel solar) a energía eléctrica por lo que requiere mayores áreas de captación para compensar estos problemas. Es importante agregar que los paneles solares al término de su vida útil representan un peligro para el medio ambiente debido a la contaminación que representan los residuos químicos que estos contienen en sus celdas de transformación.

Por otra parte los sistemas fototérmicos son los dispositivos diseñados para captar la radiación solar y convertirla en calor para posteriormente transferir este calor a un fluido de trabajo. Estos sistemas tienen diversas aplicaciones en la industria tales como la generación de vapor para el movimiento de turbinas y así producir energía eléctrica limpia, para lavado de botellas, pasteurización, balnearios entre otros.

Para lograr el máximo aprovechamiento de la energía solar, es necesario no solo contar con un transformador solar eficiente (60% al 80%), sino que también con equipos apropiados que permitan posicionarlo de manera directa al sol, para lograr este objetivo se requiere del uso de un sistema de seguimiento solar, ya que este permite posicionar al transformador solar (Colector solar parabólico) para que reciba la máxima cantidad de radiación en todo momento del día (Castellanos, 2011).

Un seguidor solar es un dispositivo conformado básicamente por una parte fija y una móvil, cuyo objetivo es posicionar a una superficie para lograr la máxima captación de radiación solar durante el intervalo de movimiento en las horas luz del día.

Para poder realizar con eficiencia el trabajo de seguir al sol, estos dispositivos deben contar con una alta precisión y una baja incertidumbre en cuanto al posicionamiento respecto al sol, por lo que algunos diseños utilizan fotosensores, y otros utilizan algoritmos astronómicos. Los seguidores solares que utilizan fotosensores tienen una fuerte

dependencia de la intensidad de luz solar y de las condiciones atmosféricas del lugar donde sean colocados, por lo que estos son pocos utilizados ya que el desempeño de estos no es constante. Por otro lado los seguidores solares que utilizan un algoritmo para calcular la posición del sol son más precisos y de muy bajo costo, debido a que se utilizan microcontroladores para realizar el cálculo y el control (Shoukun *et al* 2011).

Actualmente en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (cenidet) se está desarrollando un laboratorio de energía solar donde se caracterizan dispositivos fototérmicos y sistemas vidriados. Este laboratorio cuenta con una plataforma con seguimiento solar que permite la realización de pruebas térmicas al exterior de componentes de edificaciones con diferentes ángulos de incidencia solar y de dispositivos fototérmicos (colectores solares). Esta plataforma fue diseñada y construida por el Dr. Castillo (cenidet) y por el Dr. Macias (cenidet) basándose en una metodología de diseño mecánico. Para comprobar la funcionalidad del diseño, el Dr. Castillo implemento un modelo a escala del seguidor solar, donde se utilizó un control para el posicionamiento por fricción mecánica, concluyendo que si se realiza un control automático de posicionamiento se logra obtener la máxima cantidad de radiación solar incidente con baja incertidumbre en el plano del seguidor. Es por ello que se presenta la oportunidad de poder aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera como ingeniero Mecatrónico para llevar a cabo mi trabajo de tesis referente a la implementación de un sistema de control para un modelo a escala de seguimiento solar basado en un algoritmo que calcula la posición del sol en función de las ecuaciones del tiempo. Con este tipo de control se espera que su implementación resulte de gran precisión en la predicción de la ubicación del sol en todo momento.

## **1.2 Revisión bibliográfica.**

En esta sección se presentan los trabajos revisados que comprenden los estudios sobre los tipos de seguidores solares, las estrategias de control aplicados a seguidores solares y los trabajos referentes a la incertidumbre de posicionamiento.

### **1.2.1 Tipos de seguidores solares**

Pintos (2010) llevó a cabo el diseño y construcción de un seguidor solar de un grado de libertad diseñado para las cubiertas de los edificios. Este seguidor presenta un diseño mecánico muy particular, el soporte del panel solar consiste en dos pares de láminas elásticas colocadas en C de manera invertida, de tal forma que por su colocación permiten inclinar al captador solar a lo largo del plano este-oeste. El movimiento se realiza mediante hilos de acero que están atados en el borde del panel, los cuales son tensados mediante un par de poleas para permitir el desplazamiento de manera fácil y tiran de este gracias al movimiento que realiza un motor de corriente directa. Con el diseño de este tipo de mecanismo se concluyó que permite un seguimiento continuo del sol pero presenta inconvenientes cuando hay presencia de viento dado que el sistema presenta oscilaciones e impide su funcionamiento.

Prieto & Batlle (2011) realizaron el diseño de un seguidor de dos grados de libertad para mover un generador solar de 600 W con lentes de Fresnel. El seguidor cuenta con una columna metálica en donde descansa la estructura del seguidor el cual esta empotrado a una columna de hormigón. Sobre la columna metálica está colocada un cilindro o camisa metálica las cuales están separadas por dos discos de teflón para garantizar el giro del primer grado de libertad del sistema. En la parte superior de la camisa metálica se adaptó una estructura en forma de U con un par de rodamientos en donde se acopló un eje para obtener el segundo grado de libertad. La transmisión de movimiento lo realizaron mediante el acoplamiento de engranes y tornillo sin fin, esto para evitar los posibles movimientos por el viento y sobre todo que este tipo de engranajes proporcionan grandes reducciones de velocidad. El tipo de motor que ocuparon fue de corriente directa con imanes permanentes unidos a reductores epicicloidales los cuales son ideales para el movimiento del seguidor

debido a que permiten la inversión del sentido de giro y soportan grandes cargas al arranque. El diseño de este tipo de sistema de seguimiento tuvo un funcionamiento fiable, independientemente de la acción del viento

Tejada & Motoche (2012) presentaron el diseño mecánico de un seguidor solar de un grado de libertad. La base de la estructura está elaborada de hierro, con ángulos y cuadrados de 1 pulgada. La forma de la estructura es como el de un banco de pruebas el cual tiene dos niveles, en la parte inferior está colocada una placa para la colocación de los dispositivos de control, en la parte superior se encuentra la estructura donde se coloca el captador solar. Esta estructura está adaptada a un eje la cual descansa en un par de chumaceras que permite el movimiento giratorio de E-O. El movimiento del sistema lo ejerce un motor de corriente directa con motoreductor, debido a que cuenta con un mecanismo piñón-sinfin lo que le da una ganancia de fuerza y una reducción de velocidad. Una de las ventajas del diseño mecánico es que es de bajo costo y no presenta inconvenientes en el seguimiento debido a vientos u otra perturbación externa.

Pineda *et al.*, (2014) presentaron el diseño de un seguidor solar de dos grados de libertad de tipo activo denominado TFP-ITL (Tracker Fotovoltaico de Posgrado del Instituto tecnológico de la Laguna). El cual fue diseñado para una serie de paneles solares con medidas que van desde los 420x420x25 mm de 2.5 kg de peso hasta los 1640x992x35 mm de 18.6 kg de peso. El material que se utilizó para el diseño del seguidor fue acero estructural A-36, comúnmente conocido como acero comercial. Para las pruebas de deformación, desplazamientos y tensiones de la estructura ocuparon el software SolidWorks® Premium donde se comprobó que los desplazamientos y tensiones en la estructura del seguidor eran mínimos. Del trabajo concluyeron que el seguidor ofrece varias ventajas tales como practicidad de ensamble, compatibilidad con distintos tamaños de paneles, manufactura económica, resistentes a cualquier tipo de clima y sobre todo la oportunidad de tener dos grados de libertad.

### 1.2.2 Técnicas de control aplicadas a seguidores solares

Yousef (1999) diseñó e implementó una estrategia de control por lógica difusa para posicionar a un sistema de seguimiento solar de dos grados de libertad con la finalidad de mejorar la potencia de salida de los paneles solares. En este trabajo, el autor presenta una estrategia de control mediante una PC a través de una tarjeta de adquisición de datos en la cual la señal de los fotosensores indican la posición del sol para que posteriormente al compararse se obtenga la señal del error y con base a ella obtener la señal de control que activa a los motores de corriente directa y posiciona al sistema de seguimiento solar. La implementación de esta estrategia de control les permitió obtener un buen desempeño del sistema de seguimiento debido a la dinámica no lineal y a la falta de disponibilidad de los parámetros del modelo que presentaba dicho sistema.

Beltrán (2007) llevó a cabo el desarrollo de un prototipo fotovoltaico con seguimiento del sol para procesos electroquímicos. En su trabajo, el autor presenta el diseño de un seguidor solar con dos grados de libertad para obtener la máxima captación de energía solar. Para controlar el sistema de seguimiento utilizó un microcontrolador PIC16F877 donde programó las sentencias de control en función de los planos de la trayectoria del sol, de la fecha y de la hora. El funcionamiento básico del control consistía en actualizar la posición del sol cada 15 minutos iniciando a partir de las 8:00 am y finaliza a las 4:00 pm, tiempo controlado por un reloj de tiempo real DS12887. Esta metodología les permitió obtener un error de posicionamiento menor a  $4^\circ$ . Una de las desventajas que presenta el sistema de control fue la incapacidad del microcontrolador de evaluar funciones trigonométricas de manera directa. Otra desventaja es que el sistema de control no almacena la información de su última posición en caso de fallas de energía, ya que al ocurrir estos eventos el seguidor solar regresaba a su posición de inicio y a partir de ese punto el seguidor se posicionaba nuevamente.

Lane (2008) implementó un sistema de control para un seguidor solar de un grado de libertad. Este sistema está compuesto por la etapa de instrumentación, etapa de la lógica de control y la etapa de circuito de potencia. Para la construcción de la segunda etapa se utilizó el microcontrolador PIC16F877 debido a que internamente cuenta con un

convertidor analógico-digital para la conversión de la señal de entrada proveniente de los sensores de luz LDR (*Light Dependent Resistor*), y además ofrece la ventaja de poder controlar la rotación de un motor a pasos unipolar mediante cuatro canales independientes en configuración como salida. El lenguaje de programación que se utilizó para realizar el algoritmo de control fue el lenguaje ensamblador. La ventaja que obtuvo con la implementación de este sistema de control fue una mayor captación de energía solar con respecto a un sistema fijo. Tres de las desventajas del sistema implementado, es que el seguidor debe ser ajustado manualmente antes de que inicie el seguimiento del sol, presenta movimientos erróneos cuando algún fenómeno físico se presenta (nubosidad) y además errores de posicionamiento.

Patole *et al.*, (2008) desarrollaron e implementaron un sistema de seguimiento solar bidireccional de un solo grado de libertad. El movimiento del sistema E-O se realiza mediante una transmisión de motor de corriente directa y banda dentada. Para el control ocuparon el microcontrolador LPC 2148 en donde realizaron las estrategias de control para producir una señal PWM (*Pulse Width Modulation*) que es proporcional a la variación de la cantidad de luz incidente por los sensores LDR (*Light Dependent Resistor*) y así poder controlar la dirección del motor. Cabe mencionar que con la implementación del control se obtuvo un mejor desempeño del sistema aumentando la eficiencia en cuanto a captación de energía se refiere para un día soleado de verano, además el costo total de la construcción del sistema de seguimiento es muy bajo con respecto a otros seguidores solares comerciales.

Arafat *et al.*, (2010) llevaron a cabo el diseño y construcción de un sistema de seguimiento solar automático. El diseño que presentan está integrada por tres etapas, la etapa de instrumentación, la etapa de control y la etapa de potencia. La primera etapa fue diseñada a base de fotorresistencias conectadas en serie con una resistencia fija para obtener un divisor de voltaje y así poder tener una señal proporcional a la cantidad de luz incidente en las fotorresistencias. Para la segunda etapa ocuparon el microcontrolador ATMEGA32 debido a cuenta con comparadores analógicos, convertidores A/D, temporizadores entre otras especificaciones. En este microcontrolador se realizó la estrategia de control la cual realiza comparaciones entre el valor digital obtenido de la

diferencia entre las señales proporcionadas por las fotorresistencias y un valor de umbral. Dependiendo del resultado el microcontrolador decide hacer girar el motor o simplemente no ejecuta algún proceso. También esta estrategia de control valida si la presencia de luz en el cielo es la necesaria para poder realizar el seguimiento del sol. Para la tercera etapa ocuparon motores a pasos de tipo unipolar debido a que se tiene un mayor control en el giro del motor. Los resultados que obtuvieron con este diseño fueron muy satisfactorios ya que lograron una mayor precisión del sistema.

Ozuna *et al.*, (2010) propusieron y evaluaron mediante simulación matemática, un sistema difuso de seguimiento solar de dos grados de libertad para celdas solares fotovoltaicas. El sistema de control difuso consiste en comparar dos señales producidas por dos sensores foto resistivos para el grado de libertad horizontal norte-sur, sur-norte y dos sensores foto resistivos para el grado de libertad vertical norte-sur, sur-norte, en el cual dependiendo del resultado activa el motor del grado de libertad correspondiente hasta obtener el mismo valor de voltaje en los sensores. Las gráficas que se obtuvieron muestran las trayectorias para la posición de ambos grados de libertad las cuales demostraron que los motores tuvieron un buen desempeño y que además el sistema es estable. Cabe mencionar que las ecuaciones para ambos motores de corriente directa, las entradas de voltajes de los sensores y el microcontrolador fueron simulados en el software de Matlab y Simulink.

Valencia & Rosero (2012) realizaron el diseño de un sistema computacional para optimizar la generación de potencia de un sistema fotovoltaico autónomo. El diseño que presentan es un sistema de control de lazo cerrado conformado por su etapa de instrumentación, etapa de control y la etapa de potencia. Para la etapa de instrumentación ocuparon dos divisores de tensión conformado por una resistencia dependiente de luz LDR en serie con una resistencia fija de 10 K $\Omega$ . Para la etapa de control utilizaron el kit de desarrollo DE0 NANO de la empresa Altera el cual es una plataforma de desarrollo de FPGA (*Field Programmable Gate Array*) de tamaño compacto, adecuado para diseños de circuitos prototipos como robots y proyectos portátiles. En dicha plataforma llevaron a cabo el algoritmo de control programado en lenguaje VHDL (*Hardware Description Language*) por su simplicidad dado que es similar al lenguaje de C. El programa o algoritmo de control consiste en una verificación constante de ambas lecturas proporcionadas por los sensores

para obtener una diferencia de voltajes y así poder comparar con un offset al que los autores llamaron error diferencial. El algoritmo de control toma decisiones tales como activar la etapa de potencia para hacer girar al motor de corriente directa en sentido horario, anti horario o simplemente no actuar dependiendo del resultado obtenido. El desempeño que tuvo el sistema de seguimiento fue el esperado, ya que mediante una gráfica Potencia-Tiempo se comparó la respuesta de un sistema fijo a  $90^\circ$ , un sistema con una inclinación fija a  $30^\circ$  y el sistema propuesto, demostrando que el sistema propuesto tuvo un promedio de potencia mayor que las otras a lo largo del día.

Guo *et al.*, (2013) llevaron a cabo el diseño y simulación de un sistema de seguimiento solar de un grado de libertad. Para la parte de simulación utilizaron la herramienta Simulink de Matlab®. Para el control del sistema realizaron algoritmos de control que fueron programados en un microcontrolador. Dicha sentencia involucraba una verificación constante de la variación de voltajes de entrada proporcionadas por dos celdas de bajo voltaje. Cuando las tensiones en las celdas no eran iguales el microcontrolador activaba el motor a pasos en la dirección correspondiente hasta lograr que ambas celdas tuvieran el mismo valor de voltajes. Los resultados que obtuvieron fueron satisfactorios debido al incremento de energía captada con el sistema de seguimiento en comparación con un sistema fijo.

Rodríguez *et al.*, (2013) diseñaron un control digital de un seguidor solar para la medición de radiación solar en Bogotá, Colombia. Para realizar el diseño del control digital fue necesario realizar pruebas experimentales con el fin de obtener la respuesta característica del sistema de seguimiento misma que se obtuvo con el software Matlab Simulink. Con esta información se logró construir un modelo matemático que describe la dinámica del sistema de seguimiento la cual se validó y observaron una señal semejante a la señal original. Sin embargo la respuesta del sistema no fue tan satisfactoria debido a que el tiempo estacionario era muy grande y además no se lograba alcanzar la señal de referencia. Para corregir este error con base a los parámetros obtenidos implementaron un control compensador en adelanto el cual permitió un mejor desempeño de posicionamiento del sistema y se mejoró el tiempo de establecimiento.

Pratap *et al.*, (2014) implementaron un sistema de control para un seguidor solar de dos grados de libertad. El sistema de control implementado es en lazo cerrado en donde la obtención del punto focal “Sol” es importante para la precisión del sistema de seguimiento. Para ello, se emplearon como sensores dos resistencias dependientes de luz LDR las cuales envían una señal a la etapa de control cuando hay una variación de intensidad de luz. Esta señal es procesada en un microcontrolador PIC16F877A en donde se encuentra programado un algoritmo de control que se encarga de la activación de los motores a pasos dependiendo del movimiento del grado de libertad hasta encontrar nuevamente la mayor intensidad de luz. La implementación de este sistema de control tuvo buenos resultados debido a que la eficiencia en cuanto al seguimiento se vio reflejada en una mayor captación de energía solar comparada con respecto a sin seguimiento solar.

### **1.2.3 Trabajos referentes a la incertidumbre de posicionamiento**

Crutchik (1985) llevó a cabo el diseño e implementación de un dispositivo micro computarizado ideado para seguir el sol en distintas coordenadas geográficas. Este dispositivo utilizaba dos metodologías para el seguimiento solar. La primera se basaba en obtener la ubicación del sol mediante cuatro arreglos de foto sensores de los cuales dos eran para obtener la ubicación este-oeste oeste-este del sol y los otros dos para obtener la ubicación norte-sur sur-norte siempre y cuando existiera una cierta cantidad de luz. Cuando no había luz solar por alguna nube o lluvia rápida etc. El dispositivo micro computarizado obtenía la ubicación del sol mediante cálculos de coordenadas solares tales como el ángulo de elevación del sol y el ángulo de azimut solar. Cabe mencionar que para posicionar al captador solar perpendicular a los rayos del sol, el autor utilizó un sistema de seguimiento de dos grados de libertad. Los resultados que se obtuvieron con la implementación de este dispositivo fueron satisfactorios debido a que se obtuvo un error de posicionamiento menor a un grado para ambos modos de seguimiento.

Hoyos *et al.*, (2008) llevaron a cabo el diseño, análisis y comparación de diferentes estrategias de control para un seguidor solar activo de un grado de libertad para su aplicación en concentradores solares tipo Fresnel. El primer análisis que llevaron a cabo fue

el de un sistema de control de lazo cerrado conformado por la etapa de instrumentación, control y etapa de potencia. Para la primera etapa emplearon un par de fotorresistencias LDR para determinar el mayor enfoque de incidencia solar y así obtener una señal de respuesta para la segunda etapa. Para la segunda etapa realizaron la conexión del circuito integrado LM741 en configuración como restador encargado de activar la etapa de potencia para hacer girar el motor dependiendo de la señal obtenida en la primera etapa. Con la implementación de esta estrategia de control obtuvieron un mal desempeño del sistema debido a la gran inercia que tienen las fotorresistencias en el tiempo de lectura y velocidad de rotación no controlada. Al igual que en días nublados, el sistema pierde el control de posicionamiento y no lo recupera hasta que es orientado de manera manual. Otra estrategia de control que analizaron fue similar a la primera, solo que en esta optaron por la implementación de sensores como fototransistores y la adición de sensores para verificar si el día está soleado o no. Con estas modificaciones no lograron atacar todos los problemas que obtuvieron en la primera estrategia de control ya que aún no se tenía controlada la velocidad de rotación. La tercera estrategia de control es totalmente diferente de las otras dos. Para el control optaron por ocupar una computadora personal PC con salida puerto paralelo para poder controlar un motor a pasos de tipo unipolar con su respectiva etapa de potencia. El algoritmo de control que implementaron fue programado para que el motor realizara una vuelta cada dos minutos. El error de posicionamiento que obtuvieron fue del 1%.

De la Cruz (2012) propuso un sistema de seguimiento solar adaptivo y cronológico para paneles solares fotovoltaicos. Para controlar el sistema de seguimiento solar, De la Cruz propuso una ley de control adaptiva en donde involucró parámetros como el ángulo de giro del seguidor solar, el error de seguimiento, el ángulo estimado, entre otros parámetros. A esta ley de control se le realizaron una serie de derivadas para obtener una función de transferencia mediante la transformada de Laplace. La función de transferencia obtenida se simuló en la plataforma de Matlab Simulink® en donde se implementó una ley de control PI. Los resultados del sistema adaptivo de seguimiento tuvieron un funcionamiento adecuado, sin embargo en simulación el sistema tuvo un error de seguimiento de  $14.4^\circ$  para el caso de cielo nublado durante 10 horas.

#### **1.2.4 Conclusión de la revisión bibliográfica**

En la revisión bibliográfica se encontró que existen dos maneras de obtener el posicionamiento del sol en todo momento. Una es mediante la utilización de sensores dependientes de luz LDR y la otra es mediante la implementación de ecuaciones solares. La obtención de la posición del sol por sensores es una de las técnicas más empleadas por su simplicidad y sobre todo que son de bajo costo. Sin embargo hay trabajos que reportan que la implementación de esta técnica presenta un mal desempeño en cuanto a precisión cuando surgen eventos tales como el paso de una nube, cambios climáticos entre otros, por lo que para obtener un mejor control en cuanto a la precisión de la ubicación del sol, los seguidores solares controlados por algoritmos en base a las ecuaciones solares cumplen un mejor desempeño.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general.**

El objetivo general de este proyecto es implementar una estrategia de control capaz de orientar a un seguidor solar a una posición aproximadamente perpendicular a los rayos del sol con una incertidumbre de  $\pm 1^\circ$  para cualquier hora, día y año en la localidad de Loma Bonita Oaxaca.

#### **1.3.2 Objetivos particulares.**

- Conocer las ecuaciones solares que rigen la posición del sol respecto a un punto en la tierra.
- Implementar las ecuaciones solares en un programa con el fin de conocer los parámetros críticos de control.
- Programar las ecuaciones solares con los parámetros críticos para desarrollar el código fuente.
- Construir el sistema mecánico de dos grados de libertad con uniones tipo revoluta.

- Definir el tipo de control que se encargará de manipular ambos grados de libertad del mecanismo de seguimiento ya sea por ON-OFF, lógica difusa, control PID, etc.
- Implementar la comunicación de las tarjetas de control y potencia con el hardware de control principal.
- Llevar a cabo pruebas de seguimiento solar durante dos días característicos del año.
- Determinar la incertidumbre de posicionamiento del sistema de seguimiento solar.

#### **1.4 Estructura de la tesis**

En el Capítulo 1 se presentó la revisión bibliográfica que sustenta el trabajo de tesis, así como también, los objetivos de este trabajo. En el Capítulo 2 se presentan los modelos físico, matemático, experimental, de control y la metodología para evaluar la posición solar. En el Capítulo 3 se presenta la construcción del equipo experimental del sistema de seguimiento de dos grados de libertad, así también se presenta la instrumentación del equipo experimental, el diseño del algoritmo de control en la plataforma de arduino y la calibración y puesta en operación del equipo experimental. En el Capítulo 4 se presenta la evaluación del sistema para dos diferentes días del año, la evaluación de la incertidumbre de control y el estudio comparativo del comportamiento diario respecto a una referencia. En el capítulo 5 se presentan las conclusiones de este trabajo de tesis y las recomendaciones para trabajos futuros.

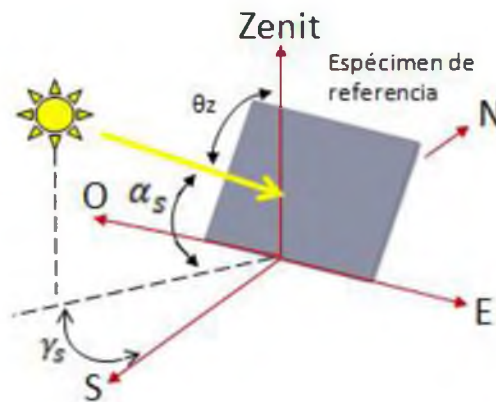
# Capítulo 2

## Modelos de estudio.

En este capítulo se presentan el modelo físico, modelo matemático, modelo experimental y el modelo de control para la implementación de un sistema de control en un modelo a escala de seguimiento solar. En el modelo físico se describe la manera en como los rayos del sol inciden perpendicularmente sobre una superficie. En el modelo matemático se presentan las ecuaciones para determinar la posición del sol en todo momento y la forma de evaluar los ángulos de incidencia a lo largo del día. En el modelo experimental se describe una metodología para conocer los parámetros angulares para el posicionamiento del captador solar. Finalmente, en el modelo de control se presenta la propuesta para posicionar una superficie perpendicularmente a los rayos del sol de manera controlada.

**2.1 Modelo físico**

En la **Figura 2.1** se presenta a una superficie (“especimen de referencia”) sobre el plano horizontal de la tierra E-S-O (Este-Sur-Oeste) con una cierta inclinación sobre el plano vertical N-Z (Norte-Zenit). En la figura se muestra que un haz de luz solar puede incidir de manera perpendicularmente sobre la superficie. Sin embargo la incidencia de los rayos de luz varía de acuerdo al movimiento aparente del sol, que va desde del E al O. Una forma de amortiguar dicha variación es mediante la implementación de un sistema de seguimiento que permita posicionar al espécimen de referencia lo más perpendicular a los rayos del sol. Por lo tanto es necesario obtener la ubicación del sol, y para esto se puede hacer uso de las ecuaciones solares, las cuales permiten describir la posición del sol en todo momento como función de parámetros como son el ángulo de altura solar  $\alpha_s$  y el ángulo de azimut solar  $\gamma_s$  entre otros.



**Figura 2.1:** *Especimen de referencia con parámetros angulares.*

En relación con lo anterior, existen otras variables que influyen para obtener los parámetros anteriormente descritos, estos son el ángulo de declinación del planeta tierra  $\delta$ , la posición angular de la tierra en la órbita elíptica  $\beta$ , la ecuación del tiempo ET, la hora solar HS, el ángulo horario W, el ángulo zenit  $\theta_z$ , las horas luz del día HL, la longitud del meridiano estándar  $\lambda_{ms}$ , la latitud  $\phi$  y longitud  $\lambda_{mlc}$  del lugar en donde se desea realizar el

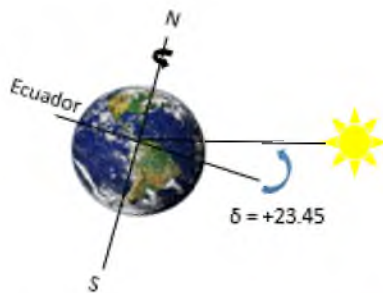
seguimiento del sol, que para este caso se utiliza como referencia la ciudad de Loma Bonita Oaxaca, donde sus coordenadas geográficas son:  $\phi = 18^{\circ}06'$  y  $\lambda_{mlc} = 96^{\circ}53'$ .

**2.2 Modelo matemático**

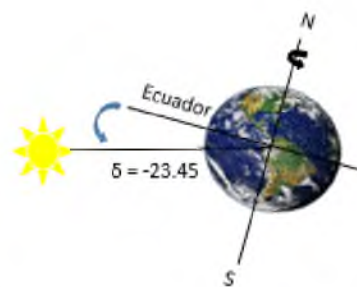
Como se mencionó anteriormente, para obtener los ángulos de azimut solar y el ángulo de altura solar es necesario conocer otros parámetros como el ángulo de declinación de la tierra, la ecuación del tiempo, el ángulo horario, la hora solar entre otros. De acuerdo a las ecuaciones de Cooper (1969) y Spencer (1971), podemos determinar dichas variables. A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los términos involucrados vistos anteriormente y su respectiva ecuación.

**2.2.1 Ángulo de declinación de la tierra.**

El planeta tierra presenta dos movimientos; el primero es alrededor del sol que se describe como una órbita elíptica, y el segundo es sobre su propio eje, que se traza desde el polo norte hasta el polo sur. Este último presenta un ángulo de declinación  $\delta$  de aproximadamente  $23.45^{\circ}$  formado por el plano ecuatorial de la tierra y el plano de la órbita elíptica para el solsticio de verano, y  $-23.45^{\circ}$  para el solsticio de invierno tal como se muestra en la **Figura 2.2** y **Figura 2.3**.

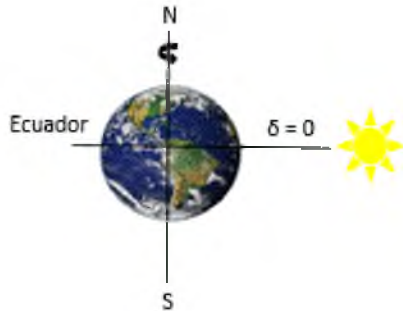


**Figura 2.2** *Inclinación del planeta Tierra en Solsticio de Verano.*

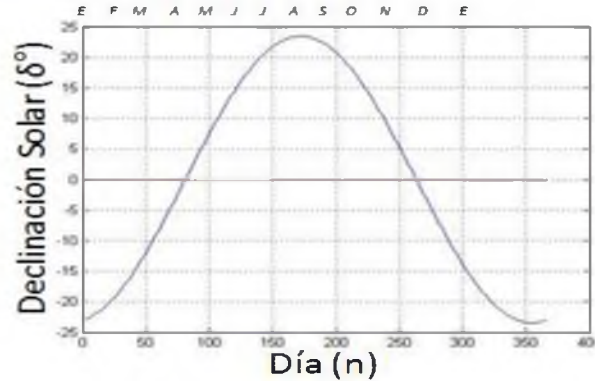


**Figura 2.3** *Inclinación del planeta Tierra en Solsticio de Invierno.*

Por otro lado, en los equinoccios de primavera y otoño el ángulo de declinación tiene un valor de aproximadamente  $0^\circ$ , y es entonces cuando los dos polos de la tierra se encuentran a la misma distancia del sol, ver **Figura 2.4**. Por lo que debido al movimiento variante de la tierra alrededor del sol, el ángulo de declinación solar también varía a lo largo del año tal como se muestra en la **Figura 2.5**



**Figura 2.4:** *Inclinación del planeta Tierra en Equinoccio de Primavera y Otoño.*



**Figura 2.5:** *Variación anual de la declinación  $\delta$ .*

Este parámetro puede ser calculado de manera aproximada mediante la ecuación de Cooper (1969), ec.(2.1).

$$\delta = 23.45 * \sin \left[ \frac{360 * 284 + n}{365} \right] \tag{2.1}$$

Donde  $n$  es el día del año de 1 a 365 ó 1 a 366 para el año bisiesto.

También la declinación angular puede ser obtenida mediante la ecuación de Spencer (1971), cuyo error es menor de  $0.035^\circ$  ec.(2.2).

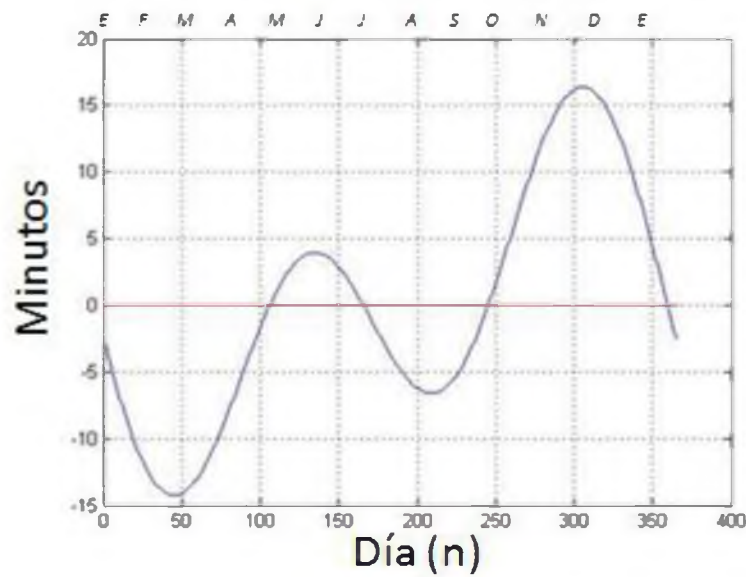
$$\delta = 0.006918 - 0.399912\cos(\beta) + 0.070257\sin(\beta) - 0.006758\cos(2\beta) + 0.000907\sin(2\beta) - 0.002679\cos(3\beta) + 0.00148\sin(3\beta) \tag{2.2}$$

Donde  $\beta$  indica la posición angular de la tierra en la órbita elíptica y se obtiene de la ec.(2.3).

$$\beta = \frac{[n - 1] * 360}{365} \tag{2.3}$$

**2.2.2 Ecuación del Tiempo.**

La ecuación del tiempo ET es un parámetro medido en minutos que indica que tan cercana o alejada esta la hora civil HC con respecto a la hora solar HS. La gráfica que se muestra en la **Figura 2.6** ilustra la diferencia en minutos entre la hora HC y la HS a lo largo del año.



**Figura 2.6:** *Diferencia de minutos entre HS y HC anual.*

Por lo que para obtener tal diferencia, es necesario primeramente aplicar la ecuación del tiempo propuesta por Spencer (1971), ec.(2.4).

$$ET = 229.2 * [0.000075 + 0.001868 \cos(\beta) - 0.032077 \sin(\beta) - 0.014615 \cos(2\beta) - 0.04089 \sin(2\beta)] \quad (2.4)$$

Donde  $\beta$  indica la posición angular de la tierra en la órbita elíptica.

### 2.2.3 Hora solar.

La hora solar HS es una medida del tiempo en función del movimiento aparente que realiza el sol a lo largo del plano horizontal de un lugar en específico. Es posible obtener este parámetro a partir de la ecuación del tiempo ET, longitud del meridiano estándar  $\lambda_{ms}$ , longitud del meridiano del lugar en cuestión  $\lambda_{mlc}$  y la hora civil HC tal como se muestra en la ec.(2.5).

$$HS = HC + ET + 4 * [\lambda_{ms} - \lambda_{mlc}] \quad (2.5)$$

### 2.2.4 Ángulo horario

Otro parámetro importante es el ángulo horario W, este ángulo está definido como el ángulo que se forma a partir del punto Zenit (medio día solar) y la posición del sol en cualquier instante de la hora solar. Este parámetro tiene un valor de 15° por cada hora tomando como referencia el medio día solar que es cuando toma el valor de 0°. Cabe mencionar que antes del mediodía solar el ángulo horario es positivo y después del medio día solar el ángulo es negativo. La ec.(2.6) permite obtener este parámetro.

$$W = [HS - 12] * 15^\circ \quad (2.6)$$

### 2.2.5 Horas luz.

Las horas luz HL es un parámetro importante debido a que es necesario conocer la hora en la cual un seguidor solar se posicionará para iniciar su recorrido durante todo un día en cualquiera día del año. Este parámetro depende de la declinación de la tierra  $\delta$  y de la latitud  $\phi$  del lugar en cuestión (estaciones del año). La ec.(2.7) permite obtener dicho

parámetro (HL). Así mismo la hora de salida HSS y la hora de puesta del sol HPS se pueden determinar mediante la cantidad de horas luz HL tal como se muestra en las ecs.(2.8) y (2.9).

$$HL = \frac{2}{15} \cos^{-1}[-\tan(\phi)\tan(\delta)] \quad (2.7)$$

$$HSS = 12 - \left(\frac{HL}{2}\right) \quad (2.8)$$

$$HPS = 12 + \left(\frac{HL}{2}\right) \quad (2.9)$$

### 2.2.6 Ángulo Azimut Solar y Ángulo de Altura Solar.

Como se mencionó anteriormente, los parámetros para obtener la ubicación del sol a lo largo del día son el ángulo de altura solar  $\alpha_s$  y el ángulo de azimut solar  $\gamma_s$ . El ángulo de altura solar se forma a partir de la abertura entre los rayos del sol que inciden perpendicularmente sobre la superficie plana y el plano horizontal (ver **Figura 2.1**) y se calcula por la ec.(2.10). El ángulo de azimut solar se mide a partir de la línea proyectada de los rayos del sol sobre el plano horizontal hasta la línea proyectada del eje N-S. Este último ángulo tiene valor negativo cuando se mide sobre el plano E-S y es positivo cuando se mide sobre el plano S-O (ver **Figura 2.1**) y se obtiene a partir de la ec.(2.11).

$$\sin(\alpha_s) = \cos(\phi)\cos(\delta)\cos(W) + \sin(\phi)\sin(\delta) \quad (2.10)$$

$$\gamma_s = \text{Sign}(W) \left[ \cos^{-1} \left( \frac{\cos(\theta_z)\sin(\phi) - \sin(\delta)}{\sin(\theta_z)\cos(\phi)} \right) \right] \quad (2.11)$$

La función  $\text{Sign}(\cdot)$  de la ec.(2.11) adquiere el valor de +1 cuando el ángulo horario  $W$  es positivo y -1 cuando  $W$  es negativo.

### 2.3 Modelo experimental

Comúnmente se ha observado que la salida y puesta del sol siempre es de este E a oeste O, sin embargo a lo largo del año no siempre el sol sale en el mismo punto del E y se pone en el mismo punto en el O. Existen ciertos casos muy particulares donde esta observación es muy evidente, y se refieren a los solsticios de verano e invierno y los equinoccios de primavera y otoño donde la salida y puesta del sol son muy diferentes, tal como se presenta en la **Figura 2.7**, que es un ejemplo de cómo están bien caracterizados el solsticio del 21 de diciembre a las nueve horas con treinta y tres minutos para una localidad. También en la figura se presentan los equinoccios del 21 de marzo y 23 de septiembre, así como también el solsticio del 23 de junio.



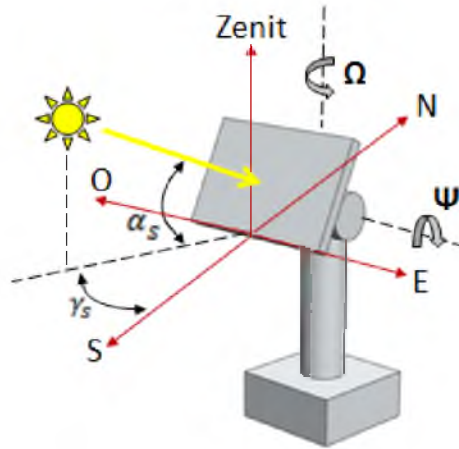
**Figura 2.7.** Trayectoria del sol durante los Solsticios y Equinoccios.

Concluyendo que la salida y puesta del sol durante el año no es la misma en cualquier localidad de la tierra, sino que tiene un comportamiento muy caracterizado por los solsticios y equinoccios y considerando que siempre el sol saldrá por el E y se pondrá por el O, y que además los ángulos que definen la ubicación del sol de forma perpendicular son el ángulo de altura solar  $\alpha_s$  y el ángulo de azimut solar, por lo que se propone el uso de un seguidor con dos grados de libertad con referencia hacia el Este.

En la **Figura 2.8** se muestra una plataforma experimental de un seguidor solar con dos grados de libertad  $\Omega$  y  $\Psi$  con referencia al E. El grado de libertad  $\Omega$  permite el desplazamiento angular de E a O sobre el plano horizontal y tomando como punto de giro el eje coordenado Zenit. Con este desplazamiento se puede posicionar el ángulo de azimut solar que debe ser calculado previamente por la ec.(2.11).

El grado de libertad  $\Psi$  permite el desplazamiento angular sobre el plano vertical tomando como punto de giro el eje coordenado E a O. Con este desplazamiento se puede posicionar el ángulo de altura solar que debe ser calculado previamente por la ec.(2.10).

La combinación de ambos grados de libertad permite posicionar a una superficie de forma perpendicular a los rayos del sol, y de esta manera obtener una mayor incidencia de radiación solar. Es importante mencionar que el sistema de seguimiento solar propuesto tiene un estado inicial de posicionamiento con referencia hacia el eje E, de tal forma que al inicio de cada día el sistema se posicione hacia un nuevo punto de la salida del sol antes de comenzar el recorrido de este.



**Figura 2.8:** Sistema y ángulos para el seguimiento del sol.

### 2.3.1 Metodología para evaluar la posición solar

En la **Figura 2.9** se presenta un diagrama de flujo donde se muestran los pasos a seguir para evaluar el ángulo de altura solar y el ángulo de azimut solar. En este diagrama se considera como datos de entrada la HC, MIN y SEG proporcionados por el reloj de tiempo real RTC (DS1302) y el parámetro  $n$  almacenado en la memoria EEPROM de la tarjeta ARDUINO MEGA 2560, así como también las constantes  $\pi$ ,  $\phi$ ,  $\lambda_{mlc}$  y  $\lambda_{ms}$ . Una vez obtenidos los parámetros anteriores se procede a calcular la HS para posteriormente comparar si este valor se encuentra dentro del intervalo de las horas luz de cada día. Si la condición anterior no se cumple entonces quiere decir que el sol se encuentra ubicado fuera

del plano horizontal, por lo que el programa inicia un ciclo de tiempo en el cual solo mide la condición de la hora HC hasta que sean las cero horas para que posteriormente incremente la variable  $n$  y guardarla en la memoria EEPROM.

Por otra parte si las HS se encuentra dentro de las horas luz, se verifica que la variable MIN sea un valor par y si es el caso se procede a calcular las variables  $\delta$  ec.(2.1),  $\beta$  ec.(2.3), ET ec.(2.4), y  $W$  ec.(2.6) para finalmente obtener los ángulos de altura  $\alpha_s$  y azimut solar  $\gamma_s$ . Caso contrario si la condición anterior no se cumple (MIN es impar), el programa inicia un ciclo de espera hasta que la condición se cumpla.

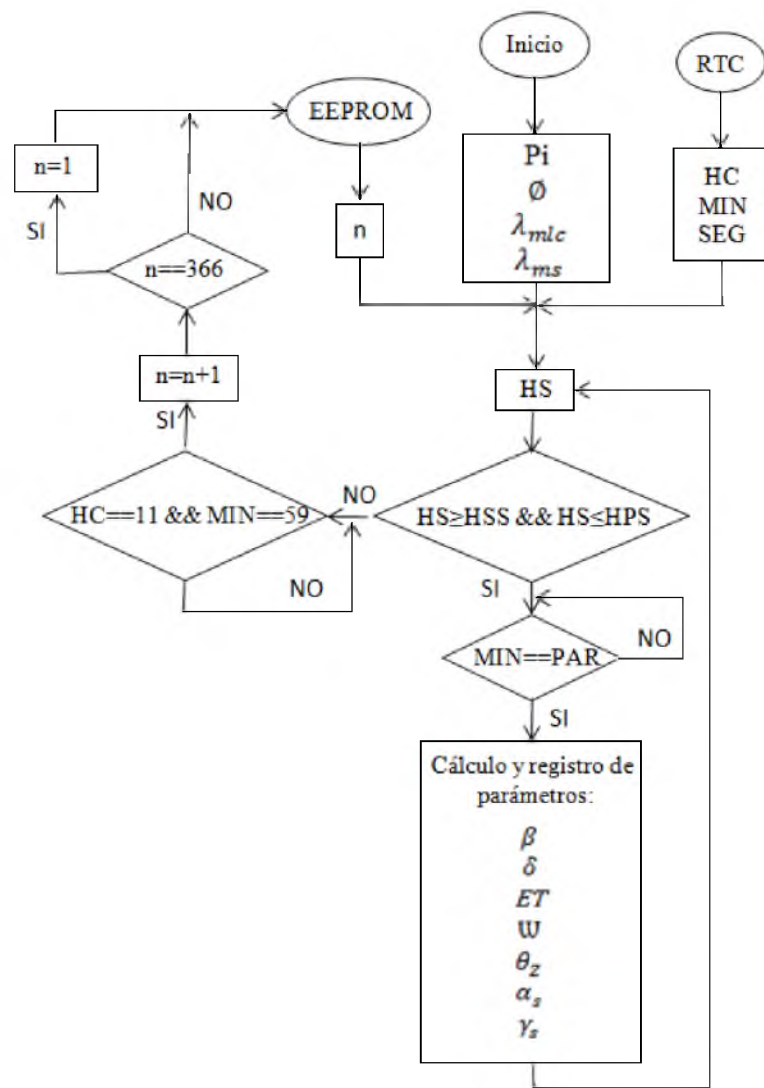
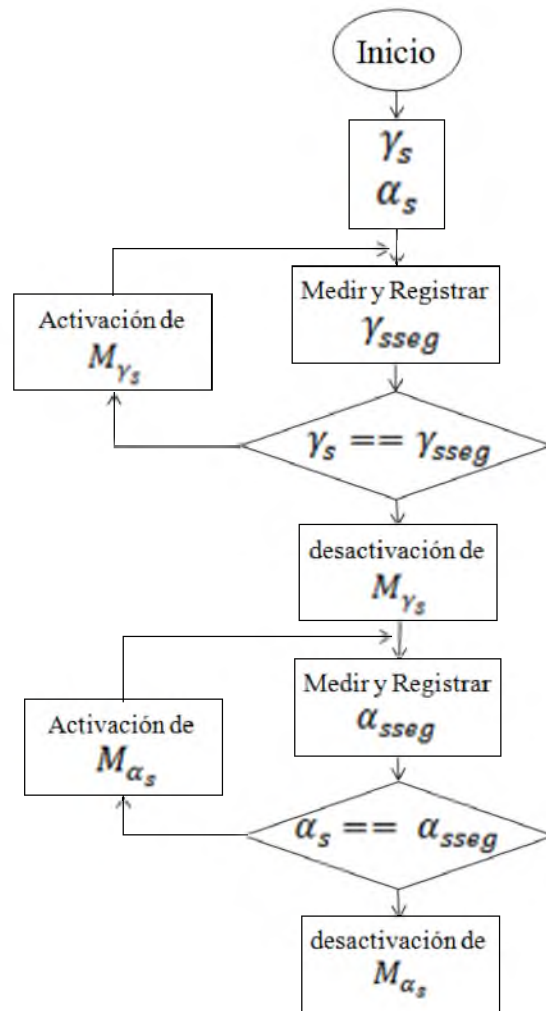


Figura 2.9. Metodología para evaluar la posición solar

## 2.4 Modelo de control

Para posicionar el sistema de seguimiento solar de manera precisa, es necesario implementar sistemas de control que permitan alcanzar la posición deseada tales como controladores ON-OFF, controladores PID, compensadores en adelanto o atraso entre otros. En la **Figura 2.10** se muestra el diagrama de flujo para controlar la posición de ambos grados de libertad del sistema de seguimiento solar. Como datos de entrada se considera el ángulo  $\gamma_s$  y el ángulo  $\alpha_s$  obtenidos con base a la metodología de la **Figura 2.9**. Una vez calculado estos dos parámetros se procede a leer la señal del sensor (*Potenciómetro*) instalado en el grado de libertad  $\Omega$  para obtener la posición angular de azimut del seguidor  $\gamma_{sseg}$  y compararlo con el ángulo de azimut solar calculado  $\gamma_s$ . Si el ángulo calculado es mayor que el ángulo del seguidor, se activa el motor  $M_{\gamma_s}$  y este se apaga hasta que ambos ángulos tengan el mismo valor. Por el contrario, si el ángulo calculado es igual que el ángulo del seguidor, se procede a leer el ángulo de altura solar del seguidor  $\alpha_{sseg}$  y se compara con el ángulo de altura solar calculado  $\alpha_s$ . Si el ángulo  $\alpha_s$  es mayor que el ángulo  $\alpha_{sseg}$ , se activa el motor  $M_{\alpha_s}$  y este se paga hasta que ambos ángulos tengan el mismo valor. En caso de que ambos ángulos sean iguales, el programa no realiza la actualización de posición.



**Figura 2.10** Diagrama de flujo para el control de posición del seguidor solar.

Gracias a la relación de engranes (131:1) del motorreductor con que se cuenta, es posible obtener la posición angular deseada con la implementación de un sistema de control menos robusto tal como el controlador de ganancia unitaria (ON/OFF). Además este motorreductor ofrece un torque de 18 kg-cm el cual, es suficiente para hacer girar el peso de ambas articulaciones del sistema de seguimiento solar. Es por ello que para llevar a cabo el control de posición de ambos grados de libertad se ocupará este tipo de control

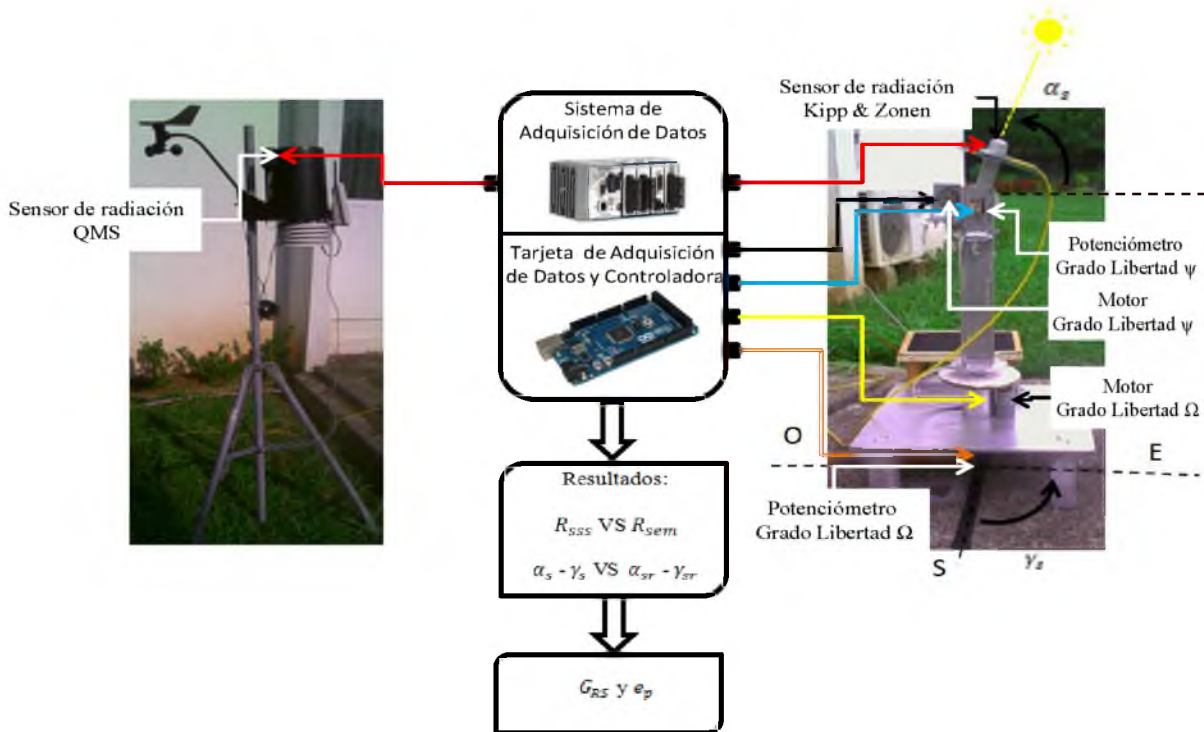
# Capítulo 3

## Equipo experimental.

En este capítulo se presenta el diseño del experimento, la construcción e implementación de los dos grados de libertad en un sistema de seguimiento solar a escala, también se presenta la instrumentación, la implementación del algoritmo de control y la puesta en operación del seguidor.

### 3.1 Diseño del experimento

En la **Figura 3.1** se muestra el esquema de adquisición y control para el sistema de seguimiento solar a escala. En la parte derecha de la figura se presenta al sistema de seguimiento solar de acuerdo a los requerimientos del modelo experimental (sección 2.3), donde se muestra que la posición angular de cada grado de libertad es medido por un potenciómetro de 1 vuelta sin tope, además en el plano perpendicular del efector final se encuentra el sensor de radiación solar global (*Kipp & Zonen*). En la parte izquierda de la **Figura 3.1**, se muestra una estación meteorológica que incluye el sensor de radiación solar global (*QMS101*), y finalmente en la parte central de la figura se presenta el equipo para la adquisición de la radiación solar global medida por el sensor QMS sobre el plano horizontal y la radiación solar medida por el sensor *Kipp & Zonen* sobre el plano del seguidor. Así también se presenta un segundo equipo de adquisición y control para la posición angular de cada grado de libertad del seguidor solar ( $\alpha_s$  y  $\gamma_s$ ). Es importante mencionar que en este equipo de adquisición y control estarán previamente programadas las ecuaciones solares que permiten describir la posición angular del sol de forma teórica.



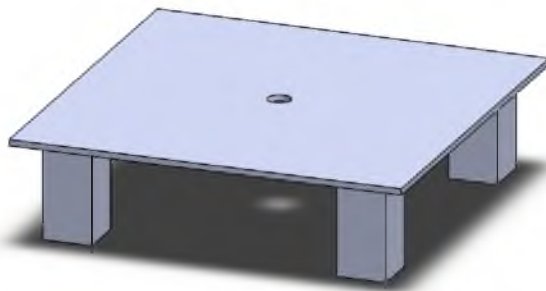
**Figura 3.1** Esquema del banco de pruebas para la evaluación del sistema de control.

Para el desarrollo del seguimiento solar. En el experimento, el sistema debe ser colocado sobre una superficie plana y horizontal marcada con el sistema de referencia de los ejes coordenados N-S E-O. El sensor de radiación global 1 (*Kipp & Zonen*) se coloca sobre la superficie plana del efector final del seguidor solar y el sensor de radiación global 2 (*QMS*) se adquiere de la estación meteorológica de la universidad, ubicada a unos metros del seguidor para que este no proyecte sombra y afecte las mediciones de radiación solar. Durante el experimento se miden los valores de  $R_{SSS}$  y  $R_{Sem}$  y se registran los promedios cada 10 minutos para que posteriormente se evalúe la  $G_{RS}$ . Todo esto mediante el sistema de adquisición de datos LABVIEW®. Por otro lado, con la tarjeta ARDUINO se miden las señales analógicas de los potenciómetros para obtener los ángulos actuales de posicionamiento del seguidor solar. También en la tarjeta ARDUINO se realizan los cálculos teóricos de los ángulos que describen la posición del sol. Una vez que se obtienen los ángulos del seguidor y los ángulos calculados, la tarjeta ARDUINO realiza una comparación entre estos valores para obtener el error de posicionamiento  $e_p$ . Este error permitirá corregir constantemente la posición del seguidor solar para seguir al sol en todo momento y de manera continua.

### 3.2 Construcción del equipo experimental

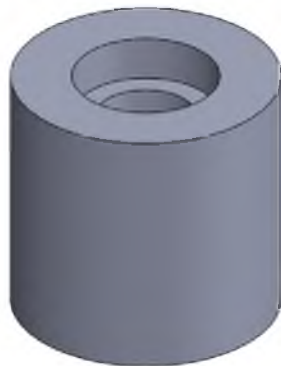
La construcción del sistema de seguimiento se inicio con base a la necesidad principal de obtener la mayor incidencia de radiación solar a lo largo del día. Para ello, se construyó un sistema de seguimiento solar de dos grados de libertad de acuerdo a con la conclusión de la revisión bibliográfica citadas en la sección 1.2.1. La construcción del seguidor solar se realizó en el taller de metales de la Universidad del Papaloapan. Como primer paso se construyeron los implementos mecánicos que permiten realizar el movimiento del seguidor para el grado de libertad  $\Omega$  y que posiciona al seguidor solar a un ángulo azimutal. Estos implementos comprenden: a) el maquinado de una plataforma, b) una base cilíndrica para soportar dos rodamientos, c) un soporte para el eje y poste principal del grado de libertad  $\Omega$ , d) el eje del grado de libertad  $\Omega$  y e) poste principal. A continuación se describen cada una de estas etapas constructivas.

a) Maquinado de una plataforma: Para maquinar esta pieza se utilizó una placa de aluminio con dimensiones 20x20x1 cm (*largo, ancho, espesor*), donde se le realizó una perforación de 2.54 cm de diámetro en el centro de la placa para alojar en él un soporte cilíndrico que contiene en su interior dos rodamientos que a su vez alojaran y alinearan de manera vertical al eje guía del grado de libertad  $\Omega$ . Además se le instalaron en cada arista de la placa una pieza rectangular en madera de 2.54x2.54x10 cm, que en su conjunto forman un sistema de apoyo para dar la estabilidad y rigidez a la base de seguidor solar (ver **Figura 3.2**).



**Figura 3.2** *Plataforma del Seguidor solar.*

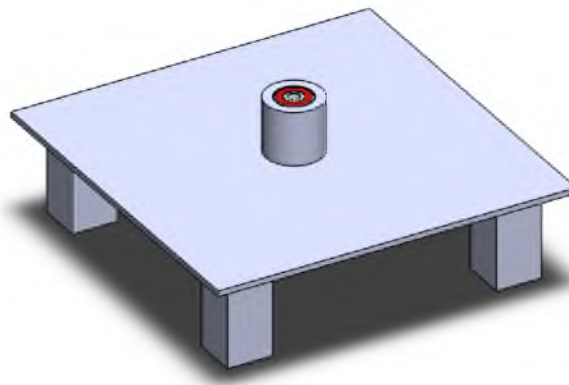
b) *Maquinado de una base cilíndrica porta rodamientos*: Se maquina una base de aluminio de 6.27 cm de diámetro por 5.95 cm de largo, donde se le realizó una perforación al centro de 2.34 cm de diámetro y de extremo a extremo. Posteriormente en una de las dos caras de la base se le realizó un desbaste interno hasta que se obtuvo un diámetro de 4.13 cm y una profundidad de 1.27 cm para introducir el rodamiento 6302-2RS. Posteriormente en la otra cara de la base se le realizó un desbaste interno hasta que se obtuvo un diámetro de 3.43 cm y una profundidad de 1.05 cm para introducir el rodamiento 6203Z (ver la **Figura 3.3** y **3.4**). Una vez maquinada la pieza, está fue colocada y sujeta firmemente a la plataforma mediante cuatro tornillos (ver **Figura 3.5**).



**Figura 3.3** Base para el soporte de los rodamientos para el grado de libertad  $\Omega$ .

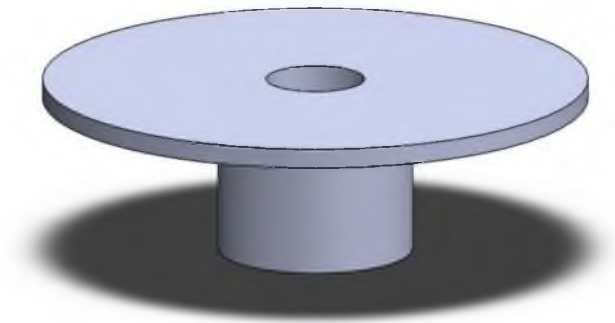


**Figura 3.4** Rodamiento 6302-2RS montado sobre la base.



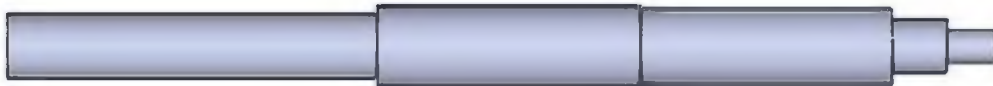
**Figura 3.5** Base porta rodamientos sujeta a la plataforma del seguidor solar.

c) *Soporte para el eje y poste principal*: Se implementó un soporte para alojar al eje y poste principal del grado de libertad. Este soporte se obtuvo de una lavadora para soportar una carga de 147 Newtons, (ver **Figura 3.6**).



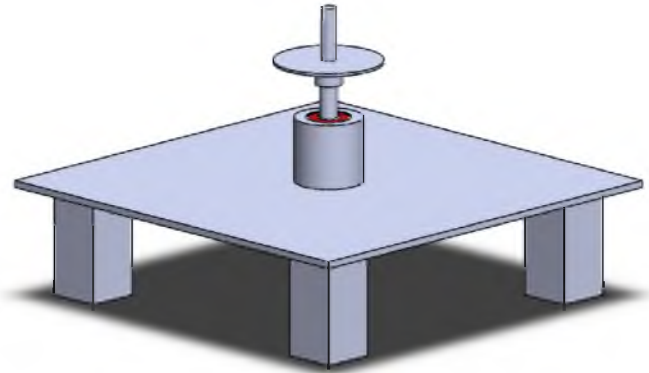
**Figura 3.6** Soporte para el brazo principal del sistema.

d) *Maquinado del eje para el grado de libertad  $\Omega$* : Para el maquinado del eje se utilizó un tramo de varilla redonda de 1.90 cm de diámetro por 19 cm de largo y con la ayuda del torno se desbastó hasta obtener los diámetros necesarios de acuerdo a las dimensiones y tolerancias de los rodamientos presentados en el inciso b. (ver **Figura 3.7**).



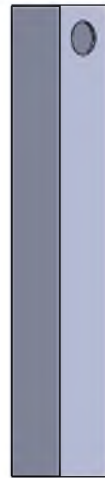
**Figura 3.7** Eje del grado de libertad  $\Omega$ .

Una vez maquinado el eje, éste se colocó en el interior del soporte para el poste principal y también en la base porta rodamientos, que a su vez esta base está sujeta a la plataforma del seguidor solar, (ver **Figura 3.8**).



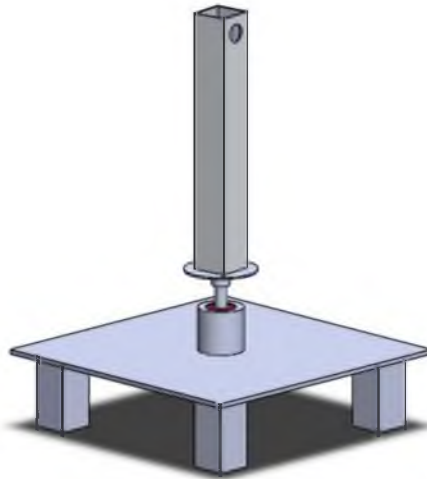
**Figura 3.8** Montaje del eje del grado de libertad  $\Omega$ .

e) Maquinado del poste principal: Para el maquinado del poste principal se utilizó un tramo de PTR de 5x5x40 cm. En uno de los extremos se le realizaron dos perforaciones de lado y lado de 2.06 cm de diámetro para la implementación del grado de libertad  $\Psi$ , (ver **Figura 3.9**).



**Figura 3.9** Brazo principal del sistema de seguimiento.

Una vez maquinado el poste principal, se unió mediante soldadura por arco eléctrico al soporte para el eje y poste principal, (ver **Figura 3.10**).

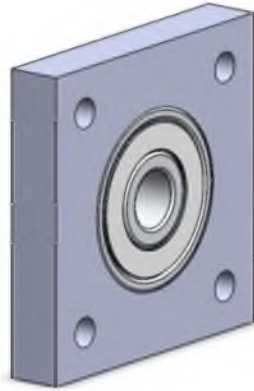


**Figura 3.10** *Montaje del brazo principal.*

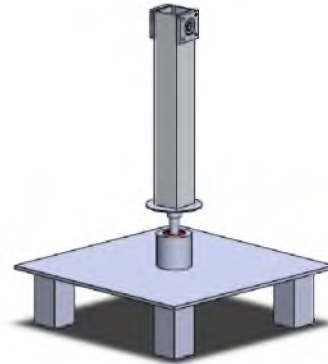
Posteriormente se construyeron los implementos mecánicos que permiten realizar el movimiento del seguidor para el segundo grado de libertad  $\Psi$  y que posiciona al seguidor solar a un ángulo de altura. Estos implementos comprenden: a) el maquinado del soporte para los rodamientos del grado de libertad  $\Psi$ , b) el eje del grado de libertad  $\Psi$ , c) el brazo secundario izquierdo, derecho y el soporte para el espécimen de referencia, d) la base para los potenciómetros, el soporte para la base del potenciómetro del grado de libertad  $\Psi$ , la base para el motor del grado de libertad  $\Psi$ , y el soporte para la base del motor del grado de libertad  $\Psi$ , y por último d) el engrane para el eje de los motorreductores y el engrane para el eje de los dos grados de libertad del sistema. A continuación se presenta cada una de las etapas constructivas de los mecanismos mencionados anteriormente.

- a) *Maquinado del soporte para los rodamientos del grado de libertad  $\Psi$* : Para la construcción de los soportes se utilizó acrílico de 0.5 cm de espesor. Se cortaron cuatro cuadrados de 5x5 cm y se unieron en pares para obtener un espesor de 1 cm. Posteriormente con una cierra circular se barrenó hasta lograr tener un diámetro de 2.54 cm para poder introducir a presión los rodamientos 6200Z (ver

**Figura 3.11).** En cada extremo del soporte se le realizó un orificio de 0.5 cm de diámetro. Después en ambas caras del brazo principal donde se hicieron las perforaciones, se colocaron los soportes para marcar los cuatro orificios que posteriormente se barrenaron. Una vez realizado los cuatro orificios, los soportes se sujetaron mediante tornillos al brazo principal (ver **Figura 3.12**).



**Figura 3.11** Rodamiento 6200Z montado sobre la base para el grado de libertad  $\Psi$ .

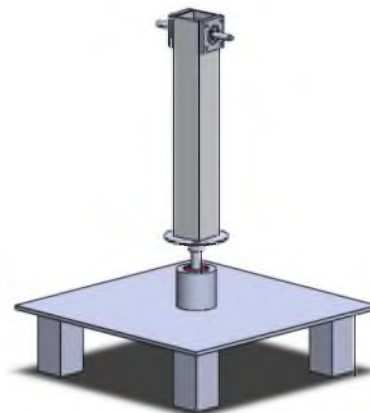


**Figura 3.12** Montaje de la base porta rodamiento del grado de libertad  $\Psi$ .

- b) Maquinado del eje del grado de libertad  $\Psi$ : para el maquinado se utilizó un tramo de 14.5 cm de largo por 1.2 cm de diámetro del eje de una impresora la cual ya contaba con la adaptación de un engrane. Luego se le retiró el engrane para poder maquinar el eje, y con la ayuda de un torno se desbastó (ver **Figura 3.13**) hasta dejarlo a las medidas necesarias para introducirlo en los rodamientos del segundo grado de libertad (ver **Figura 3.14**).

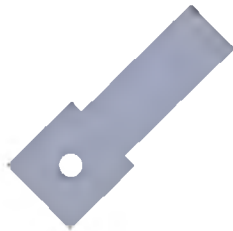


**Figura 3.13** Eje del grado de libertad  $\Psi$ .



**Figura 3.14** Montaje del eje del grado de libertad  $\Psi$ .

- c) Maquinado del brazo secundario izquierdo, derecho y maquinado del soporte para el espécimen de referencia: Para su construcción de los brazos se utilizó solera de pulgada y media de anchura la cual se cortaron dos cuadros de 3.80x3.80 cm. En el centro de uno de los cuadrados se le realizó una perforación de 1.04 cm de diámetro (ver **Figura 3.15**) y al otro una perforación de 0.95 cm de diámetro (ver **Figura 3.16**). Posteriormente se utilizó solera de una pulgada de la cual se cortaron dos tramos de 6.5 cm y se unieron a través de soldadura eléctrica a lo largo de los cuadrados. Una vez obtenidas estas piezas se introdujeron sobre el eje del grado de libertad  $\Psi$  y se unieron con soldadura sobre la misma. Después de haber soldado estas piezas se midió la distancia entre las dos barras de los brazos para cortar y soldar un tramo de solera de pulgada y media con perforaciones en el centro donde se colocará el sensor de radiación (ver **Figura 3.17**).



**Figura 3.15** Brazo secundario izquierdo.

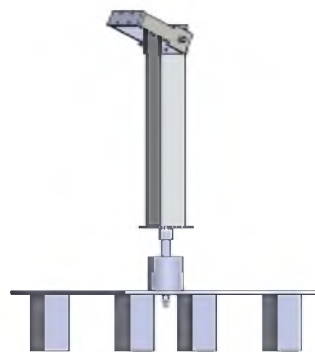


**Figura 3.16** Brazo secundario derecho.



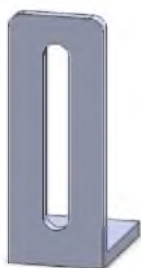
**Figura 3.17** Soporte para el espécimen de referencia.

La implementación de estas piezas en el seguidor se muestra en la **Figura 3.18**.

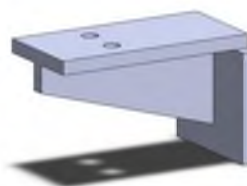


**Figura 3.18** Montaje de los brazos secundarios

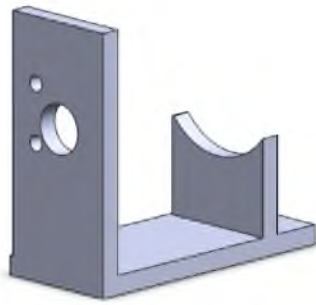
- d) Maquinado de la base para los potenciómetros, el soporte para la base del potenciómetro del grado de libertad  $\Psi$ , la base para el motor del grado de libertad  $\Psi$ , y el soporte para la base del motor del grado de libertad  $\Psi$ : En esta sección se presentan las bases para los potenciómetros de precisión (ver **Figura 3.19**), el soporte para la base del potenciómetro del grado de libertad  $\Psi$  (ver **Figura 3.20**) y la base y soporte del motor correspondientes al mismo grado de libertad (ver **Figura 3.21** y **Figura 3.22**). El material que se utilizó para la construcción fue acrílico de 0.5 cm de espesor.



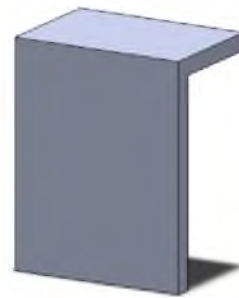
**Figura 3.19** Base para los potenciómetros.



**Figura 3.20** Soporte para la base del potenciómetro del grado de libertad  $\Psi$ .



**Figura 3.21** Base para el motor del grado de libertad  $\Psi$ .

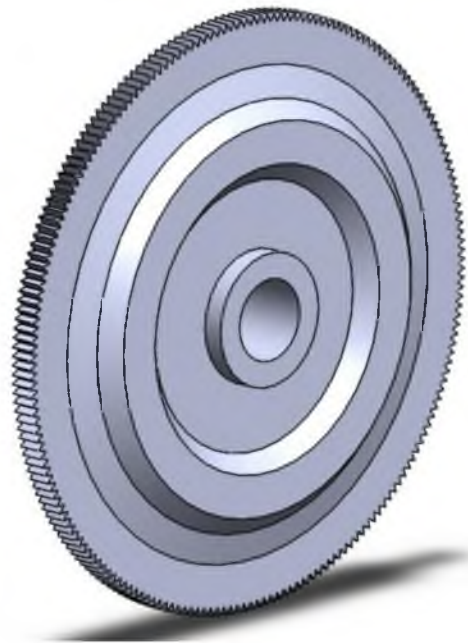


**Figura 3.22** Soporte para la base del motor del grado de libertad  $\Psi$ .

- e) Por último en la **Figura 3.23** se muestra el engrane que se acopla al eje de los dos motorreductores. Así mismo en la **Figura 3.24** se presenta el engrane que se acopló a cada grado de libertad del sistema.

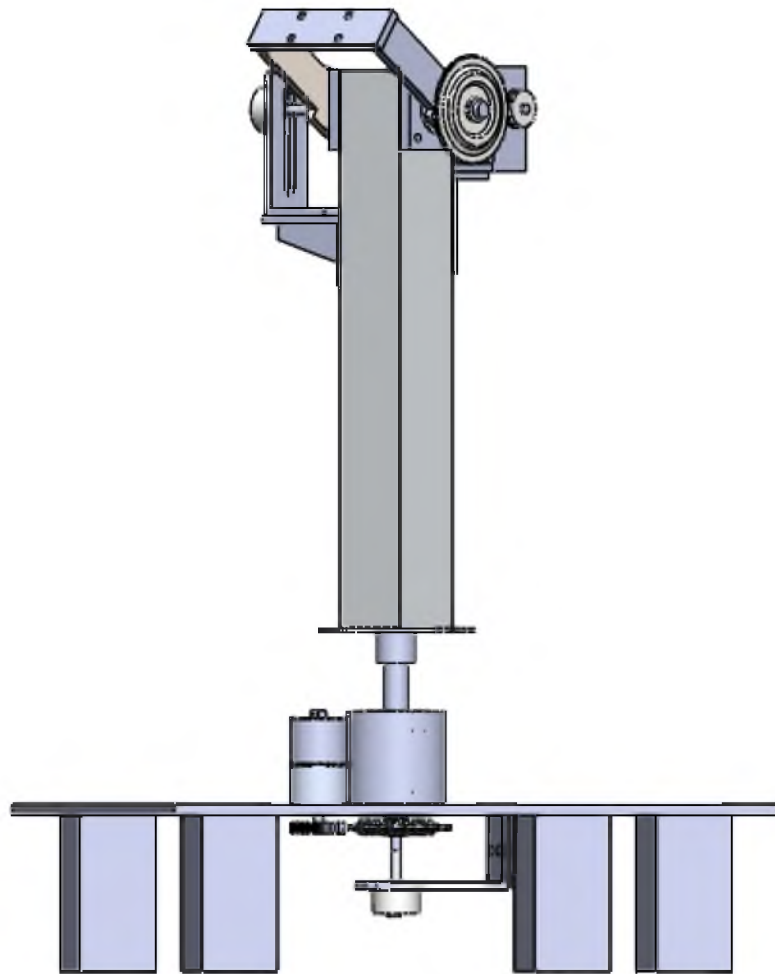


**Figura 3.23** Engrane para el eje de los motorreductores.



**Figura 3.24** *Engrane para el eje de los dos grados de libertad del sistema.*

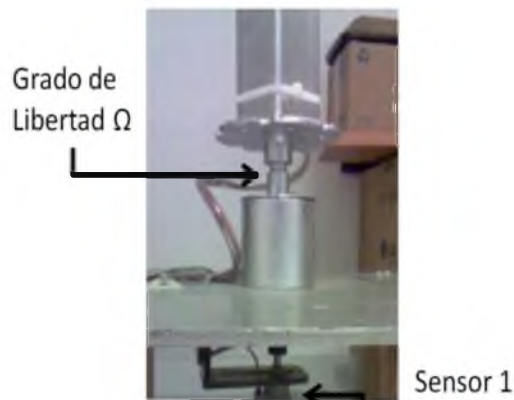
Finalmente, después de toda la descripción constructiva se presenta en la **Figura 3.25** el ensamble completo del sistema de seguimiento solar con los dos grados de libertad  $\Omega$  y  $\Psi$ . Los planos constructivos de cada mecanismo se encuentra en el **Apéndice A**.



**Figura 3.25** *Sistema de seguimiento solar ensamblado.*

### 3.3 Instrumentación del equipo experimental

La instrumentación del equipo experimental es un punto muy importante debido a que se requiere conocer la posición angular de ambos grados de libertad del sistema de seguimiento. Por tal razón en cada grado de libertad se instrumentó con un potenciómetro de precisión lineal Modelo Serie 6180 que fue colocado en dirección del eje de giro de cada grado de libertad, (ver **Figura 3.26** y **Figura 3.27**).

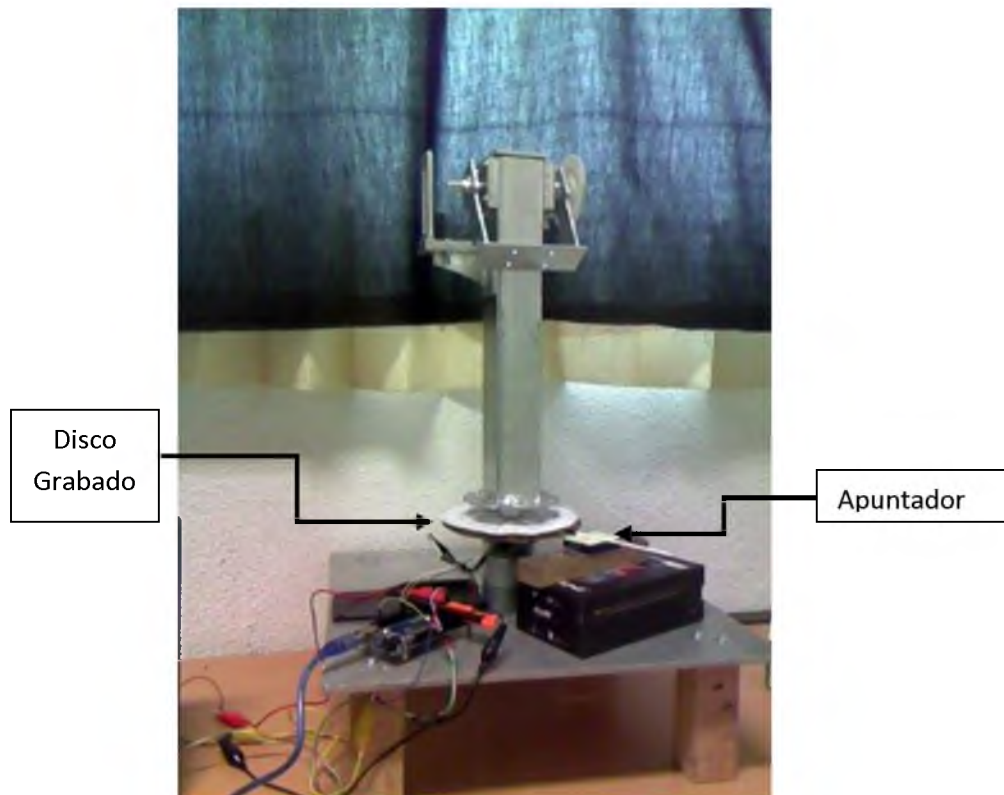


**Figura 3.26** Potenciómetro adaptado al grado de libertad  $\Omega$ .



**Figura 3.27** Potenciómetro adaptado al grado de libertad  $\Psi$ .

Posteriormente para calibrar y medir el ángulo de posición del grado de libertad  $\Omega$  se colocó un disco graduado con los  $360^\circ$  y un apuntador para indicar de manera visual la posición del seguidor tal como se muestra en la **Figura 3.28**, misma metodología se utilizó para la calibración del ángulo de posición del grado de libertad  $\Psi$ . Así mismo se realizaron pruebas experimentales para obtener la relación Ángulo-Voltaje (ver **Figura 3.29** y **Figura 3.30**) y se obtuvo que dicha relación tiene un comportamiento de tipo lineal, por lo que se optó por implementar la ecuación de una línea que pasa por un punto y con una pendiente ec.(3.1), y de esta manera obtener una ecuación característica de la posición angular azimutal ec.(3.3). Este procedimiento se repitió para obtener la ecuación característica para la posición del ángulo de altura solar, ec.(3.4).



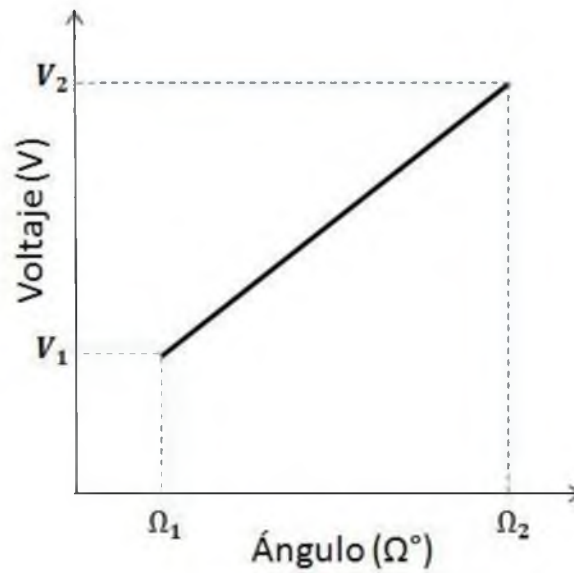
**Figura 3.28** Etapa experimental para la obtención de la relación Ángulo-Voltaje

A continuación se presenta el desarrollo para obtener las ecuaciones pertinentes.

$$y - y_1 = m(x - x_1) \quad (3.1)$$

Donde:

$$m = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \quad (3.2)$$



**Figura 3.29** Relación Voltaje-Ángulo para el grado de libertad  $\Omega$ .

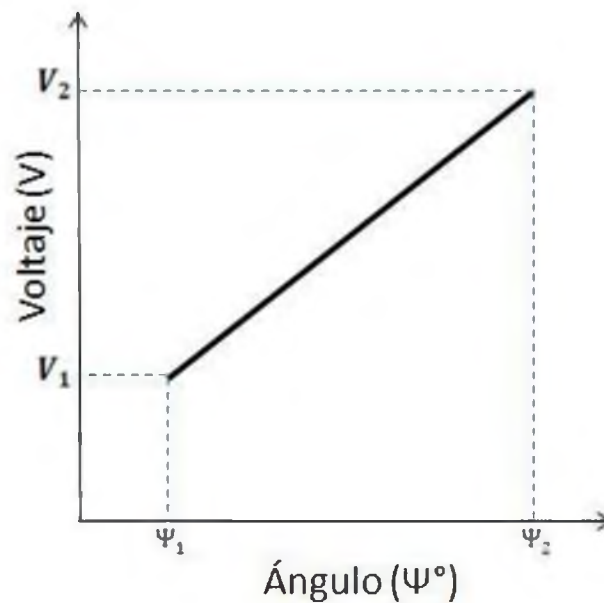
Donde  $V_1 = 0.13725$ ,  $V_2 = 2.19608$ ,  $\Omega_1 = 10$  y  $\Omega_2 = 150$ .

Al sustituir los valores en la Ecuación 3.1 y 3.2 se obtiene la ecuación en función del voltaje para el grado de libertad  $\Omega$ .

$$m_1 = \frac{(V_2 - V_1)}{(\Omega_2 - \Omega_1)} = \frac{(2.19608 - 0.13725)}{(150 - 10)} = 0.014705928$$

$$\Omega = (V - V_1)/m_1 + \Omega_1 = (V - 0.13725)/0.014705928 + 10$$

$$\Omega = (V - 0.13725)/0.014705928 + 10 \quad (3.3)$$



**Figura 3.30** Relación Voltaje-Ángulo para el grado de libertad  $\Psi$ .

Donde  $V_1 = 0.13725$ ,  $V_2 = 1.43137$ ,  $\Psi_1 = 10$  y  $\Psi_2 = 100$ .

$$m_2 = \frac{(V_2 - V_1)}{(\Psi_2 - \Psi_1)} = \frac{(1.43137 - 0.13725)}{(100 - 10)} = 0.01438$$

$$\Psi = (V - V_1)/m_2 + \Psi_1 = (V - 0.13725)/0.01438 + 10$$

$$\Psi = (V - 0.13725)/0.01438 + 10 \quad (3.4)$$

Con el objetivo de que el sistema de seguimiento solar sea controlable y además automatizable, fue necesario utilizar un sistema de adquisición de datos y control que recopilara la información de los potenciómetros y de esta manera actúe para corregir la posición solar de los dos grados de libertad mediante la activación de dos motores de corriente continua de la marca POLOLU (*los cuales cuentan con un sistema de engranes cuya relación es de 131:1*). Por lo que se utilizó una tarjeta ARDUINO en su versión

MEGA, (ver **Figura 3.31**). Esta tarjeta está basada en el microcontrolador ATMEGA 2560. Además cuenta con 54 canales digitales configurables como entrada/salida; de los cuales 15 pueden proporcionar señal de salida PWM por sus siglas en inglés (*pulse width modulation*), que es muy útil para modular de manera precisa la velocidad de los motores. También cuenta con 16 canales para leer señales analógicas, cada canal analógico cuenta con un convertidor analógico/digital a 10 bits lo que permite tener una resolución de 1024 valores diferentes posibles. Así mismo cuenta con una entrada de alimentación externa para tener un funcionamiento independiente. De manera particular, la elección de esta tarjeta además de las características anteriores, es que tiene la capacidad de evaluar de manera directa funciones trigonométricas necesarias para obtener los parámetros indispensables que describen la posición del sol.



**Figura 3.31** Tarjeta ARDUINO MEGA 2560.

Para el control de la potencia de los motores se utilizó el módulo L298N (ver **Figura 3.32**). Este módulo permite controlar individualmente la velocidad de dos motores de corriente directa mediante señal PWM, así como también el sentido de giro. Este dispositivo soporta corrientes de hasta 2 amperes en operación constante, 5 amperes en pico y permite una alimentación de 12 a 36 volts de CD.



**Figura 3.32** Módulo de potencia L298N.

Para llevar a cabo el control de la fecha y hora se utilizó un reloj de tiempo real DS1302 (ver **Figura 3.33**). Este circuito integrado tiene 31 bytes de memoria RAM para guardar cualquier dato que se quiera almacenar ahí. Este dispositivo, además de su entrada de alimentación por default, cuenta con una entrada extra para poder alimentarlo con una batería de 3 volts para que los datos, fecha y hora no se borren. Cabe mencionar que el consumo de energía de este dispositivo es muy bajo ya que para funcionar solo requiere de 300 nA a 2 volts.



**Figura 3.33** Reloj de tiempo real DS1302.

Para visualizar la hora civil, la hora solar, y los ángulos de posición del seguidor solar se utilizó una LCD 16x2 (ver **Figura 3.34**), en configuración de 4 bits para no utilizar

muchos puertos de salida. Puesto que se requería que el sistema de control funcionara y mostrara los datos sin necesidad de una PC.



**Figura 3.34** *LCD 16x2.*

En el **Apéndice B** se presenta el diagrama esquemático para el hardware de control donde se muestra la conexión de cada uno de los componentes electrónicos.

### **3.4 Diseño del algoritmo de control en la plataforma de Arduino.**

El algoritmo de control inicia con la declaración de las librerías para poder realizar cálculos matemáticos y para poder hacer uso de otros dispositivos electrónicos como el reloj de tiempo real, LCD, etc. seguido con la declaración de variables globales y constantes. Ver **Apéndice C**, Sección 1.

Posteriormente en la etapa de ejecución del programa llamada `setup()`, se configuran los canales de entradas/salidas digitales y analógicas, y se inicializa la comunicación serial.

La Sección 3 de la etapa de ejecución del programa llamada `loop()` inicia con la obtención de la hora civil, minuto y segundo y las visualiza en la LCD. Una vez obtenido lo anterior, el programa evalúa tres funciones de las cuales se obtienen el parámetro B, la declinación y la ecuación del tiempo, todo esto con la finalidad de calcular la hora solar para que posteriormente el mismo programa verifique si la hora solar se encuentra dentro

del intervalo de las horas luz y actuar de manera autónoma para iniciar o no con la rutina del programa de seguimiento solar.

Dentro de la Sección 3 del programa se encuentra un ciclo “while” la cual siempre se va a ejecutar mientras la condición de la sección anterior se cumpla, esto es que la hora solar HS se encuentre dentro del intervalo de las horas luz de cada día del año. Dentro del ciclo “while” se encuentra una condición la cual se ejecuta si la hora solar es igual a la hora de la puesta del sol correspondiente a ese día, por lo que si dicha condición es verdadera, el sistema de control dirige al seguidor solar a su posición de descanso, lo que indica que el periodo de tiempo para llevar a cabo el seguimiento del sol ha finalizado. Así también el sistema de control lleva a cabo la actualización de los días transcurridos mediante la variable  $n$ , esto quiere decir que al término de cada día de seguimiento del sol, el nuevo valor se incrementará  $n+1$  y se guardará dentro de la memoria EEPROM de la tarjeta ARDUINO con la finalidad de llevar el conteo de los días.

Sin embargo, si la condición del ciclo “while” no se cumple, entonces el programa verifica si el minuto actual de la hora civil es par. En el caso de que el minuto sea par, el programa realiza los cálculos de las variables tales como el ángulo de la tierra en la órbita  $\beta$ , la declinación de la tierra, la ecuación del tiempo, la hora solar, el ángulo horario, el ángulo del cenit  $\theta_z$  para finalmente calcular el ángulo de elevación del sol y el ángulo de azimut solar y así comparar estos dos ángulos con los adquiridos por las señales analógicas de los potenciómetros del seguidor solar y tomar o no la decisión de corregir la posición del sistema de seguimiento dependiendo del error permisible del sistema que se propone de  $\pm 1^\circ$ .

### 3.5 Calibración y puesta en operación del equipo experimental

La calibración del sistema de seguimiento es muy importante ya que de ello depende su buen funcionamiento. Para llevar a cabo la calibración del seguidor solar se utilizó una brújula para ubicar y trazar sobre una superficie plana un sistema de referencia de ejes coordenados Norte-Sur Este-Oeste. Sobre la superficie plana se colocó el sistema de seguimiento con orientación E-O. Así mismo, se colocó un disco graduado con los 360 grados en ambos grados de libertad para comparar la posición angular del sistema de seguimiento con los ángulos de altura solar y de azimut solar previamente calculados correspondientes al 28 de Junio del año 2015. Realizado lo anterior se prosiguió a ajustar los potenciómetros de ambos grados de libertad a cero grados para finalmente tener el sistema de seguimiento calibrado. Para finalizar, es importante mencionar que dado el tipo de controlador a utilizar en este trabajo de tesis, la señal de control para activar los motores es una señal PWM (*pulse width modulation*), la cual se ajustó previamente para tener un movimiento suave en ambos grados de libertad del sistema.

# Capítulo 4

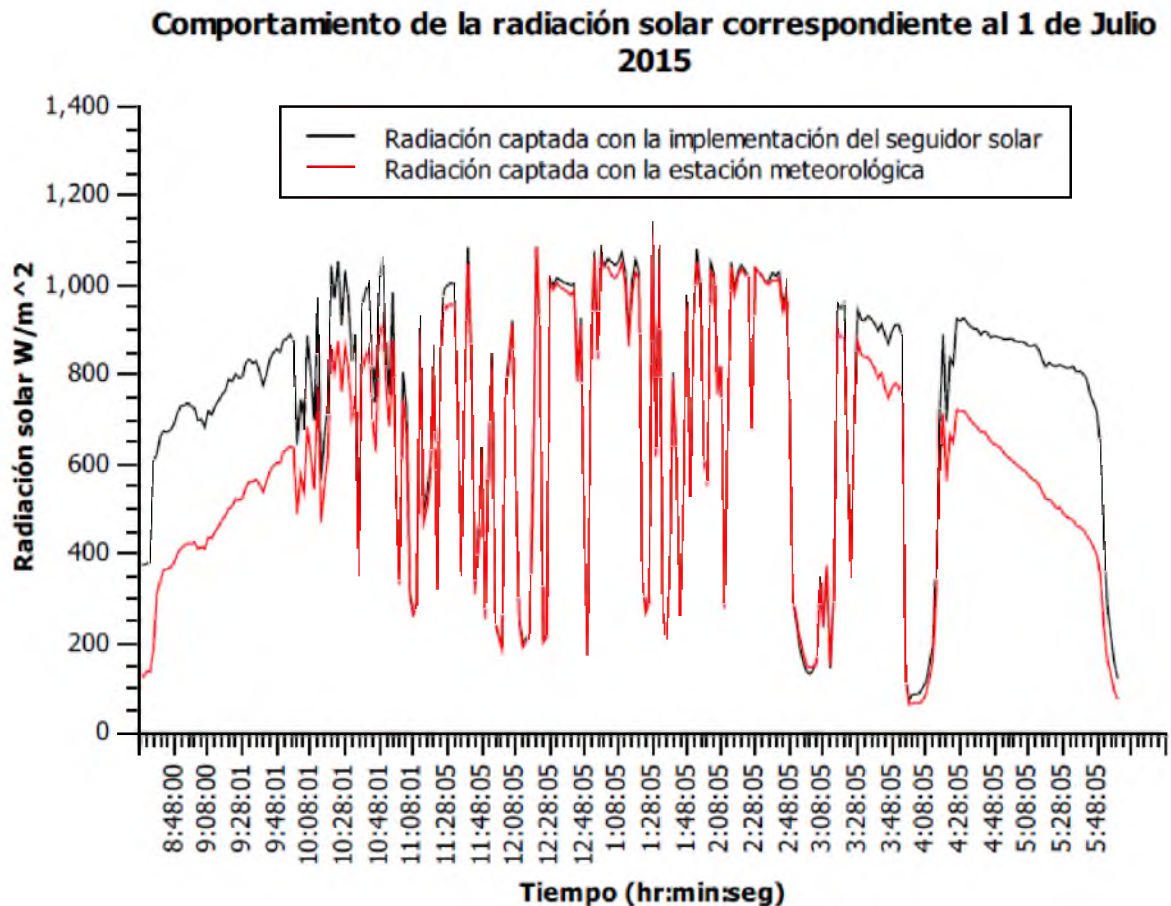
## Resultados experimentales.

En este capítulo se presentan los resultados experimentales de las pruebas de evaluación del sistema de seguimiento solar para dos días característicos del año, así también se presenta la evaluación de la incertidumbre del control y el estudio comparativo del comportamiento diario respecto a una referencia.

#### 4.1 Evaluación del sistema para dos días del año

La evaluación del sistema consistió en colocar el seguidor solar al medio ambiente exterior, en una orientación de norte-sur a este-oeste, durante dos días correspondiente al mes de julio y septiembre del año 2015. Las pruebas de seguimiento iniciaron a las 8:30 am y finalizaron a las 18:00 pm del horario civil. Sobre la base plana del efector final que es orientada por el seguidor de manera perpendicular a los rayos del sol se instaló un sensor de radiación solar global (*piranómetro*) para medir la intensidad de energía que llega a esta superficie. También se utilizó la medición de radiación solar global sobre el plano horizontal proporcionada por la estación meteorológica de la Universidad del Papaloapan Campus Loma Bonita. Estas dos mediciones de radiación fueron registrados cada segundo por el sistema de adquisición de datos CompactRio NI cRIO-9014 de NATIONAL INSTRUMENT con software LabVIEW®.

En la **Figura 4.1** se presenta una gráfica que describe el comportamiento de la radiación solar durante la prueba que se realizó el primero de Julio del año 2015. En la figura se muestra el comportamiento de la radiación solar captada con la estación meteorológica cuya línea es la de color rojo, y mediante el sistema de seguimiento solar cuya línea es la de color negro. En el eje de las abscisas se muestra el tiempo en el que se realizó la adquisición de datos, así mismo en el eje de las ordenadas se muestra la intensidad de radiación solar en  $W/m^2$ . En dicha gráfica se puede observar que en el transcurso de las 10:00 am hasta la 16:00 pm, la captación de radiación solar tanto en el seguidor como en la estación meteorológica fue variante debido a la presencia de nubes en el medio ambiente, esto quiere decir que la radiación solar existente fue difusa, por lo que cualquier captación de radiación por un sensor orientado hacia la bóveda celeste es la misma. Sin embargo, en la gráfica también se pueden observar que existen dos lapsos de tiempo donde la captación de energía solar es marcadamente diferente entre ambos sensores de radiación, esto se debe a que en ambos eventos no se presentó nubosidad en un 90% y a que el sensor del seguidor solar capta radiación solar directa y difusa.



**Figura 4.1.** *Comportamiento de la radiación solar correspondiente al 1 de julio 2015.*

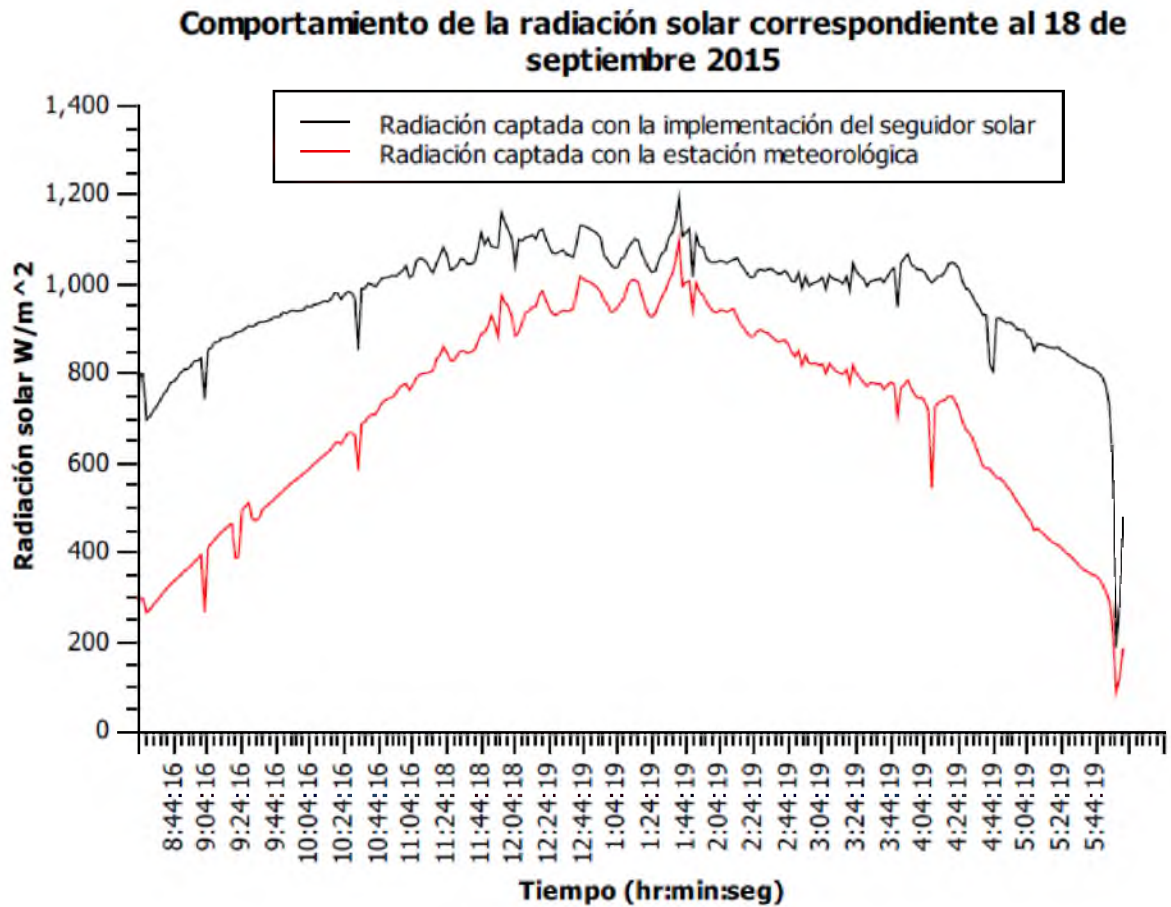
Para determinar la ganancia de captación de energía solar se consideraron los promedios de cada dos minutos correspondientes entre las 08:30 am hasta las 10:00 am y 16:00 pm hasta las 18:00 pm, con los cuales se pudo obtener un promedio tanto para las mediciones de radiación que realizó el piranómetro instalado en el seguidor como para las mediciones realizadas por la estación meteorológica. Los resultados de las mediciones anteriormente mencionadas se presentan en la **Tabla 4.1**, donde en la primera columna se presenta el tiempo donde la captación de energía fueron máximos durante las pruebas, en la segunda columna se muestra el registro de la intensidad de energía promedio captado por la estación meteorológica, del mismo modo en la tercera columna se muestra el registro de la intensidad de energía promedio captado por el piranómetro montado en el seguidor solar, y por último en la cuarta columna se muestra la diferencia en porcentaje de captación de energía para ambos casos, resultando que se logra obtener una ganancia del 34.5% de

energía solar en el plano del seguidor con respecto al que se puede obtener en un plano horizontal y fijo.

Tiempo (hr:min:seg)		Promedio de Radiación Captada con la Estación Meteorológica En (W/m <sup>2</sup> )	Promedio de Radiación Captada con la implementación del Seguidor Solar En (W/m <sup>2</sup> )	Porcentaje en Ganancia de Energía Solar (%)
08:30-10:00	am	500.23	763.39	34
16:00-18:00	pm			

**Tabla 4.1** *Valores promedio de radiación solar captado el 1 de julio del 2015 y ganancia de energía.*

La segunda prueba para el seguidor solar se llevó a cabo el día 18 de septiembre del 2015. La prueba se inició a las 8:26 am y finalizó a las 18:00 pm. En la **Figura 4.2** se muestra el comportamiento de la radiación solar captada con la estación meteorológica, cuya línea es la de color rojo y mediante el sistema de seguimiento solar que es la línea de color negro. En el eje de las abscisas se muestra el tiempo en el que se realizó la adquisición de datos, así mismo en el eje de las ordenadas se muestra la intensidad de radiación solar en W/m<sup>2</sup>. En la Figura se puede observar claramente una gran diferencia en cuanto a la captación de energía solar a lo largo del día, así también se puede ver que la máxima radiación solar captada por la estación meteorológica correspondiente al medio día solar está por debajo de la intensidad de radiación captada con la implementación del seguidor. Esto se debe a que el recorrido del sol cada vez se está inclinando más hacia el sur puesto que se aproxima el equinoccio de otoño, por lo que los rayos del sol llegan cada vez más inclinados a la estación meteorológica, lo que para el piranómetro del seguidor no le afecta estos cambios puesto que siempre mide radiación directa y difusa.



**Figura 4.2** *Comportamiento de la radiación solar correspondiente al 18 de Septiembre 2015.*

En la **Tabla 4.2** se muestra el promedio de captación de energía solar para el seguidor solar y la estación meteorológica, también se muestra la ganancia promedio en porcentaje de captación de energía para ambos casos, resultando que se logra tener una ganancia del 27% de energía solar en el plano del seguidor con respecto al que se puede obtener en un plano colocado horizontalmente y fijo como el de la estación meteorológica.

Tiempo (hr:min:seg)		Promedio de Radiación Captada con la Estación Meteorológica En (W/m <sup>2</sup> )	Promedio de Radiación Captada con la Implementación Del Seguidor Solar En (W/m <sup>2</sup> )	Porcentaje en Ganancia de Energía Solar (%)
08:26	am	711.62	977.24	27
18:00	pm			

**Tabla 4.2** *Valores promedio de radiación solar captado el 18 de Septiembre 2015 y ganancia de energía.*

Con base a los resultados obtenidos, se puede concluir que la ganancia de energía solar se puede incrementar en un 27 % con la implementación de un sistema de seguimiento solar manipulado por un sistema de control como el desarrollado en este trabajo de tesis. Sin embargo, es necesario mencionar que, a diferencia de la primera prueba en la que se obtuvo una ganancia de energía del 34 %, ésta ganancia es menor debido a que para obtener el promedio de radiación captado tanto para el sistema de seguimiento como para la estación meteorológica se considero todo el lapso de tiempo en el que duró el experimento de la segunda prueba, caso diferente en la prueba número uno en donde solo se evaluó esta ganancia de energía dos horas por la mañana y dos horas por la tarde debido a la alta nubosidad dispersa que se presentó durante el transcurso de las 10:00 am hasta la 16:00 pm. Esto quiere decir que durante la prueba número dos, en el intervalo de las 11:30 am hasta las 14:30 pm.

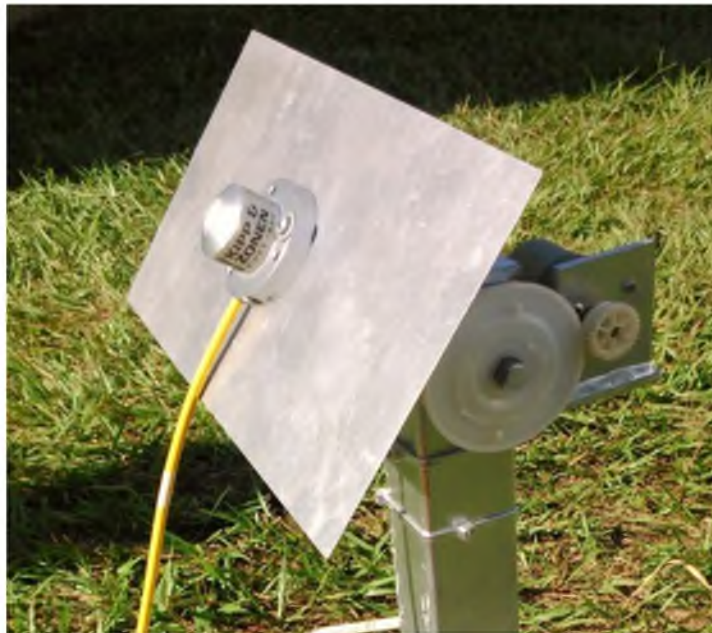
#### **4.2 Evaluación de la incertidumbre de control**

Uno de los puntos importantes en este trabajo de tesis es determinar la incertidumbre del control con el que va a ser manipulado el sistema de seguimiento. Puesto que se necesita obtener la menor incertidumbre posible para posicionar al captador solar perpendicular a los rayos del sol y poder adquirir la mayor ganancia de energía a lo largo del día. Como primer punto se consideró el error que tienen las ecuaciones solares siendo este de 0.01% del cálculo realizado. Por otra parte también se cuenta con un error llamado

error de redondeo. Este error se presenta debido a que los resultados obtenidos de las ecuaciones solares son valores flotantes, lo que hace difícil la comparación entre este valor y el valor de ángulo interpretado por los potenciómetros de precisión.

Para poder comparar ambos valores se llevó a cabo la separación entre el valor entero y la parte decimal con la finalidad de verificar si la parte fraccionaria es mayor que el valor de 0.5 y así poder determinar hacia qué valor redondear ya sea hacia el próximo valor inmediato o simplemente eliminar la parte fraccionaria. Por lo que el error por redondeo es de  $\pm 0.5^\circ$ , lo que representa un error de posicionamiento menor a lo reportado en los trabajos referentes a la incertidumbre de posicionamiento.

En la **Figura 4.3** se puede observar como el sistema de seguimiento dirige a un captador solar en dirección del sol. Esta imagen muestra visualmente como el error de posicionamiento obtenido en este trabajo es aceptable ya que dicho captador no proyecta sombra sobre la superficie plana del sistema.



**Figura 4.3** Sistema de seguimiento orientado en dirección del sol.

### 4.3 Estudio comparativo del comportamiento diario del seguidor solar respecto a una referencia

Para llevar a cabo el estudio comparativo del comportamiento diario de los ángulos de azimut solar y el ángulo de altura solar se utilizó como referencia una página WEB [22] la cual permite localizar cualquier lugar del globo terráqueo ya sea por coordenadas geográficas (*latitud y longitud*) o por nombre del mismo. Así también permite conocer los ángulos de azimut y de altura solar que determinan la posición solar en cualquier momento del día y por ende la trayectoria aparente del sol. En la **Tabla 4.3 y 4.4** se muestra un comparativo entre los valores para el ángulo de altura solar como para el ángulo de azimut solar obtenidos de la página web y los calculados con las ecuaciones descritas en este trabajo y los medidos por los potenciómetros y la tarjeta ARDUINO correspondientes a las pruebas realizadas el 01 de Julio y 18 de Septiembre del año 2015.

Tiempo (hr)	Ángulo de Referencia		Ángulo Calculado		Ángulo del Seguidor Solar	
	Altitud Solar	Azimut Solar	Altitud Solar	Azimut Solar	Altitud Solar	Azimut Solar
6	1.01	24.03	1.09	24.01	1	24
7	14.22	20.06	14.31	20.05	14	20
8	27.74	17.13	27.83	17.13	28	17
9	41.44	15.19	41.53	15.21	42	15
10	55.22	14.65	55.31	14.69	55	15
11	68.95	17.44	69.04	17.55	69	18
12	81.86	38.99	81.92	39.57	82	40
12:27	85.01	88.73	84.8	89.87	85	90
13	80.9	145.37	80.8	145.52	81	146
14	67.81	163.09	67.7	163.03	68	163
15	54.06	165.41	53.95	165.34	54	165
16	40.28	164.72	40.17	164.65	40	165
17	26.59	162.69	26.49	162.62	26	163
18	13.09	159.68	12.99	159.6	13	160
19	-0.1	155.62	-0.18	155.53	0	156

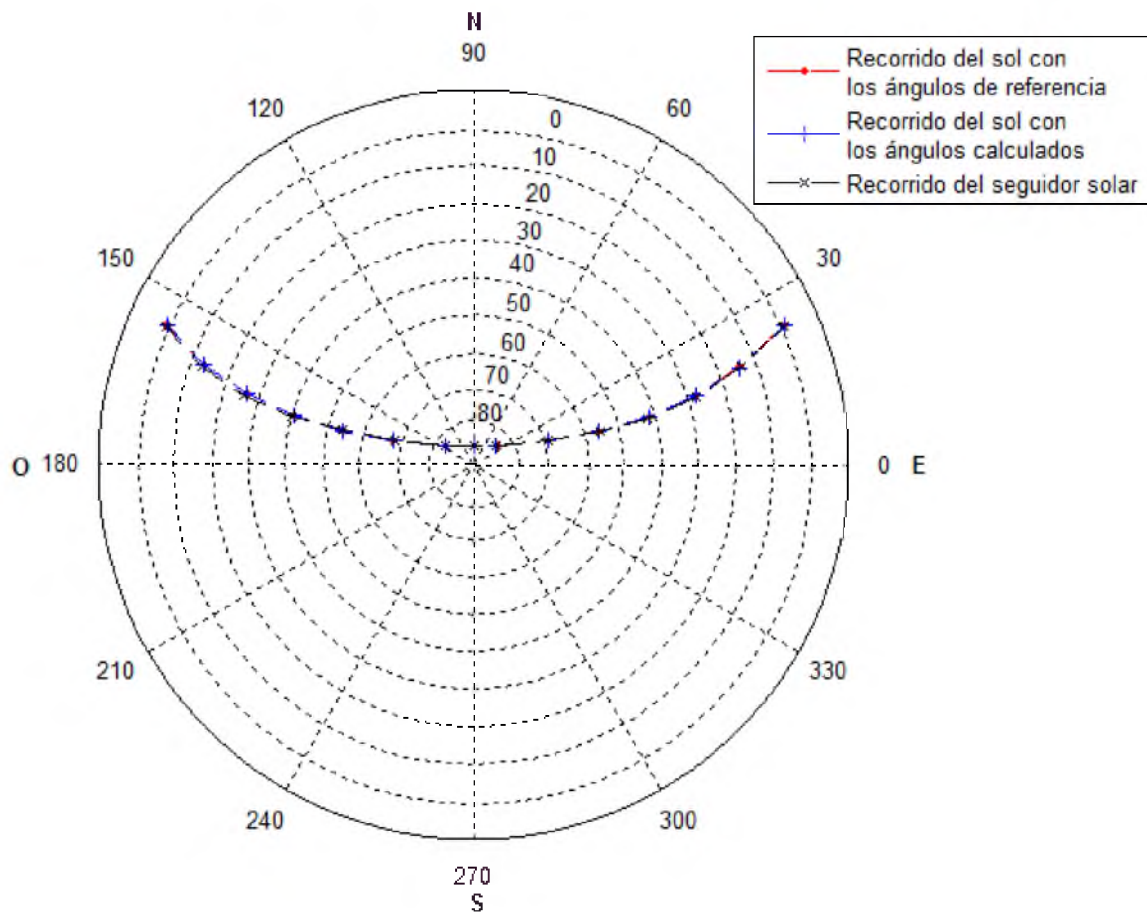
**Tabla 4.3** Comparativa entre los ángulos de referencia, los ángulos calculados y los ángulos del seguidor solar correspondientes al 1 de Julio

Tiempo (hr)	Ángulo de Referencia		Ángulo Calculado		Ángulo del Seguidor Solar	
	Altitud Solar	Azimet Solar	Altitud Solar	Azimet Solar	Altitud Solar	Azimet Solar
6	-3.65	-3.18	-3.91	-2.34	-4	-2
7	10.6	1.51	10.33	2.33	10	2
8	24.81	6.53	24.53	7.4	25	7
9	38.87	12.72	38.55	13.69	39	14
10	52.49	21.78	52.1	22.93	52	23
11	64.91	38.32	64.36	39.66	64	40
12	73.11	74.55	72.35	75.15	72	75
12:18	73.68	90.21	72.9	90.15	73	90
13	70.66	123.58	70.01	122.37	70	122
14	60.06	149.8	59.64	148.56	60	149
15	46.98	162.33	46.68	161.35	47	161
16	33.12	169.89	32.89	169.08	33	169
17	18.98	175.45	18.78	174.74	19	175
18	4.72	180.23	4.54	179.57	5	180
19	-23.67	190.16	9.69	184.28	10	184

**Tabla 4.4** Comparativa entre los ángulos de referencia, los ángulos calculados y los ángulos del seguidor solar correspondientes al 18 de Septiembre.

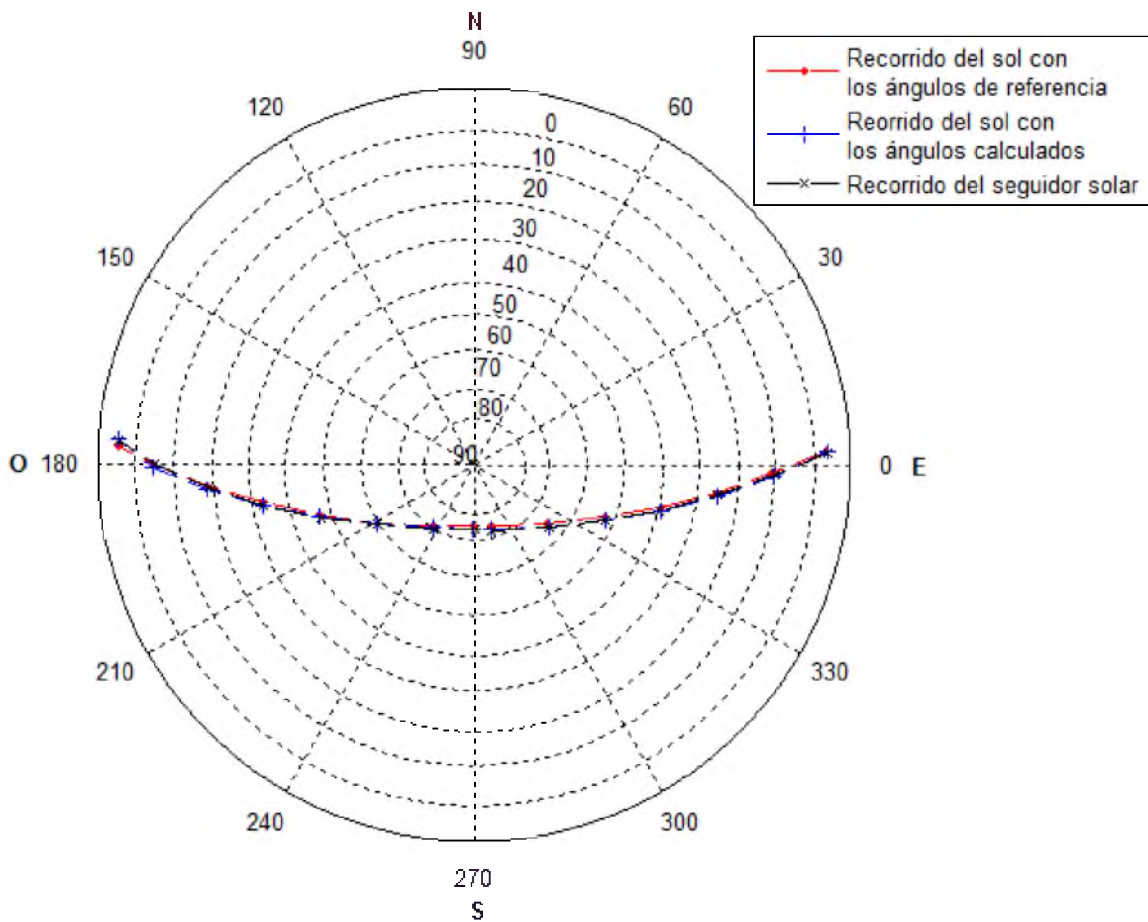
Así también las **Figuras 4.4 y 4.5** muestran una gráfica polar (*Ángulo Azimet VS Ángulo de Altura*) que describen el comportamiento del recorrido del sol para los dos días en los que se llevaron a cabo las pruebas experimentales mencionadas. En las gráficas se puede observar que a simple vista no existe una diferencia significativa la trayectoria de referencia (*color rojo*) obtenida por la página de internet y la trayectoria (*color negro*) descrita por las ecuaciones solares.

En la **Figura 4.4** se puede observar que el recorrido del sol se llevo a cabo entre el plano ENO y EZO. Esto se produjo debido a que los días 21 de junio, el planeta tierra tiene un evento conocido como solsticio de verano. Durante este proceso el hemisferio norte del planeta tierra se inclina más hacia en dirección del sol, lo que provoca que los días sean más largos que la noche y además que los rayos del sol incidan de manera casi perpendicular. En la **Figura 2.2** del Capítulo 2 se puede apreciar mejor este evento.



**Figura 4.4** Recorrido del sol correspondiente al 1 de Julio 2015.

En relación con lo anterior, para la prueba de seguimiento realizada el 18 de septiembre, la mayor parte del recorrido excepto por la salida y puesta del sol, se llevó a cabo entre el plano ESO y ECO tal como se muestra en la **Figura 4.5**. Esto sucedió debido a que se acercaba la fecha en la que sucedería el siguiente evento conocido como equinoccio de otoño. Durante este evento el plano horizontal del planeta tierra se posiciona perpendicular al eje de rotación del sol, lo que provoca que los días demoren lo mismo que la noche. Sin embargo este efecto solo se produce durante tres días marcados a partir del 21 hasta el 24 de septiembre, a partir de ahí los días se van haciendo más cortos que la noche, puesto que el próximo evento es el 21 de diciembre donde el recorrido del sol se efectúa entre el plano ESO y ECO, (ver **Figura 2.7**).



**Figura 4.5** Recorrido del sol correspondiente al 18 de Septiembre 2015.

Sin embargo, al realizarle un zoom a cada una de las gráficas polares presentadas en el párrafo anterior, se observa que la posición solar de la referencia web y la evaluada por ecuaciones solares se encuentran dentro de una incertidumbre de posición de  $\pm 1^\circ$ , y que la incertidumbre de posición de estas dos referencias con respecto a la medida por los potenciómetros y la tarjeta ARDUINO es de  $\pm 1^\circ$ , como se muestra en la **Figura 4.6**.

Por lo que podemos concluir que el seguimiento solar realizado por el seguidor desarrollado en este trabajo presenta una baja incertidumbre de posicionamiento de  $\pm 1^\circ$ , que comparado con otros trabajos presentados en la revisión bibliográfica muestra un mejoramiento en cuanto a precisión.



# Capítulo 5

## Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

En este capítulo, se presentan las conclusiones de este proyecto de tesis y las recomendaciones para trabajos futuros.

### 5.1 Conclusiones.

1. Se llevó a cabo el estudio de las ecuaciones solares y se encontró que el sol realiza tres recorridos distintos a lo largo del año, dos de estos los realiza sobre el plano Este-Sur-Oeste y uno lo hace sobre el plano Este-Norte-Oeste.
2. Se construyó el modelo a escala de seguimiento solar de dos grados de libertad que sirvió para validar el sistema de control.
3. Se logró obtener una relación Ángulo-Voltaje de los potenciómetros la cual permitió conocer la posición de ambos grados de libertad del sistema de seguimiento.
4. Se implementó una estrategia de control de seguimiento solar para un modelo a escala basado en las ecuaciones solares.
5. El sistema de control implementado permitió evaluar el ángulo de altura solar y el ángulo de azimut solar en el intervalo de las horas luz.
6. Se logró definir el sistema de control encargado de llevar a ambos grados de libertad a la posición de referencia dictaminada por las ecuaciones solares. Este sistema de control fue el ON-OFF.
7. Se llevaron a cabo dos pruebas experimentales de seguimiento solar correspondientes a los días 1 de Julio 2015 y 18 de Septiembre del mismo año.
8. Se observó que cuando se presentan lluvias o hay alta presencia de nubes la ganancia de energía obtenida con el sensor colocado sobre el sistema de seguimiento es semejante a la obtenida por un sensor colocado en un sistema con posición horizontal o vertical ya que la radiación existente en el ambiente es difusa.
9. Se observó que cuando se presentan condiciones atmosféricas aceptables, la ganancia de energía es 35% mayor con la implementación del sistema de seguimiento a uno fijo.
10. Se logró obtener un error de posición para ambos grados de libertad de  $\pm 1^\circ$ .

**5.2 Recomendaciones para trabajos futuros.**

- 1) Debido a los tres recorridos distintos del sol y para que el sistema funcione completamente de manera autónoma, se debe colocar un potenciómetro de precisión de mínimo dos vueltas y sin tope para que cuando el recorrido del sol pase de un plano a otro el sistema de seguimiento se autoajuste y no tenga problemas para llevar a cabo el seguimiento del sol.
- 2) Es conveniente llevar a cabo el diseño del seguidor solar para evitar problemas de inercia mecánica entre otros y así ayudar al sistema de control a ser más eficiente.

**Bibliografía.**

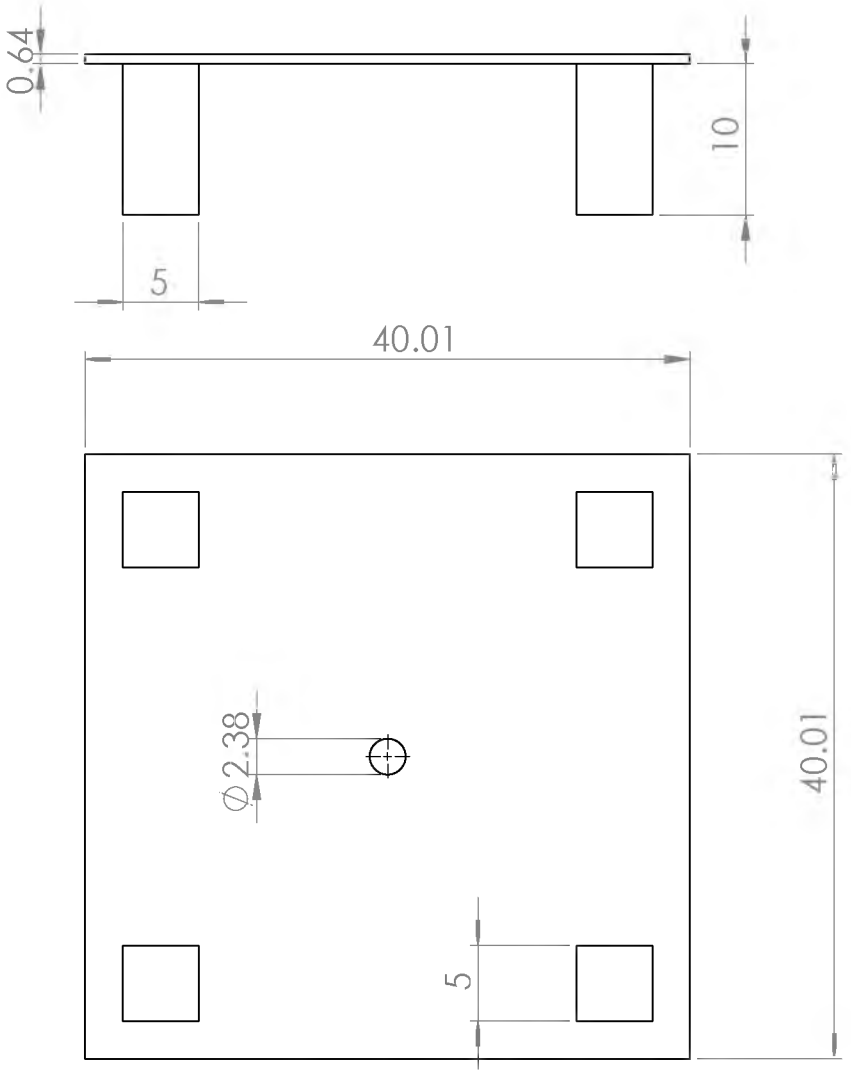
1. Arafat K. T., Tanzil S., Rahman R., Alam S. (2010). "Desing and Construction of an Automatic Solar Tracking System". 6<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Computer Enineering.
2. Beltrán A. J. (2007). "Prototipo Fotovoltaico con Seguimiento del Sol para Procesos Electroquímicos". Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, cenidet. Cuernavaca Morelos, México.
3. Casas V. M. y Rodriguez A. A. (2012).Biblioteca de Electricidad y Electrónica Serie 1, Editorial Altamar S.A. España.
4. Clark N. (2004). "Photopack-The Sun". Stuart Clark, Edit. Folens Limited, pp 10-14.
5. Crutchik N. M. (1985). "Dispositivo de Seguimiento Solar Dedicado". Universidad del Norte Antofagasta, Chile.
6. De La Cruz C. (2012). "Seguidor Solar Cronológico Adaptivo para Paneles Fotovoltaicos". Universidad Continental de Ciencias e Ingeniería. Huancayo, Junín, Perú. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática.
7. Duffie J. A. y Beckman W. A. (2006). "*Solar Engineering of Thermal Processes*". Third Edition, pp 9-20. John Wiley & Sons, INC. Hoboken, New Jersey.
8. Guo L., Ham J., W. Otieno A. (2013). "Desing and Simulation of a Sun Tracking Solar Power System". 120<sup>th</sup> ASEE Annual Conference & Exposition.
9. Hoyos D., Gea M., Cadena C., Echazú R. (2008). "Diseño y Construcción de Seguidores Solares". Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 12.
10. José-Ulises Castellanos. "Experimentación del Hardware de Control para un Seguidor Solar". *Revista Ingeniería Solidaria*, vol. 7, núms. 12-13, 2011, pp 53-59.
11. Lamaison R. M. (2009). "*Energía Solar Fotovoltaica (ESF), Radiación Solar*".
12. Lane B. 2008. "Solar Tracker". Department of Electrical and Computer Engineering. Cleveland State University.
13. Ozuna H. G. J., Anaya P. M. E., Pitalua D. N., Anaya E. C. (2010). "Diseño y Elaboración de Prototipo Seguidor Solar de dos Grados de Libertad para Celdas

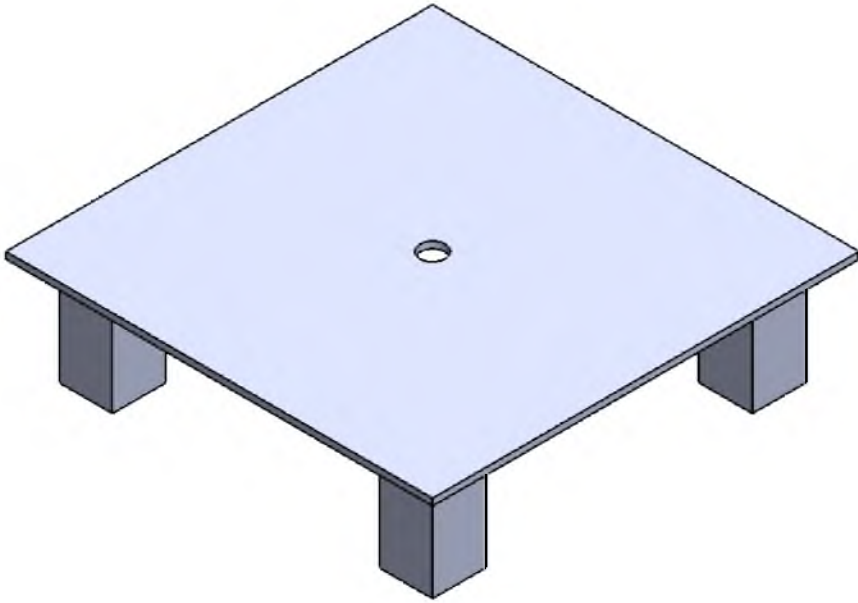
- Solares Fotovoltaicas”. EPISTEMUS. Ciencia, Tecnología y Salud. Universidad de Sonora, Número 9.
14. Patole J., Apte A., Suryawanshi S. (2013). “Design & Development of Bidirectional Solar Tracking System Implemented in Western Region of Maharashtra”. IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN).
  15. Pineda A. M, Manríquez C. J. D, Hernández C, Arjona M. A. (2014). “Diseño Mecánico del Seguidor Solar TPF-ITL”. 3er Congreso Nacional de Electromecánica y Electrónica.
  16. Pintos L. C. (2010). “Seguidor Solar Ligero para Cubiertas”. Universidad Pontificia Comillas.
  17. Pratap S. K., Gupta B., Singh B. B., Pandya M. (2014). “Performance Analysis of Automatic Hybrid Solar Tracking System with Different Types of Solar Cell Materials”. International Journal of Innovation in Engineering Research & Management.
  18. Rodríguez R. C., Jutinico A. A. L., Varón P. D., Forero C. N. (2013). “Diseño del Control Digital de un Seguidor Solar para la Medición de Radiación Solar Directa en Bogotá”. Fifth International Symposium on Energy. Puerto Rico Energy Center-Laccei.
  19. Sierra F., Caro E., Mejía F. (2008). “Tecnologías para el Aprovechamiento de la Energía Solar”. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
  20. Shoukun Xu, Dan Kong, Zhenghua Ma, LiuJun Yao. (2011). “The implementation og High-Precision Solar Tracking System”. Department og Information Science and Engineering, Changzhou Univerty, China.
  21. Tejada D. C. A., Motoche R. L. C. (2012). “Posicionamiento de Paneles Solares Usando Lógica Difusa para Prácticas de Laboratorio de Control Automático”. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
  22. Top100-Solar Italia. “*SunEarthTools.com*”. Citado en: [http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun](http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun).
  23. Valencia V. D. F., Rosero C. C. F. (2012). “Diseño de un Sistema Computacional para Optimizar la Generación de Potencia de un Sistema Fotovoltaico Autónomo”. Universidad de San Buenaventura Cali. Facultad de Ingeniería.

24. Yousef H. A. (1999). "Design and Implementation of a Fuzzy Logic Computer-Controlled Sun Tracking System". Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Volume 3 of 3.

# Apéndice A

Planos Constructivos





**Universidad  
del  
Papaloapan**

Ingeniería en  
Mecatrónica

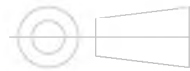
Campus  
Loma Bonita

**Plataforma del  
Seguidor Solar**

Dibujo:  
**1**

Fecha:  
**15/12/15**

Material:  
**Aluminio / Madera**

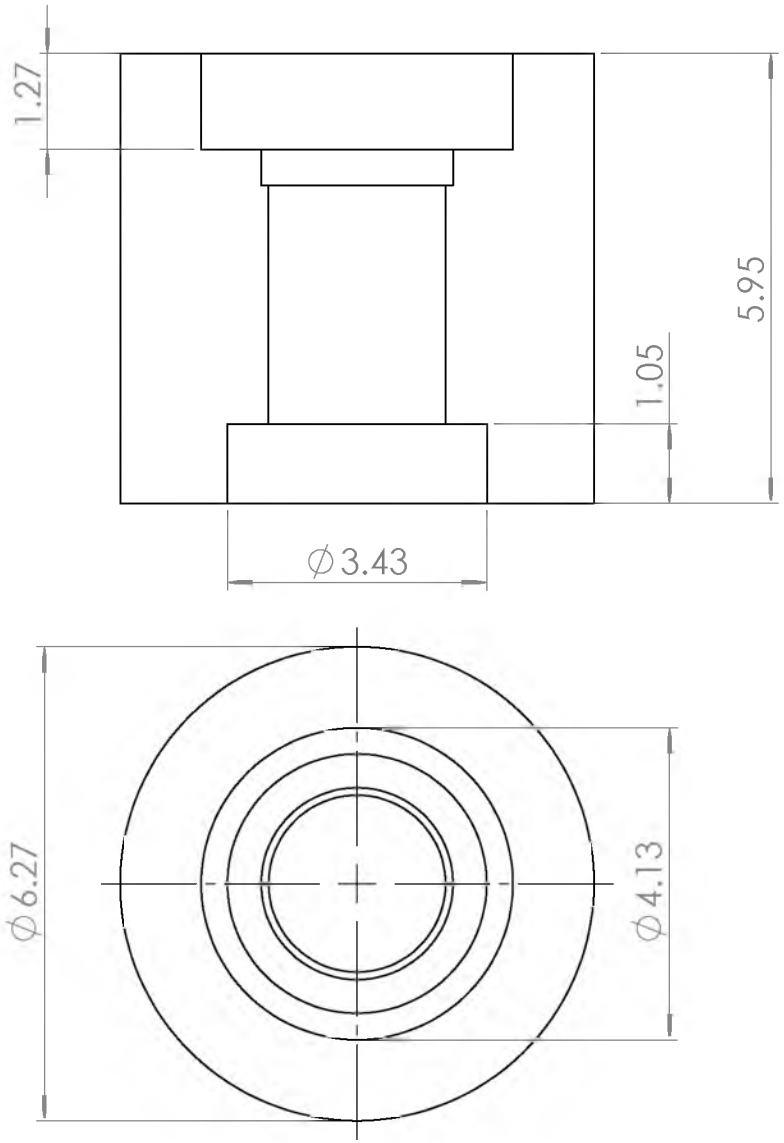


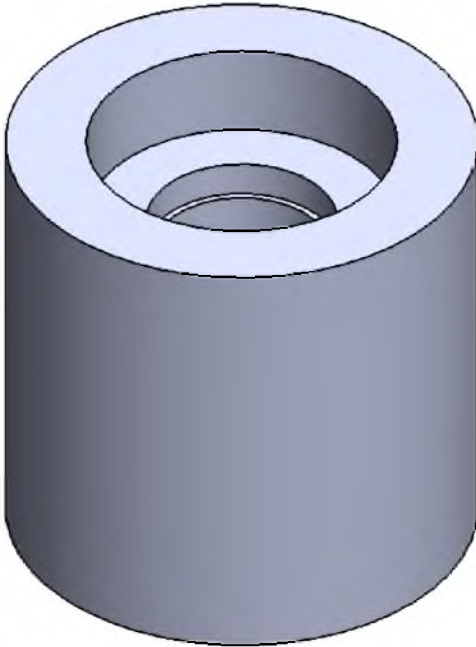
Unidad:

**cm**

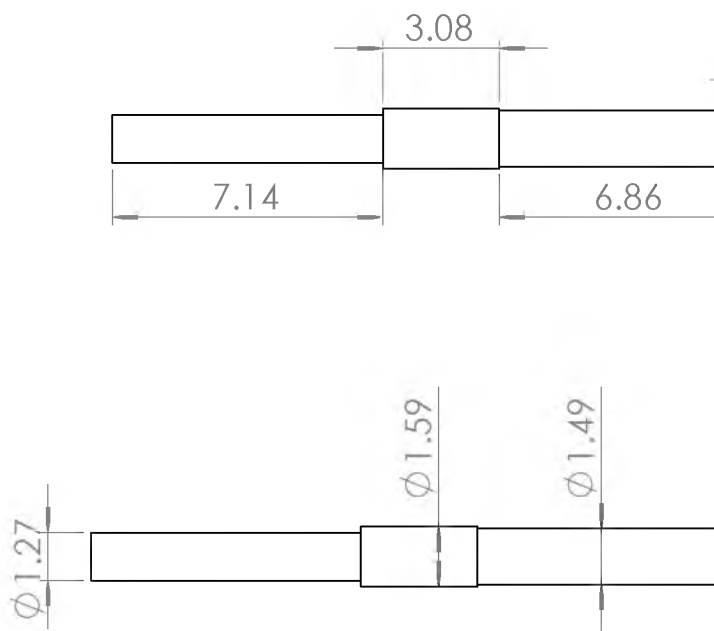
Escala:

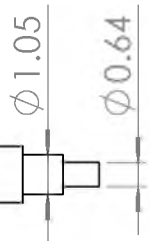
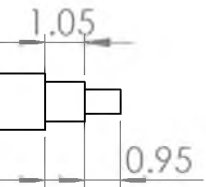
**1:1**



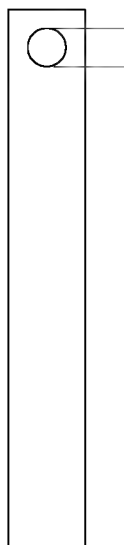
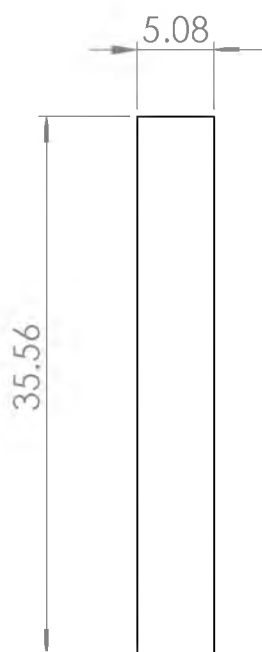


<b>Universidad del Papaloapan</b>  Ingeniería en Mecatrónica  Campus Loma Bonita	Base para el Soporte de los Rodamientos Para el grado de libertad OMEGA		
	Dibujo: <b>2</b>	Fecha: <b>15/12/15</b>	Unidad: <b>cm</b>
	Material: <b>Aluminio</b>		Escala: <b>1:1</b>





<p><b>Universidad del Papaloapan</b></p> <p>Ingeniería en Mecatrónica</p> <p>Campus Loma Bonita</p>	<p>Eje para el Grado de Libertad OMEGA</p>		
	<p>Dibujo: <b>3</b></p>	<p>Fecha: <b>15/12/15</b></p>	<p>Unidad: <b>cm</b></p>
	<p>Material: <b>Aluminio</b></p>		<p>Escala: <b>1:1</b></p>



Ø 2.54



**Universidad  
del  
Papaloapan**

Ingeniería en  
Mecatrónica

Campus  
Loma Bonita

**Brazo Principal del  
Seguidor Solar**

Dibujo:  
**4**

Fecha:  
**15/12/15**

Material:  
**PTR**

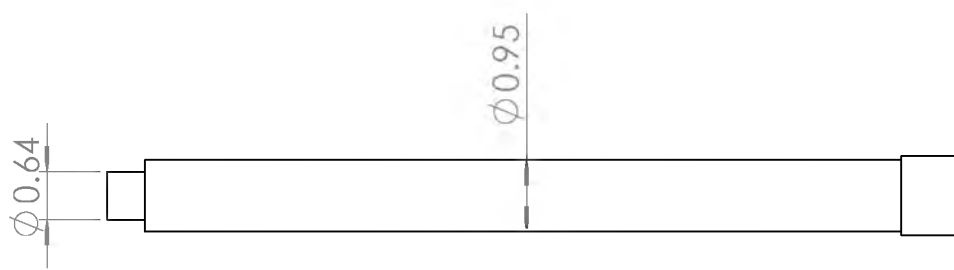
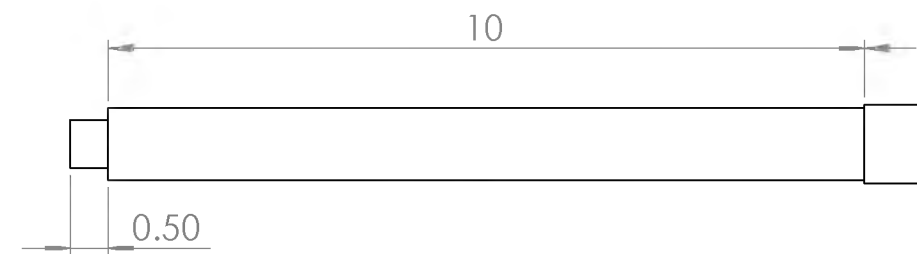


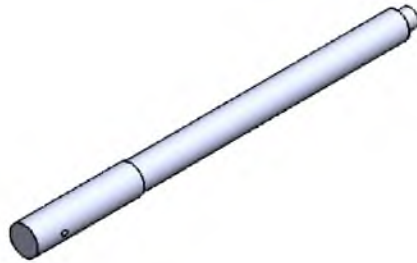
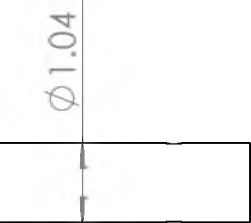
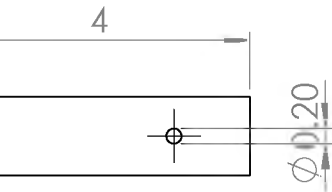
Unidad:

**cm**

Escala:

**1:1**





**Universidad  
del  
Papaloapan**

Ingeniería en  
Mecatrónica

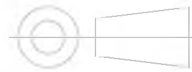
Campus  
Loma Bonita

**Eje del Grado de  
Libertad PHI**

Dibujo:  
**5**

Fecha:  
**15/12/15**

Material:  
**Metal**



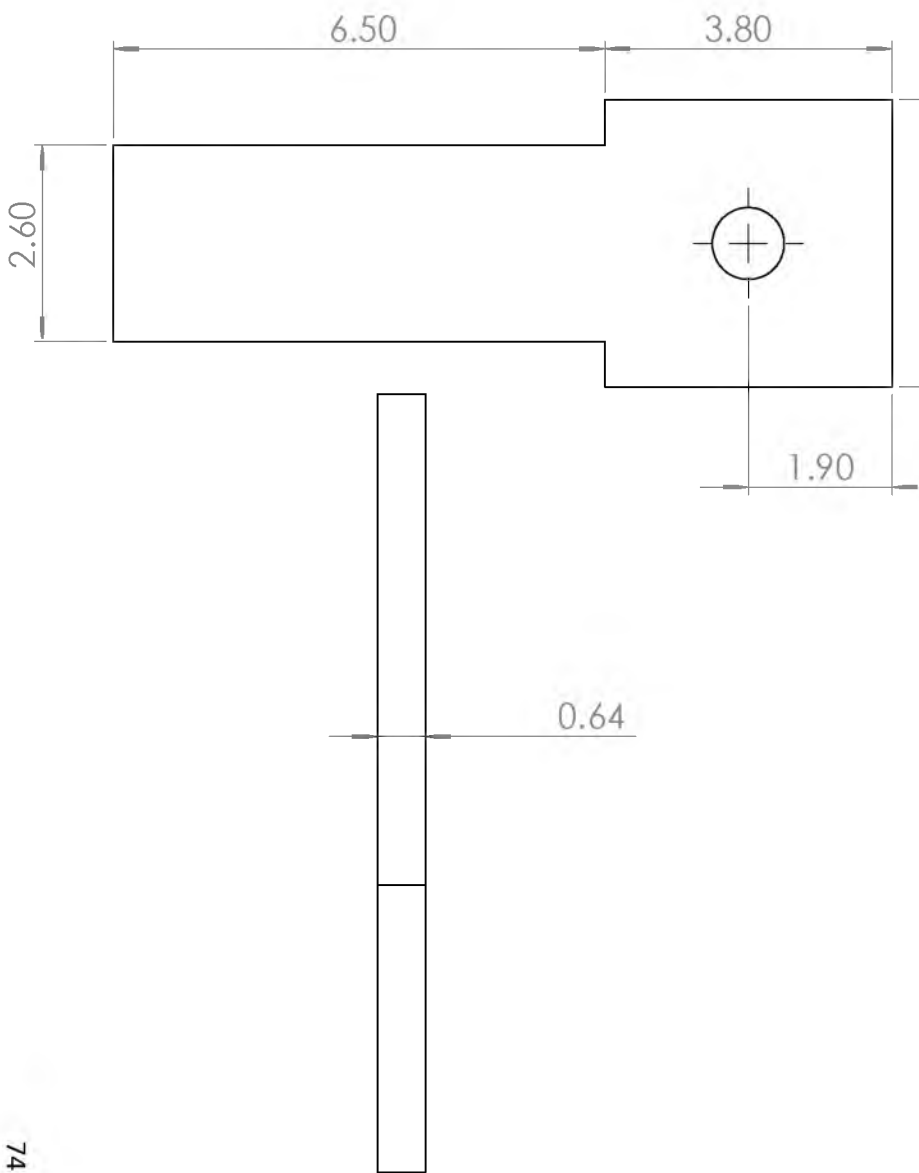
Unidad:

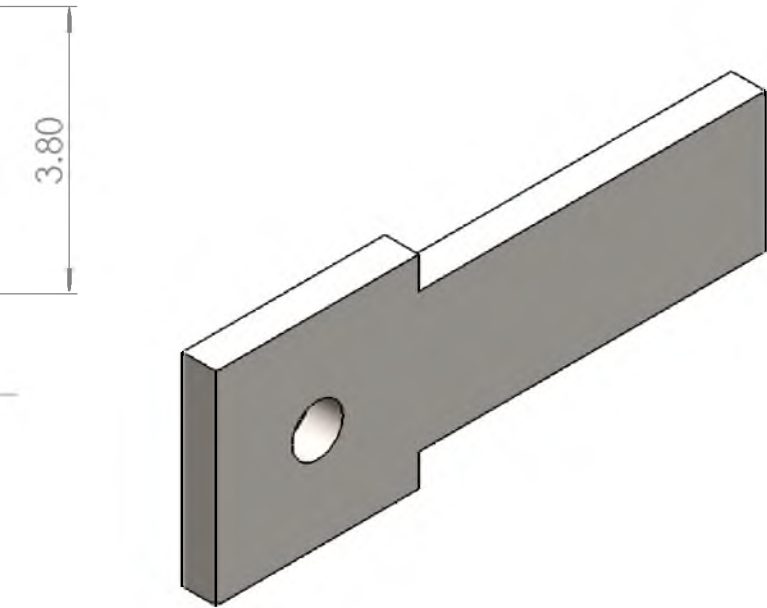
**cm**

Escala:

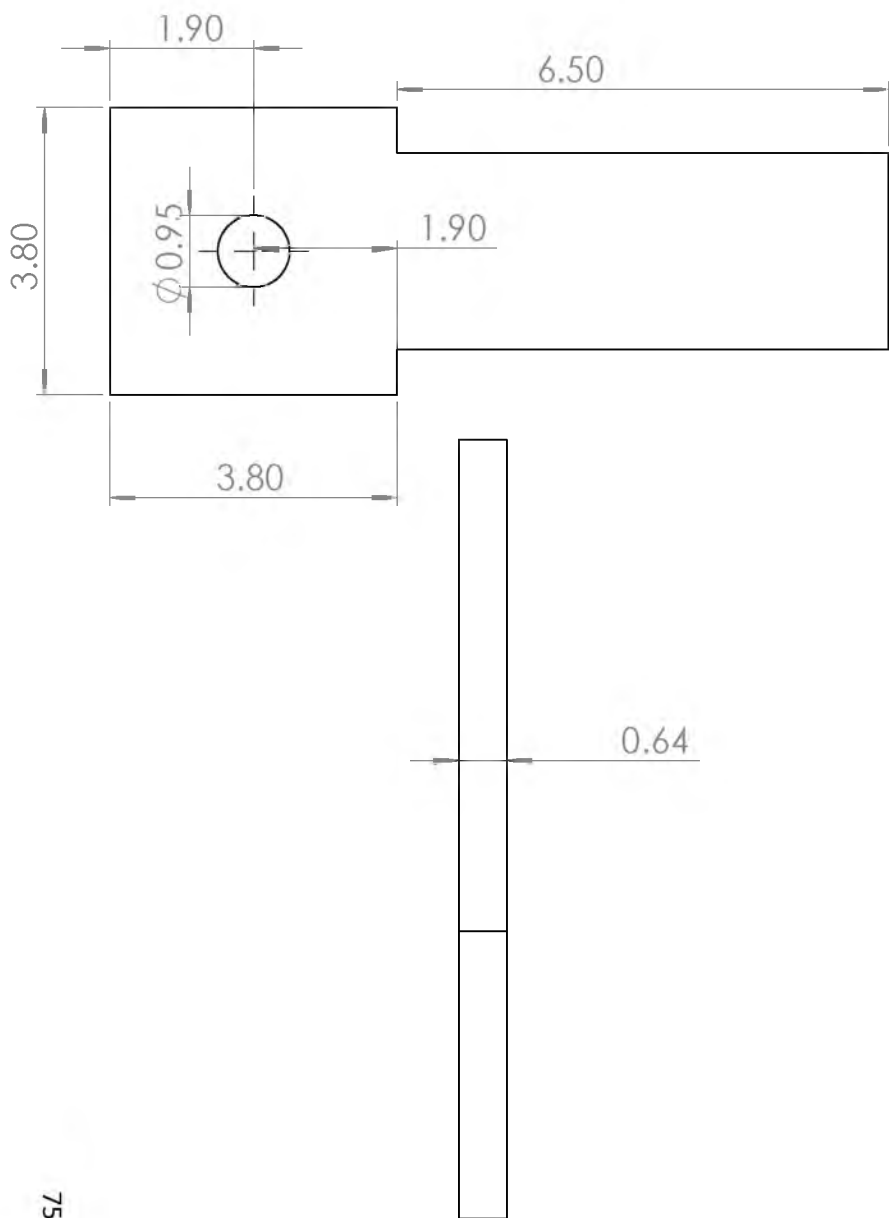
**1:1**

APÉNDICE A

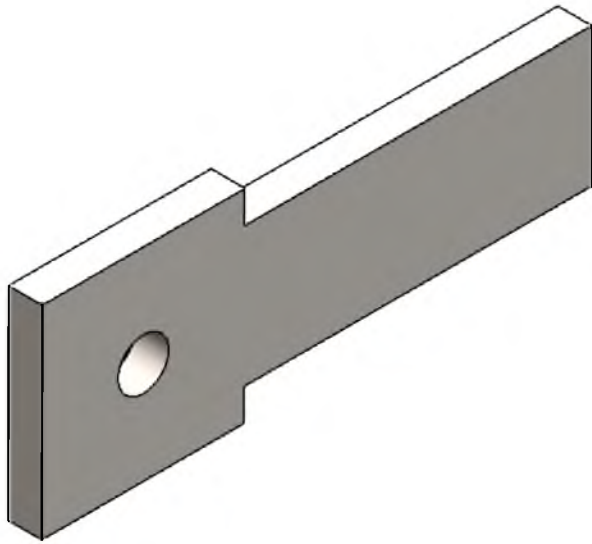





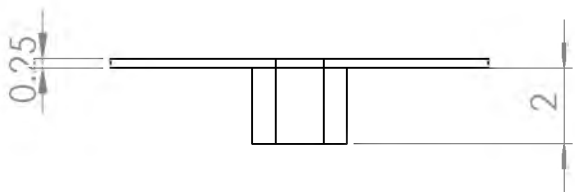
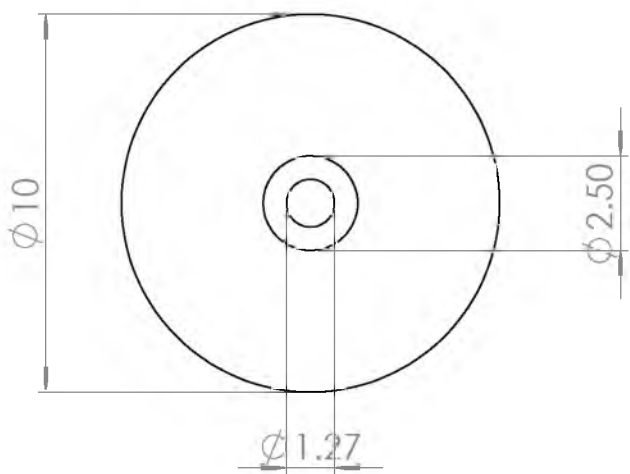
<b>Universidad del Papaloapan</b>  Ingeniería en Mecatrónica  Campus Loma Bonita	<b>Brazo Secundario Izquierdo</b>		
			Unidad: <b>cm</b>
	Dibujo: <b>6</b>	Fecha: <b>15/12/15</b>	Escala: <b>1:1</b>
		Material: Solera 2.54 cm Solera 3.81 cm	

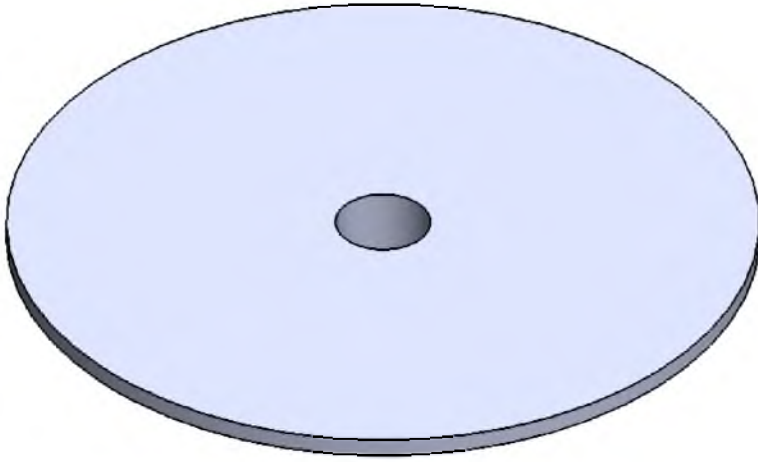


2.60



<b>Universidad del Papaloapan</b>  Ingeniería en Mecatrónica  Campus Loma Bonita	<b>Brazo Secundario Derecho</b>		
	Dibujo: <b>7</b>	Fecha: <b>15/12/15</b>	Unidad: <b>cm</b>
	Material:	Solera 2.54 cm Solera 3.81 cm	Escala: <b>1:1</b>





**Universidad  
del  
Papaloapan**

Ingeniería en  
Mecatrónica

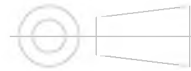
Campus  
Loma Bonita

Soporte del brazo  
principal del seguidor  
solar

Dibujo:  
**8**

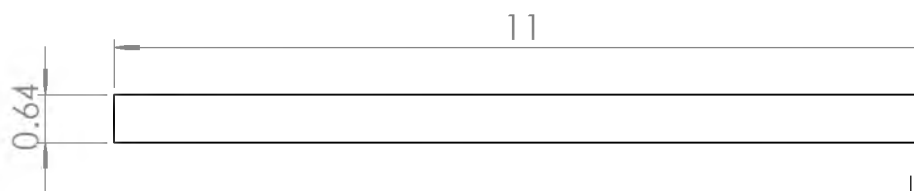
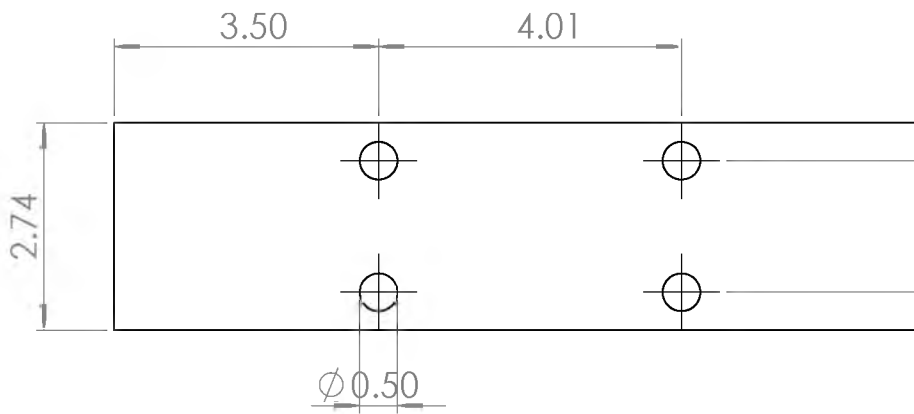
Fecha:  
**15/12/15**

Material:  
Metal

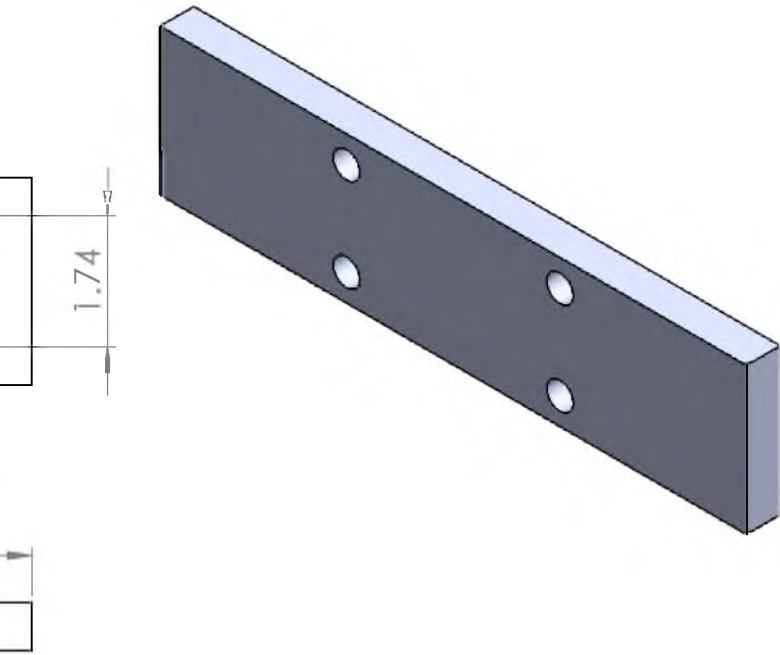


Unidad:  
**cm**

Escala:  
**1:1**



LL



**Universidad  
del  
Papaloapan**

Ingeniería en  
Mecatrónica

Campus  
Loma Bonita

**Soporte Para el  
Especimen de  
Referencia**

Dibujo:  
**9**

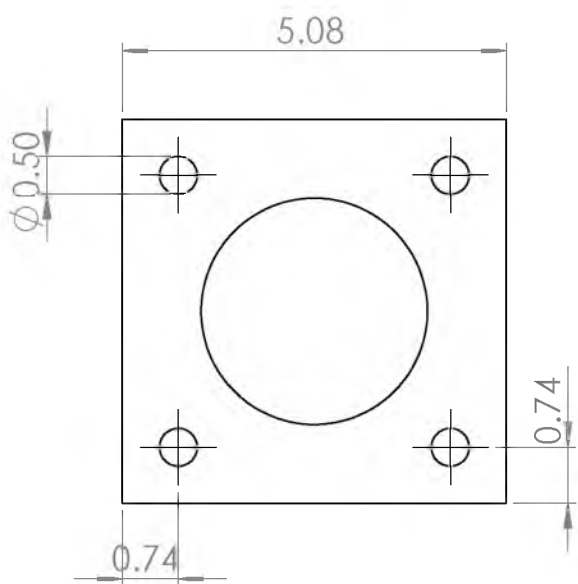
Fecha:  
**15/12/15**

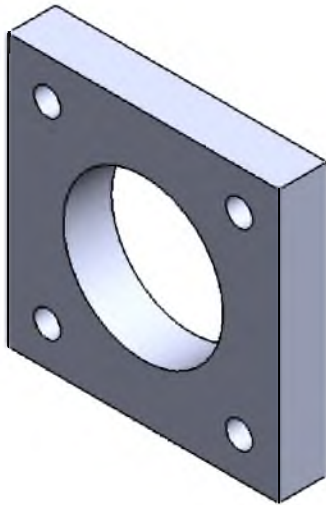
Material:  
Solera 3.81 cm



Unidad:  
**cm**

Escala:  
**1:1**





<b>Universidad del Papaloapan</b>  Ingeniería en Mecatrónica  Campus Loma Bonita	<b>Soporte para los Rodamientos de Grado de Libertad PHI</b>		
	Dibujo: <b>10</b>	Fecha: <b>15/12/15</b>	Unidad: <b>cm</b>
	Material: <b>Acrílico 0.5 cm</b>		Escala: <b>1:1</b>

# Apéndice B

Diagrama de Conexión para el Hardware de  
Control

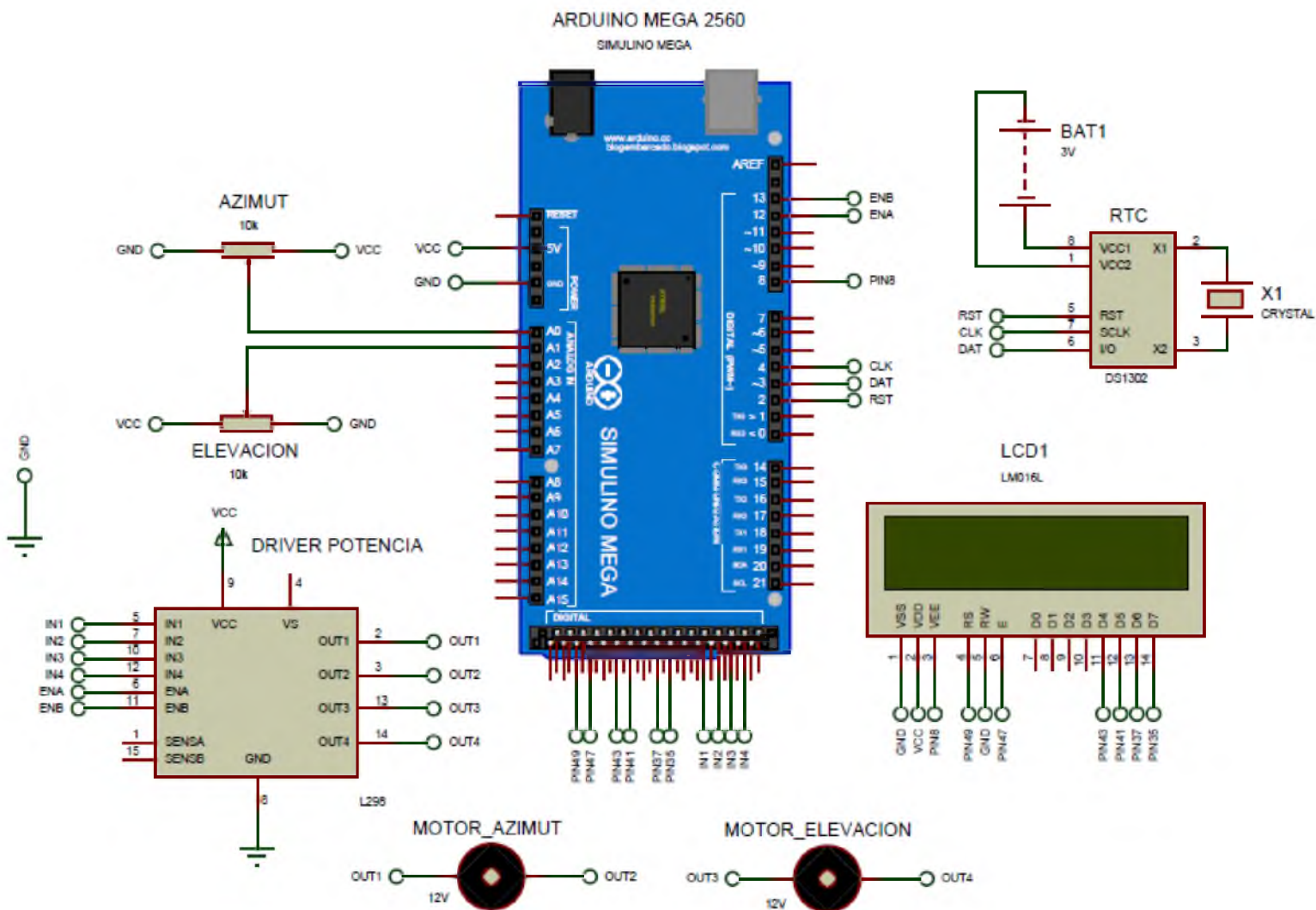


Figura B.1 Conexión del Hardware de Control.

En la **Figura B.1** se muestra la conexión del hardware de control para el sistema de seguimiento solar. El software que se utilizó para la realización de este esquema fue Proteus 8 Profesional. Así como también la librería Simulino V.3 para Proteus que facilitó el uso de las tarjetas Arduino para su simulación.

# Apéndice C

Algoritmo de Control

**Sección 1**

```
#include <math.h>
#include <tgmath.h>
#include <LiquidCrystal.h>
#include <DS1302.h>
#include <EEPROM.h>

DS1302 rtc(2, 3, 4);
LiquidCrystal lcd(49, 47, 43, 41, 37, 35);
Time t;
int H_Solar=0, Termina_Programa=0, bandera1=0, min_par=0;
int n=189, bandera=0;
int modulo1=0, modulo2=0, e=0, Corregir_Pos=0;
double Decli=0, Ang_del_Seg=0;
double ANTZ=0, aazs1=0, aazs2=0, Ang_AZS=0;
double aalts1=0, aalts2=0, aalts3=0;
long AAZS=0, Pos_del_Seg=0, AALTS=0;
float decli1=0, decli2=0, Sen_Pot=0;
float B=0, ANGH=0, Volt_Pot=0;
float et1=0, et2=0, et3=0, et4=0, ET=0;
float hs1=0, hs2=0, angh=0;
float HLD=0, HSS=0, HPS=0, hld1=0;
const float MES=90, LLE=95.8964586;
const float LATLC=18.0993107;
const float pi=3.141592654;
int HS=0, SIGN=0;
double Ang_AltS=0, Ang_del_Seg2=0;
int modulo3=0, modulo4=0, Corregir_Pos2=0, e2=0;
float Sen_Pot2=0, Volt_Pot2=0;
long Pos_del_Seg2=0;
```

**Sección 2**

```
void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    rtc.halt(false);
    rtc.writeProtect(false);
    lcd.begin(16, 2);
    analogWrite(8, 100);
    Byte_bajo=EEPROM.read(addr=0);
    Byte_alto=EEPROM.read(addr+1);
    dia=((Byte_bajo << 0) & 0xFF) + ((Byte_alto << 8) & 0xFF);
    n=dia;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.setCursor(7, 0);
    lcd.print(n);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("D. TRANSCURRIDOS");
    delay(4000);
    lcd.clear();
}
```

**Sección 3**

```
void loop()
{
    t = rtc.getTime();
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
```

```
lcd.print("HC =");  
lcd.print( t.hour);  
lcd.print(":");  
lcd.print( t.min);  
Serial.print(t.min, DEC);  
lcd.print(":");  
lcd.print( t.sec);
```

```
Funcion_ParametroB();  
Funcion_EcuacionT();  
Funcion_HoraSol_AngHor();
```

```
H_Solar=HS;  
hora=t.hour;
```

La condición que se muestra a continuación verifica si la hora civil es igual a las 23 horas y además si la variable undiamas es igual a cero en la cual si se cumple dicha condición el parámetro n se incrementa una unidad así también como la variable undiamas, esto es para que el programa ejecute solo una vez esta condición.

```
if(hora==23 && undiamas==0)  
{  
    n=n+1;  
    undiamas=1;  
}  
  
while(H_Solar >= 6 && H_Solar <= 17)  
{  
    Funcion_ParametroB();  
    Funcion_EcuacionT();  
    Funcion_HoraSol_AngHor();
```

```
H_Solar=HS;
n=día;
Termina_Programa=0;
while(Termina_Programa == 0)
{
    lcd.clear();
    t = rtc.getTime();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("HC =");
    lcd.print( t.hour);
    lcd.print(":");
    lcd.print( t.min);
    lcd.print(":");
    lcd.print( t.sec);
    Funcion_ParametroB();
    Funcion_EcuacionT();
    Funcion_HoraSol_AngHor();
    H_Solar=HS;
```

La siguiente condición verifica si la hora solar es igual a las 18 horas, y si es el caso ordena el sistema de control que se vaya a la posición de referencia.

```
if(H_Solar == 18)
{
    Sen_Pot = analogRead(A0);
    Sen_Pot= map(Sen_Pot, 0, 1023, 0, 255);
    Volt_Pot=Sen_Pot/51;//Float
    Pos_del_Seg=(((Volt_Pot-0.13725)/0.014706)+10)-20;//
    Ang_A=((60*Volt_Pot)/0.84)-1.43;//Long
    Ang_del_Seg=(int)Pos_del_Seg;//Ang_Az=(int)Ang_A;
```

```
Pos_del_Seg=Ang_del_Seg*100;//Ang_A=Ang_A*100;
modulo2=(Pos_del_Seg%100);//co=(Ang_A%100);

if(modulo2 > 50)
{
    Ang_del_Seg=Ang_del_Seg+1;
}
Corregir_Pos=1;
if(n <= 131 || n >= 215)//Este - Sur - Oeste
{
    digitalWrite(24, LOW);
    digitalWrite(26, HIGH);
}
else
{
    digitalWrite(24, HIGH);
    digitalWrite(26, LOW);
}

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Pos descanso = 0");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Pos. Seg=");
lcd.print(    Ang_del_Seg);
delay(2000);

while((Corregir_Pos==1) && (0 < Ang_del_Seg-1))//while((Corregir_Pos==1) &&
(Ang_AZS>=Ang_del_Seg+1.2 || Ang_AZS<=Ang_del_Seg-1.2))
{
    Sen_Pot = analogRead(A0);
```

```
Sen_Pot= map(Sen_Pot, 0, 1023, 0, 255);
Volt_Pot=Sen_Pot/51;
Pos_del_Seg2=(((Volt_Pot-0.13725)/0.014706)+10)-20;
Ang_del_Seg2=(int)Pos_del_Seg2;
Pos_del_Seg2=Ang_del_Seg2*100;
modulo2=(Pos_del_Seg2%100);
analogWrite(13, 75);
if(modulo2 > 50)
{
    Ang_del_Seg2=Ang_del_Seg2+1;
}
lcd.setCursor(9,1);
lcd.print(Ang_del_Seg2);
delay(20);
}
Corregir_Pos=0;
analogWrite(13, 0);
```

Ahora sigue Control Pos de Altura hacia Pos de Descanso

```
delay(1000);
Sen_Pot2=analogRead(A1);
Sen_Pot2= map(Sen_Pot2, 0, 1023, 0, 255);
Volt_Pot2=Sen_Pot2/51;
Pos_del_Seg2=(((Volt_Pot2-0.13725)/0.01438)+10)-10;
Ang_del_Seg2=(int)Pos_del_Seg2;
Pos_del_Seg2=Ang_del_Seg2*100;
modulo4=(Pos_del_Seg2%100);

if(modulo4 > 50)
{
```

```
    Ang_del_Seg2=Ang_del_Seg2+1;
}

    Corregir_Pos2=1;
    e2=90-Ang_del_Seg2;

if(e2>0)
{
    digitalWrite(28, HIGH);
    digitalWrite(30, LOW);
}

if(e2<0)
{
    digitalWrite(28, LOW);
    digitalWrite(30, HIGH);
}

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Pos descanso= 90");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Pos. Seg=");
    lcd.print(    Ang_del_Seg2);
    delay(2000);

while((Corregir_Pos2==1) && (90 > Ang_del_Seg2+1))
{
    Sen_Pot2=analogRead(A1);
    Sen_Pot2= map(Sen_Pot2, 0, 1023, 0, 255);
    Volt_Pot2=Sen_Pot2/51;
```

```
Pos_del_Seg2=(((Volt_Pot2-0.13725)/0.01438)+10)-10;
Ang_del_Seg2=(int)Pos_del_Seg2;
Pos_del_Seg2=Ang_del_Seg2*100;
modulo4=(Pos_del_Seg2%100);
analogWrite(12, 65);

if(modulo4 > 50)
{
    Ang_del_Seg2=Ang_del_Seg2+1;
}
lcd.setCursor(9,1);
lcd.print(Ang_del_Seg2);
delay(20);
}

Corregir_Pos2=0;
analogWrite(12, 0);
}
else
{
    min_par=t.min;
    min_par=min_par%2;
}
```

Cuando la condición es verdadera el programa lleva a cabo el proceso de los cálculos pertinentes para obtener los parámetros angulares y compararlos con los ángulos del seguidor para activar los motores dependiendo del resultado y así corregir la posición (bloque 6 al bloque 11).

```
if(min_par == 0 && bandera1 == 0)
{
    bandera1=1;
    Funcion_Declinacion();
}
```

```
Funcion_ParametroB();
Funcion_EcuacionT();
Funcion_HoraSol_AngHor();
AngAltSol_Function();
AngAziSol_Function();
HorasLuz_Function();
SalyPuestaSol_Function();
ControlPosAzimutal_Function();
Funcion_ControlPosAltura();
}
if(min_par != 0)
{
    bandera1=0;
}
}
delay(1000);
}
}
delay (1000);
}
```

```
void Funcion_Declinacion()
```

```
{
    decli1=284+n;
    decli1=decli1/365;
    decli2=decli1*360;
    Decli=sin(decli2*DEG_TO_RAD);
    Decli=23.45*Decli;
```

```
}  
  
void Funcion_ParametroB()  
  
{  
  
    B=n-1;  
  
    B=(0.986301369)*B;  
  
}  
  
void Funcion_EcuacionT()  
  
{  
  
    et1=0.001868*cos(B*DEG_TO_RAD);  
  
    et2=0.032077*sin(B*DEG_TO_RAD);  
  
    et3=0.014615*cos((2*B)*DEG_TO_RAD);  
  
    et4=0.04089*sin((2*B)*DEG_TO_RAD);  
  
    ET=0.000075+et1-et2-et3-et4;  
  
    ET=ET*229.2;  
  
}  
  
void Funcion_HoraSol_AngHor()  
  
{  
    hs1=(4*(MES-LLE))+ET;  
    hs1=t.min+hs1;  
    lcd.setCursor(0, 1);  
    lcd.print("HS =");  
    if(hs1 < 0)  
    {
```

```
    hs2=60+hs1;
    HS=t.hour-1;
    angh= HS+(hs2/60);
    lcd.print(  HS);
    lcd.print(".");
    lcd.print( (int)hs2);
    lcd.print(".");
    lcd.print( t.sec);
}
else
{
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("HS =");
    HS=t.hour;
    angh= HS+(hs1/60);
    lcd.print(  HS);
    lcd.print(".");
    lcd.print( (int)hs1);
    lcd.print(".");
    lcd.print( t.sec);
}
ANGH= (angh-12)*15;
}

void AngAltSol_Function()
{
    aalts1=cos(LATLC*DEG_TO_RAD)*cos(Decli*DEG_TO_RAD)*cos(ANGH*DEG_TO_RAD);
    aalts2=sin(LATLC*DEG_TO_RAD)*sin(Decli*DEG_TO_RAD);
    aalts3=aalts1+aalts2;
    AALTS=asin(aalts3)*(180/pi);
    ANTZ=acos(aalts3)*(180/pi);
}
```

```
    }  
void AngAziSol_Function()  
{  
    if(ANGH<0)  
    {  
        SIGN=-1;  
    }  
    else  
    {  
        SIGN=1;  
    }  
  
    if(n <= 131 || n >= 215)  
    {  
        aazs1=cos(ANTZ*DEG_TO_RAD)*sin(LATLC*DEG_TO_RAD);  
        aazs1=aazs1-sin(Decli*DEG_TO_RAD);  
        aazs2=sin(ANTZ*DEG_TO_RAD)*cos(LATLC*DEG_TO_RAD);  
        aazs2=aazs1/aazs2;  
        AAZS=acos(aazs2)*(180/pi);  
        AAZS=SIGN*AAZS;  
        AAZS=90+AAZS;  
    }  
    else  
    {  
        aazs1=cos(ANTZ*DEG_TO_RAD)*sin(LATLC*DEG_TO_RAD);  
        aazs1=aazs1-sin(Decli*DEG_TO_RAD);  
        aazs2=sin(ANTZ*DEG_TO_RAD)*cos(LATLC*DEG_TO_RAD);  
        aazs2=aazs1/aazs2;  
        AAZS=acos(aazs2)*(180/pi);  
        AAZS=SIGN*AAZS;  
    }  
}
```

```
}

void HorasLuz_Function()
{
    hld1=-tan(LATLC*DEG_TO_RAD)*tan(Decli*DEG_TO_RAD);
    HLD=(0.133333)*(acos(hld1*DEG_TO_RAD)*(180/pi));
}

void SalyPuestaSol_Function()
{
    HSS=12-(HLD/2);
    HPS=12+(HLD/2);
}

void ControlPosAzimutal_Function()
{
    if(n <= 131 || n >= 215)
    {
        Ang_AZS=(int)AAZS;
        AAZS=AAZS*100;
        modulo1=(AAZS%100);

        if(modulo1 > 50)
        {
            Ang_AZS=Ang_AZS+1;
        }

        Sen_Pot = analogRead(A0);
        Sen_Pot= map(Sen_Pot, 0, 1023, 0, 255);
        Volt_Pot=Sen_Pot/51;
        Pos_del_Seg=((Volt_Pot-0.13725)/0.014706)+10)-20;
```

```
Ang_A=((60*Volt_Pot)/0.84)-1.43;
Ang_del_Seg=(int)Pos_del_Seg;
Pos_del_Seg=Ang_del_Seg*100;
modulo2=(Pos_del_Seg%100);

if(modulo2 > 50)
{
    Ang_del_Seg=Ang_del_Seg+1;
}

Corregir_Pos=1;
e=Ang_AZS-Ang_del_Seg;

if(e>0)
{
    digitalWrite(24, HIGH);
    digitalWrite(26, LOW);
}

if(e<0)
{
    digitalWrite(24, LOW);
    digitalWrite(26, HIGH);
}

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Pos. Ecu=");
lcd.print(    Ang_AZS);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Pos. Seg=");
lcd.print(    Ang_del_Seg);
```

```
delay(2000);

while((Corregir_Pos==1) && (Ang_AZS>=Ang_del_Seg || ng_AZS<=Ang_del_Seg))
{
    Sen_Pot = analogRead(A0);
    Sen_Pot= map(Sen_Pot, 0, 1023, 0, 255);
    Volt_Pot=Sen_Pot/51;//Float
    Pos_del_Seg=(((Volt_Pot-0.13725)/0.014706)+10)-20;
    Ang_A=((60*Volt_Pot)/0.84)-1.43;
    Ang_del_Seg=(int)Pos_del_Seg;
    Pos_del_Seg=Ang_del_Seg*100;
    modulo2=(Pos_del_Seg%100);
    analogWrite(13, 79);

    if(modulo2 > 50)
    {
        Ang_del_Seg=Ang_del_Seg+1;
    }

    lcd.setCursor(9,1);
    lcd.print(Ang_del_Seg);
    delay(20);
}

Corregir_Pos=0;
analogWrite(13, 0);
}
else
{
    if(AAZS < 0)
    {
```

```
AAZS=(180+(AAZS-90))*-1;
}

else
{
AAZS=180-(AAZS-90);
}

Ang_AZS=(int)AAZS;
AAZS=AAZS*100;
modulo1=(AAZS%100);
if(modulo1 > 50)
{
Ang_AZS=Ang_AZS+1;
}
Sen_Pot = analogRead (A0);
Sen_Pot= map (Sen_Pot, 0, 1023, 0, 255);
Volt_Pot=Sen_Pot/51;
Pos_del_Seg= (((Volt_Pot-0.13725)/0.014706)+10)-20;
Ang_A= ((60*Volt_Pot)/0.84)-1.43;
Ang_del_Seg= (int) Pos_del_Seg;
Pos_del_Seg=Ang_del_Seg*100;
modulo2= (Pos_del_Seg%100);

if (modulo2 > 50)
{
Ang_del_Seg=Ang_del_Seg+1;
}

Corregir_Pos=1;
e=Ang_AZS-Ang_del_Seg;
```

```
if (e>0)
{
    digitalWrite(24, LOW);
    digitalWrite(26, HIGH);
}

if(e<0)
{
    digitalWrite(24, HIGH);
    digitalWrite(26, LOW);
}

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Pos. Ecu=");
lcd.print(    Ang_AZS);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Pos. Seg=");
lcd.print(    Ang_del_Seg);
delay(2000);

while((Corregir_Pos==1) && (Ang_AZS>=Ang_del_Seg+1.2 ||Ang_AZS<=Ang_del_Seg-1.2))
{
    Sen_Pot = analogRead(A0);
    Sen_Pot= map(Sen_Pot, 0, 1023, 0, 255);
    Volt_Pot=Sen_Pot/51;
    Pos_del_Seg=(((Volt_Pot-0.13725)/0.014706)+10)-20;
    Ang_A=((60*Volt_Pot)/0.84)-1.43;
    Ang_del_Seg=(int)Pos_del_Seg;
    Pos_del_Seg=Ang_del_Seg*100;
```

```
    modulo2=(Pos_del_Seg%100);
    analogWrite(13, 79);
    if(modulo2 > 50)
    {
        Ang_del_Seg=Ang_del_Seg+1;
    }

    lcd.setCursor(9,1);
    lcd.print(Ang_del_Seg);
    delay(20);
}

    Corregir_Pos=0;
    analogWrite(13, 0);
}
return;
}

void Funcion_ControlPosAltura()
{
    Ang_AltS=(int)AALTS;
    AALTS=AALTS*100;
    modulo3=(AALTS%100);

    if(modulo3 > 50)
    {
        Ang_AltS=Ang_AltS+1;
    }

    Sen_Pot2=analogRead(A1);
    Sen_Pot2= map(Sen_Pot2, 0, 1023, 0, 255);
```

```
Volt_Pot2=Sen_Pot2/51;
Pos_del_Seg2=(((Volt_Pot2-0.13725)/0.01438)+10)-10;
Ang_del_Seg2=(int)Pos_del_Seg2;
Pos_del_Seg2=Ang_del_Seg2*100;
modulo4=(Pos_del_Seg2%100);

if(modulo4 > 50)
{
    Ang_del_Seg2=Ang_del_Seg2+1;
}

Corregir_Pos2=1;
e2=Ang_AltS-Ang_del_Seg2;

if(e2>0)
{
    digitalWrite(28, HIGH);
    digitalWrite(30, LOW);
}

if(e2<0)
{
    digitalWrite(28, LOW);
    digitalWrite(30, HIGH);
}

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Pos. Ecu=");
lcd.print(    Ang_AltS);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Pos. Seg=");
```

```
lcd.print(    Ang_del_Seg2);
delay(2000);

while((Corregir_Pos2==1) &&(Ang_AltS>=Ang_del_Seg2+1.2||Ang_AltS<=Ang_del_Seg2-1.2))
{
    Sen_Pot2=analogRead(A1);
    Sen_Pot2= map(Sen_Pot2, 0, 1023, 0, 255);
    Volt_Pot2=Sen_Pot2/51;
    Pos_del_Seg2=(((Volt_Pot2-0.13725)/0.01438)+10)-10;
    Ang_del_Seg2=(int)Pos_del_Seg2;
    Pos_del_Seg2=Ang_del_Seg2*100;
    modulo4=(Pos_del_Seg2%100);
    analogWrite(12, 69);
    if(modulo4 > 50)
    {
        Ang_del_Seg2=Ang_del_Seg2+1;
    }
    lcd.setCursor(9,1);
    lcd.print(Ang_del_Seg2);
    delay(20);
}
Corregir_Pos2=0;
analogWrite(12, 0);
}
```